



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ



Διπλωματική Εργασία
Αντωνία Νούσιου

ΕΜΚ ΔΕ 2016 25

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ



Διπλωματική Εργασία
Αντωνία Νούσιου

ΕΜΚ ΔΕ 2016 25

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Copyright © Αντωνία Νούσιου, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Antonia Nousiou, 2016
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).

Αντωνία Νούσιου (2016)
Δοκοί με διάκενα στους κορμούς
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 25
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Antonia Nousiou (2016)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 25
Normative and numerical investigation of steel beams with circular web openings
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτή την προσπάθεια καθοριστική υπήρξε η συμβολή, η καθοδήγηση και η στήριξη ορισμένων ανθρώπων που βρέθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε τη δυνατότητα να διεκπεραιώσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψη του δείχνοντας εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου. Η συστηματική καθοδήγηση και οι ποιοτικές παρατηρήσεις του διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Θανάσουλα, υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. για την εξαιρετική βοήθεια που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας. Οι άμεσες διορθώσεις και οι πολύτιμες συμβουλές του συνέβαλαν σε καθοριστικό βαθμό στη διαμόρφωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Βάγια, Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Για το ευχάριστο κλίμα όσο καιρό δουλέψαμε στον ίδιο χώρο και τις χρήσιμες συμβουλές τους ευχαριστώ το Βασίλη Μελισσιανό και το Στέλιο Βερνάρδο, υποψήφιους Διδάκτορες του Ε.Μ.Π.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να σταθώ και στα πρόσωπα που με στηρίζουν καθόλη τη διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Βασίλη και Ζωή, την αδερφή μου, Κωνσταντίνα, και τους συμφοιτητές και φίλους μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.

Αντωνία Νούσιου

Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2016 25

Κανονιστική και αριθμητική διερεύνηση χαλύβδινων δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού

Αντωνία Νούσιου

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την κανονιστική και αριθμητική διερεύνηση χαλύβδινων δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Η δημιουργία διακένων κορμού εισάγει νέους τρόπους αστοχίας της δοκού και αναπτύσσονται πρόσθετα βέλη κάμψης. Ο έλεγχος δοκών με διάκενα κορμού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 αποτελεί μία νέα προτεινόμενη μέθοδο για την πρόληψη ενδεχομένων αστοχιών και διερευνάται η εγκυρότητα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή στη χρήση δοκών με διάκενα κορμού και περιγράφονται οι μέθοδοι κατασκευής που χρησιμοποιούνται, ενώ παρουσιάζεται η δυνατότητα δημιουργίας δοκών με διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους και καμπυλωμένης γεωμετρίας. Ακολούθως, παρατίθενται παραδείγματα χρήσης δοκών με διάκενα κορμού και τονίζονται τα πλεονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά δοκών με διάκενα κορμού και η προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης τους ως μία ισοδύναμη δοκός Vierendeel. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι μορφές αστοχίας των δοκών και τονίζεται η σημασία σωστού σχεδιασμού και ελέγχου για τη διαφύλαξη της ακεραιότητάς τους. Παρατίθενται γενικοί κανόνες σχεδιασμού δοκών με διάκενα κορμού και πιο αναλυτικά για κυκλικά και ορθογωνικά διάκενα. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους λόγους που οδηγούν στην ανάγκη ενίσχυσης των διακένων και παρατίθενται βασικοί κανόνες σχεδιασμού που προέκυψαν ύστερα από μελέτες.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του προσχεδίου του EN1993-1-13 που αναφέρεται στο σχεδιασμό δοκών με διάκενα κορμού. Αρχικά γίνεται αναφορά στο πεδίο εφαρμογής των κανονισμών και στους ορισμούς που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δοκών. Ακολούθως παρατίθενται οι γεωμετρικοί περιορισμοί δοκών με διάκενα κορμού και οι κανονισμοί για την κατηγοριοποίηση των διατομών. Περιγράφεται αναλυτικά ο υπολογισμός της αντοχής δοκών με διάκενα κορμού, μεμονωμένα ή πολλαπλά, στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και ο έλεγχος στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Με βάση το παραπάνω προσχέδιο γίνεται η επίλυση ενός παραδείγματος δοκού με διάκενα κορμού και σχεδιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνεται αριθμητικά η δοκός και διερευνάται ο κατάλληλος τύπος μη γραμμικής ανάλυσης που θα υιοθετηθεί και το μέγεθος της αρχικής ατέλειας που εισάγεται. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ως προς το οριακό φορτίο της δοκού και το συνολικό βέλος που αναπτύσσεται. Με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών της δοκού εξετάζεται η δυνατότητα ανάπτυξης της πλαστικής και ελαστικής ροπής αντοχής και διερευνάται η αποτελεσματικότητα των κανονισμών ως προς την κατηγοριοποίηση της δοκού.

Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης μέσω μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού με αρχικές ατέλειες. Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της διαμέτρου (h_0) στην απόκριση της δοκού και συγκρίνεται με την απόκριση της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού, ενώ στο έκτο κεφάλαιο η επιρροή της απόστασης μεταξύ των κέντρων γειτονικών διακένων (s). Σε κάθε κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της αντίστοιχης παραμέτρου. Ακολούθως τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων. Στο τέλος του έκτου κεφαλαίου συγκρίνεται η επιρροή της διαμέτρου και της αποστάσεως των κέντρων γειτονικών διακένων μέσω του λόγου a στην απόκριση της δοκού.

Στο έβδομο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή του πάχους του κορμού στην απόκριση δοκών με διάκενα κορμού. Το πάχος του κορμού καθορίζει τη λυγηρότητά του και κατά συνέπεια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τοπική ευστάθεια της δοκού. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ως προς τη μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει του πάχους κορμού και τη μορφή αστοχίας.

Στο όγδοο κεφάλαιο εξετάζεται η επιρροή της θέσης επιβολής συγκεντρωμένου φορτίου σε δοκό με κυκλικά διάκενα κορμού. Οι κανονιστικές διατάξεις δεν αναφέρουν κάποιο κανόνα για τη θέση επιβολής του φορτίου και την αναμενόμενη αστοχία. Για το λόγο αυτό υιοθετείται ένας γενικός κανόνας που αναφέρεται σε ορθογωνικά διάκενα κορμού που προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα. Ακολούθως διερευνάται η επιρροή του πάχους κορμού στη μορφή αστοχίας δοκού με διάκενα κορμού που καταπονείται από συγκεντρωμένο φορτίο. Τέλος, στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της απόκρισης των δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2016 25

Normative and numerical investigation of steel beams with circular web openings

Antonia Nousiou

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the normative and numerical investigation of steel beams with circular web openings. Existences of web openings introduce new failure modes and leads to additional deflection. In the present thesis steel beams with web openings are verified according to the working draft of EN1993-1-13 and the results are compared with those of nonlinear finite element analyses performed with software ADINA.

In the first chapter, a historical review of the use of steel beams with web openings is presented. At the same time, the pertinent construction methods are mentioned, while the feasibility of steel beams with web openings of varied height and curved geometry are described. Examples of their use are mentioned and advantages are highlighted.

In the second chapter, the structural performance of steel beams with web openings is presented and a proposed method based on an equivalent Vierendeel girder is described. Furthermore, the modes of failure are briefly described and the significance of structural design and the verification of their strength is highlighted. General guidance for designing beams with web openings provided, specifically for circular and rectangular openings. Reasons for reinforced openings and simple design rules for reinforced rectangular openings are also presented.

In the third chapter, the working draft of EN1993-1-13, "Steel beams with large web openings", is presented. The scope and definitions for the purpose of this are mentioned. Dimensional limits for designing beams with web openings and their section classification of are presented. Ultimate limit state verifications rules for isolated and closely spaced web openings and serviceability performance are also described. The verification of strength of a beam with circular web openings is examined and the equilibrium path is evaluated.

In the fourth chapter, linear buckling as well as nonlinear numerical analyses of steel beams with circular web openings are presented. The numerical modeling of the beams is described and the appropriate type of nonlinear analysis and size of initial imperfection is investigated. Then, the results of the numerical analyses are presented and compared to the results of the working draft of EN1993-1-13. The verification of plastic and elastic bending resistance is based on the bending moment distribution and section classification is examined.

In the fifth and sixth chapter, the results of an extensive parametric investigation based on nonlinear analysis are presented. In the fifth chapter, the influence of the diameter (h_o) is investigated and compared with the structural performance of a solid beam, while in the sixth chapter the influence of centre to centre spacing of adjacent openings (s) is investigated. In each chapter, the variation of critical and ultimate loads versus the corresponding parameter is presented. The results of the numerical analyses are compared to the results of EN1993-1-13. At the end of the sixth chapter, the influence of the diameter and the centre to centre spacing of adjacent openings based on α , the ratio of centre to centre spacing of adjacent openings to diameter, is compared.

In the seventh chapter, the influence of web thickness is investigated. The thickness of web defines the web slenderness. The results of nonlinear analysis are compared to the results of the working draft.

In the eighth chapter, the influence of the distance from any part of the opening to the nearest point load is investigated. The working draft of EN1993-1-13 does not mention any general rule of the proposed distance and the probable mode of failure. For that reason, a general design rule for rectangular openings is used. The influence of web thickness in the beam mode of failure is investigated. In the ninth and final chapter, the conclusions of the diploma thesis are presented and proposals for the further investigation of steel beams with circular web openings structural strength are suggested.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	1
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	2
1.3	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	9
2	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	17
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	17
2.2	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	18
2.2.1	Αστοχία από κάμψη	20
2.2.2	Αστοχία από στρεπτοκαμπτικό λυγισμό	21
2.2.3	Αστοχία λόγω μηχανισμού Vierendeel	21
2.2.4	Αστοχία από θραύση της συγκόλλησης στο συμπαγές τμήμα του κορμού	23
2.2.5	Αστοχία από διατμητικό λυγισμό του κορμού	24
2.2.6	Αστοχία από τοπικό λυγισμό	26
2.3	ΓΕΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	26
2.3.1	Κανόνες σχεδιασμού για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού	27
2.3.2	Κανόνες σχεδιασμού για δοκούς με ορθογωνικά διάκενα κορμού	27
2.4	ΔΟΚΟΙ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	28
3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3	33
3.1	ΓΕΝΙΚΑ	33
3.2	ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	33
3.2.1	Πεδίο εφαρμογής του προσχεδίου	33
3.2.2	Όροι και ορισμοί	34
3.3	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΜΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	35
3.3.1	Κυκλικά διάκενα	35
3.3.2	Ορθογωνικά και επιμήκη κυκλικά διάκενα	35
3.3.3	Εξαγωνικά διάκενα	36
3.4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	36
3.4.1	Ενεργό μήκος και ύψος διακένων	36
3.5	ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	36
3.5.1	Κατηγοριοποίηση των διατομών T	36
3.6	ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ΟΚΑ)	38
3.6.1	Κανόνες σχεδιασμού για μεμονωμένα διάκενα κορμών	38
3.6.1.1	Γενικά	38

3.6.1.2	Αντοχή σε διάτμηση δοκών με διάκενα κορμού	38
3.6.1.3	Αντοχή σε ροπή κάμψης δοκού με διάκενα κορμού υπό την παρουσία διάτμησης.....	39
3.6.1.4	Αντοχή των διατομών T σε κάμψη Vierendeel	39
3.6.1.5	Διατμητικός λυγισμός κορμού δίπλα από ένα μεμονωμένο διάκενο.....	40
3.6.2	Κανόνες σχεδιασμού για διάκενα κορμού καταναμεμένα σε κοντινές αποστάσεις.....	42
3.6.2.1	Γενικά.....	42
3.6.2.2	Αντοχή σε διάτμηση και λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού.....	43
3.6.2.3	Αντοχή σε διάτμηση και λυγισμό των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού.....	45
3.6.2.4	Αντοχή σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.....	45
3.7	ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΟΚΛ).....	46
3.8	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ EN1993-1-13	47
3.8.1	Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της δοκού με διάκενα κορμού	48
3.8.2	Δράσεις και συνδυασμοί δράσεων.....	48
3.8.3	Γεωμετρικά δεδομένα για τον έλεγχο της δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού.....	49
3.8.4	Γεωμετρικοί έλεγχοι για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού.....	49
3.8.5	Κατηγοριοποίηση διατομής.....	50
3.8.6	Έλεγχος δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σε ροπή κάμψης	51
3.8.7	Έλεγχος δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σε διάτμηση	51
3.8.8	Έλεγχος δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σε κάμψη των διατομών T.....	52
3.8.9	Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε ροπή κάμψης.....	53
3.8.10	Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διάτμηση	53
3.8.11	Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε λυγισμό	54
3.8.12	Έλεγχος των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διάτμηση	55
3.8.13	Έλεγχος των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού σε λυγισμό	55
3.8.14	Έλεγχος της δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ).....	56
3.8.15	Δρόμος Ισορροπίας δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού	56

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ 61

4.1	ΓΕΝΙΚΑ	61
4.2	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	61
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	65
4.3.1	Επιρροή μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού	69
4.3.2	Επιρροή αρχικής ατέλειας.....	74
4.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	83

5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ	95
5.1	ΓΕΝΙΚΑ	95
5.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΚΕΝΩΝ	95
5.3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΔΟΚΟΥ	112
5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	124
6	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ.....	127
6.1	ΓΕΝΙΚΑ	127
6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΠΙΡΡΙΟΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΚΕΝΤΡΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ	127
6.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	141
6.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ	145
7	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΚΟΡΜΟΥ	147
7.1	ΓΕΝΙΚΑ	147
7.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΡΜΟΥ	147
7.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	161
8	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΔΟΚΟ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ	165
8.1	ΓΕΝΙΚΑ	165
8.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	165
8.3	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΡΜΟΥ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	181
9	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	193
9.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	193
9.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	194
9.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	196
10	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	199
10.1	Γενικά	199
10.2	Φύλλο δεδομένων	200
10.3	Φύλλο εκτύπωσης	201

11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 203

Πίνακας 0-1: Ευρετήριο όρων

$A_{a,b}$	Εμβαδόν κάτω διατομή T
$A_{a,t}$	Εμβαδόν άνω διατομής T
b_f	Πλάτος πέλματος
d_b	Ύψος κορμού κάτω διατομής T
d_o	Ύψος διάκενου (ή διάμετρος κυκλικού διάκενου)
d_t	Ύψος κορμού άνω διατομής T
e_o	Εκκεντρότητα από την κεντρική γραμμή του διάκενο πάνω από την κεντρική γραμμή της δοκού
E	Μέτρο ελαστικότητας
f_y	Ονομαστική αντοχή χάλυβα
f_{yd}	Αντοχή σχεδιασμού χάλυβα
h	Ύψος χαλύβδινης διατομής
h_b	Ύψος κάτω διατομής T
h_{eff}	Ενεργό ύψος χαλύβδινης διατομής μεταξύ των κέντρων βάρους των διατομών T
h_t	Ύψος άνω διατομής T
h_w	Ύψος κορμού της συμπαγούς διατομής
I_a	Ροπή αδράνειας χαλύβδινης διατομής
I_c	Ροπή αδράνειας σύμμικτης διατομής
k_p	Συντελεστής μετασχηματισμού
L	Μήκος δοκού
l_e	Ενεργό μήκος συμπαγούς τμήματος του κορμού για λυγισμό
l_o	Μήκος διάκενου
l_s	Μήκος ημιτονοειδούς μέρους του διάκενου από τη μία πλευρά του
l_v	Μήκος αγκύρωσης της ενίσχυσης του διάκενου
$M_{b,Rd}$	Ροπή αντοχής της κάτω διατομής T
M_{Ed}	Δρώσα ροπή στο διάκενο
$M_{el,a,wp,Rd}$	Ελαστική ροπή αντοχής του συμπαγούς τμήματος του κορμού
$M_{N,b,Rd}$	Απομειωμένη ροπή σχεδιασμού της κάτω διατομής T λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης
$M_{wp,Ed}$	Εντός επιπέδου οριζόντια ροπή στο συμπαγές τμήμα του κορμού
$M_{t,Rd}$	Ροπή σχεδιασμού κάτω διατομής T
N_a	Αξονική αντοχή της διατομής T
$N_{b,Ed}$	Αξονική δύναμη στην κάτω διατομή T
n_o	Αριθμός διακένων κατά μήκος της δοκού
s	Απόσταση μεταξύ των κέντρων γειτονικών διακένων
s_e	Πλάτος της επιφάνειας του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού μεταξύ της σύνδεσης και της κοντινότερης άκρης του 1 ^{ου} διάκενου
s_o	Απόσταση των άκρων γειτονικών διακένων (=s-l _o)
$s_{o,eff}$	Ενεργό πλάτος του συμπαγούς τμήματος του κορμού για τον υπολογισμό της λυγηρότητας στον έλεγχο λυγισμού του συμπαγούς τμήματος του κορμού
t_f	Πάχος πέλματος (οι δείκτες b και t αναφέρονται στο κάτω και άνω πέλαμα αντίστοιχα)
t_w	Πάχος κορμού (οι δείκτες b και t αναφέρονται στον κάτω και άνω κορμό αντίστοιχα)
$V_{b,Rd}$	Καθαρή διατμητική αντοχή της κάτω διατομής T
V_{Ed}	Δρώσα διατμητική δύναμη της δοκού στο διάκενο
$V_{Rd,c}$	Διατμητική αντοχή της πλάκας σκυροδέματος
$V_{t,Rd}$	Καθαρή διατμητική αντοχή της άνω διατομής T
$V_{wp,Ed}$	Οριζόντια διατμητική δύναμη στο συμπαγές τμήμα του κορμού

$V_{wp,Rd}$	Διατμητική αντοχή σχεδιασμού του συμπαγούς τμήματος του κορμού
χ_{el}	Ελαστικός ουδέτερος άξονας από την εξωτερική ίνα του πέλματος
ε	$\sqrt{\frac{235}{f_y}}$
λ	Λυγηρότητα συμπαγούς τμήματος του κορμού

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η χρήση δοκών με διάκενα κορμού (castellated beams) είναι ευρέως διαδεδομένη στις μεταλλικές κατασκευές, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Οι διάτρητες δοκοί είναι είδος δοκών με κυκλικά ή εξαγωνικά διάκενα, συνήθως, κατανομημένες κατά μήκος της δοκού. Το σχήμα και η απόσταση μεταξύ των οπών εξαρτάται από την προτίμηση του μηχανικού, ώστε να ταιριάζει στο σκοπό της κατασκευής. Οι δοκοί με διάκενα κορμού χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1910 [1]. Γνωστά αρχικά ως η "Boyd Beam" [2], αυτές οι δοκοί εμφανίστηκαν πρώτη φορά στην αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου στις αρχές του 1940. Η γεωμετρία του είδους κοπής του κορμού της ελατής διατομής (εξαγωνικά διάκενα) των Boyd Beams υιοθετήθηκε ως η πρότυπη γεωμετρία δοκών με διάκενα κορμού στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αργότερα αναπτύχθηκε η μέθοδος κοπής κορμών Litzka [2] από την Litzka Stahlbau στη Βαυαρία. Επιπλέον, παρήγαγαν μία παραλλαγή των πρότυπων δοκών με διάκενα κορμού, όπου το ύψος της διατομής αυξάνεται με την προσθήκη πλακών ενίσχυσης. Το τελικό προϊόν είχε ορθογωνικά και όχι εξαγωνικά διάκενα και είναι γνωστή ως η "Litzka Beam" ή εκτεταμένη διάτρητη δοκός [2].



Σχήμα 1-1: Boyd Beam



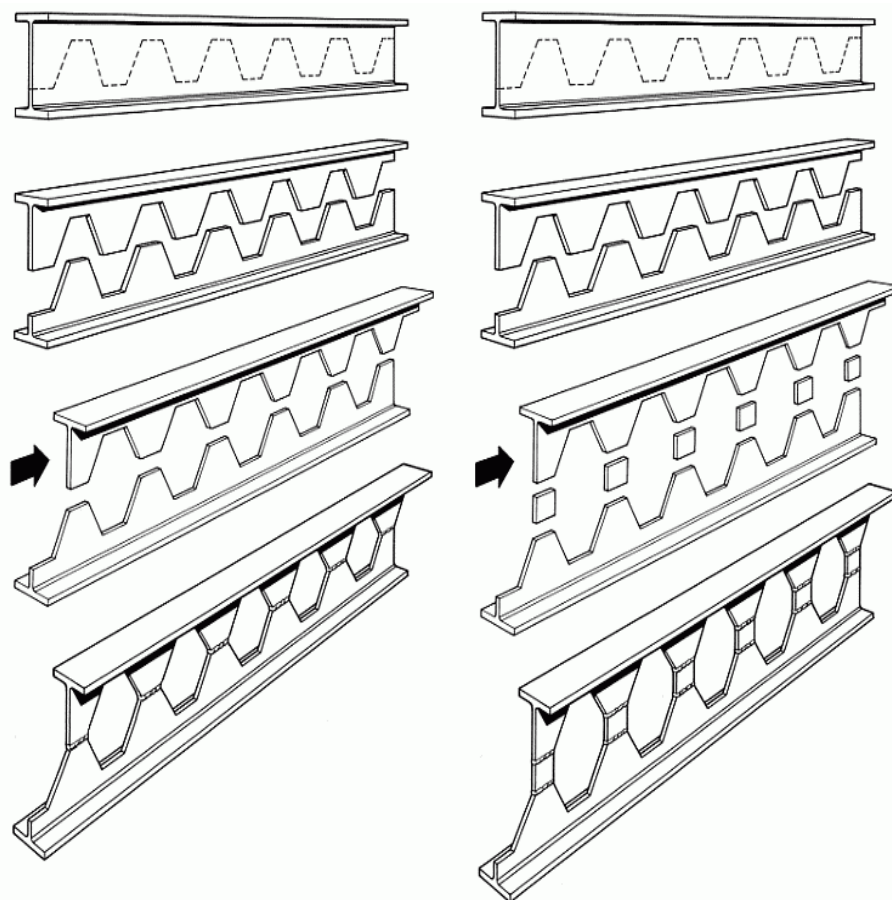
Σχήμα 1-2: Litzka Beam

1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Το σχήμα των διακένων κορμού εξαρτάται από την προτίμηση του μηχανικού και τον σκοπό χρήσης του διάκενου. Τα σχήματα των διακένων που προτιμούνται είναι πολυγωνικά, κυκλικά και ορθογωνικά. Για ευκολία, προτιμούνται εξαγωνικά ή κυκλικά διάκενα. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν επιμήκεις διάκενα, όμως είναι πιθανό να χρειαστούν ενίσχυση. Ανάλογα με την επιλογή του μηχανικού, οι δοκοί με διάκενα κορμού μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μία από τις τρεις μεθόδους [3]:

- Μεμονωμένα διάκενα κόβονται στον κορμό μίας πρότυπης ελατής διατομής θερμής έλασης. Η χαλύβδινη διατομή είναι συμμετρική στο σχήμα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για μεμονωμένα διάκενα.
- Μία συγκολλητή διατομή κατασκευασμένη από τρία μεταλλικά ελάσματα τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας μία διατομή I. Η διατομή μπορεί να είναι ασύμμετρη (για παράδειγμα με ένα μεγαλύτερο κάτω πέλμα) και οι δοκοί μπορούν να είναι κωνικές στο ύψος κατά το μήκος τους. Τα διάκενα κόβονται κατά μήκος του κορμού πριν ή μετά τη δημιουργία της διατομής I. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για μεμονωμένα διάκενα και για πολλαπλά διάκενα ομοιόμορφα κατανομημένα κατά μήκος της δοκού.
- Μία πρότυπη ελατή διατομή θερμής έλασης κόβεται σε ένα επίπεδο του κορμού, τα δύο κομμάτια διατομής T που προκύπτουν επανατοποθετούνται και συγκολλούνται εκ νέου για να δημιουργήσουν μία σειρά συνηθισμένων διακένων σε μία υψηλότερη διατομή. Ιστορικά, τα διάτρητα δοκάρια με εξαγωνικά διάκενα ήταν τα πρώτα που κατασκευάστηκαν με αυτή τη μέθοδο, πλέον στην σύγχρονη

κατασκευή χρησιμοποιούνται δοκοί με κυκλικά διάκενα. Η διατομή μπορεί να είναι ασύμμετρη, το οποίο επιτυγχάνεται αν οι διατομές T κοπούν από διαφορετικές διατομές I. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο για συνηθισμένα σχήματα διακένων.



Σχήμα 1-3: Διαδικασία κατασκευής δοκών με εξαγωνικά διάκενα κορμού



(α)



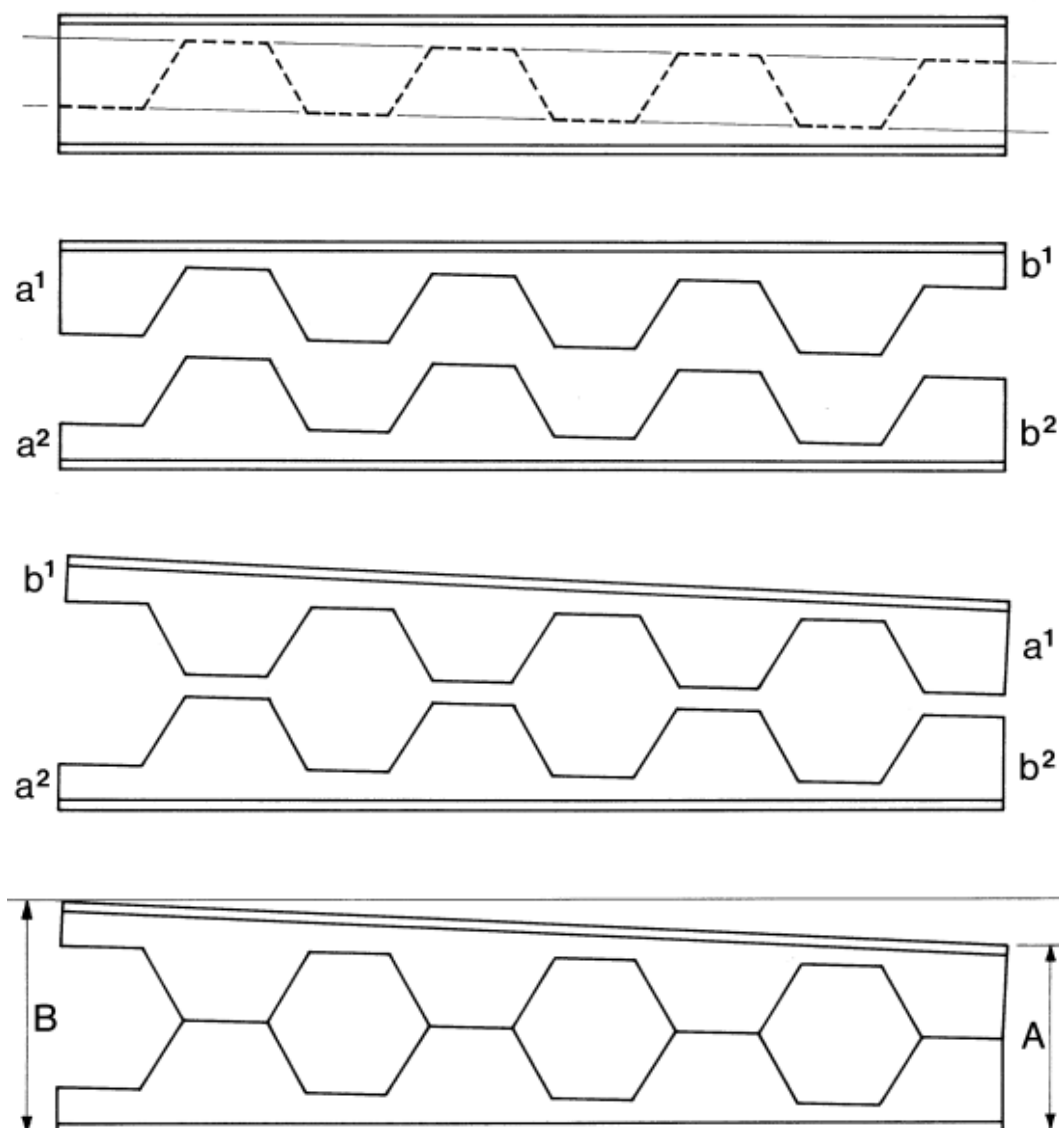
(β)

Σχήμα 1-4: Στάδια κατασκευής δοκών από πρότυπες διατομές διπλού ταυ με (α) εξαγωνικά διάκενα (β) κυκλικά διάκενα

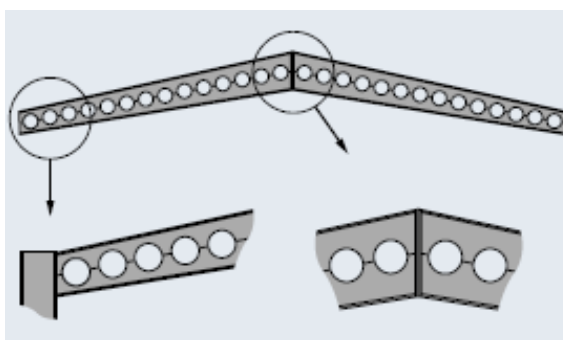


Σχήμα 1-5: Δοκός με επιμήκη διάκενα κορμού

Οι δοκοί με διάκενα κορμού προσφέρουν πολλές δυνατότητες μεθόδου κοπής και τελικής διαμόρφωσης, γεγονός που αφήνει ελευθερία ως προς τη δημιουργία τους αναλόγως με το εκάστοτε επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Το τελικό τους ύψος μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας μεταλλικά ελάσματα μεταξύ των διατομών T [4]. Επίσης είναι δυνατό να κατασκευαστούν δοκοί με διάκενα κορμού με μεταβαλλόμενο ύψος, κόβοντας τη συμπαγή δοκό υπό γωνία και όχι παράλληλα στον κεντροβαρικό της άξονα. Μετά την κοπή, ένα από τα δύο ίσα τμήματα αντιστρέφεται και τα δύο μισά συγκολλούνται κατά μήκος, έτσι ώστε στο ένα άκρο να έχουμε τα δύο τμήματα μικρού ύψους και στο άλλο άκρο τα δύο τμήματα μεγάλου ύψους. Οι δοκοί με διάκενα συνιστούν την πιο οικονομική μέθοδο παραγωγής χαλύβδινων δοκών μεταβαλλόμενου ύψους. Αποτελούν ιδανική λύση για την περίπτωση προβόλων, αφού συνδυάζουν το απαιτούμενο μεγάλο ύψος και συνεπώς μεγάλης ροπής αδράνειας στην περιοχή της στήριξης και το ελαττώμενο ύψος και συνεπώς μειωμένο βάρος στο ελεύθερο άκρο του προβόλου. Το Σχήμα 1-6 παρουσιάζει τη διαδικασία κατασκευής διάτρητης δοκού μεταβαλλόμενου ύψους με εξαγωνικά διάκενα. Η ίδια διαδικασία είναι εφικτή και για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού και οι τελικές δοκοί μπορούν να έχουν διάκενα ίδιας ή διαφορετικών διαμέτρων. Μία επιπλέον δυνατότητα κατά την παραγωγή δοκών με διάκενα κορμού είναι ο συνδυασμός μίας ελαφρύτερης πάνω ημιδιατομής με μία βαρύτερη κάτω ημιδιατομή. Τα τμήματα αυτά θα αποκοπούν από διαφορετικές ελατές διατομές. Αν ο αριθμός των δοκών με διάκενα κορμού που θα κατασκευαστούν είναι άρτιος δεν θα υπάρξει σπατάλη υλικού. Ο σχεδιασμός αυτός ενδείκνυται όταν πρέπει να συνδυαστεί ένα υποδάπεδο από χαλύβδινη δοκό με ένα δάπεδο από σκυρόδεμα. Στην περίπτωση αυτή, οι κοχλίες συνδέονται με το άνω πέλμα της δοκού με διάκενα κορμού προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερή αγκύρωση του σκυροδέματος στη χαλύβδινη δοκό.



Σχήμα 1-6: Διαδικασία κατασκευής δοκών με εξαγωνικά διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους

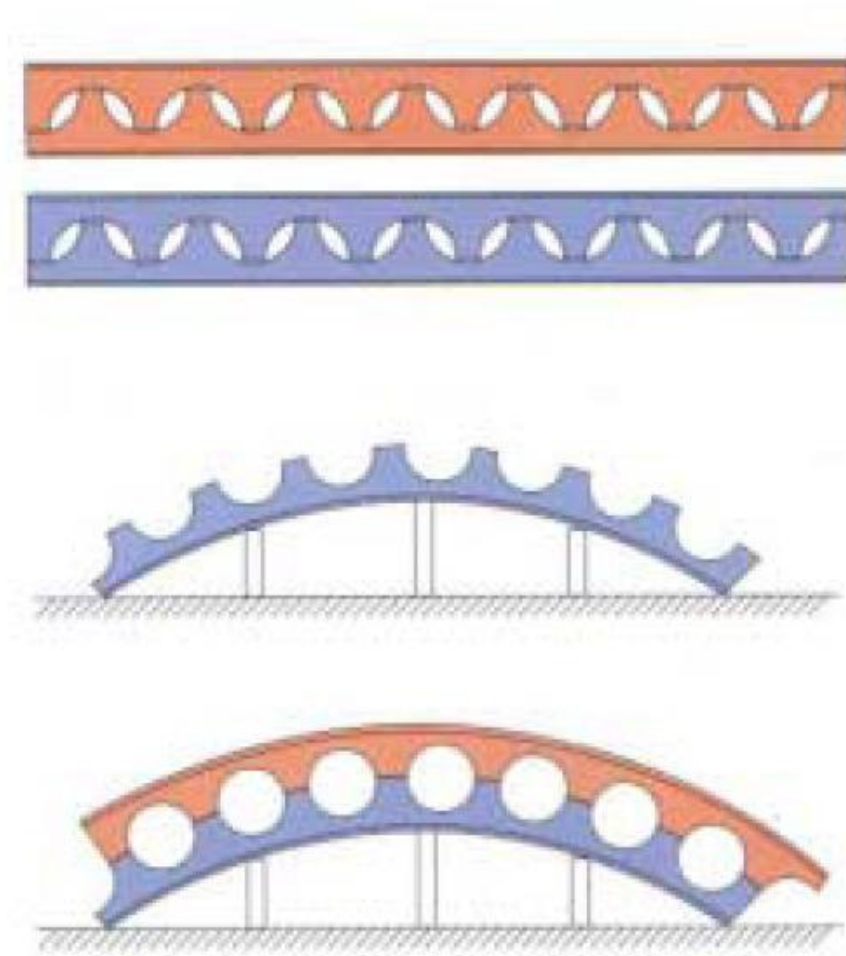


Σχήμα 1-7: Δοκοί με κυκλικά διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους



Σχήμα 1-8: Δοκοί με κυκλικά διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους, ανοίγματος 12 m σε γήπεδο του Λονδίνου

Οι δοκοί με διάκενα κορμού εκτός από ευθύγραμμες μπορούν να είναι και καμπύλες καθώς μπορούν εύκολα να καμπυλωθούν και να καμφθούν υπό γωνία. Οι δοκοί με διάκενα που είναι έντονα καμπυλωμένες κατασκευάζονται από τμήματα διαφορετικών ελατών διατομών, γίνεται η καμπύλωσή τους κατά την απαιτούμενη ακτίνα και ακολουθεί η συγκόλληση με τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα δύο τμήματα θα εναρμονιστούν πλήρως μεταξύ τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στη συνέχεια για το ζεύγος των τμημάτων που δεν έχει χρησιμοποιηθεί. Τα σχήματα των διακένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτές τις δοκούς είναι πολλά, όπως κυκλικά, ελλειπτικά και παραβολοειδή. Συνιστούν την πλέον αποδεκτή λύση στην τοποθέτηση καμπυλωμένων δοκών οροφής, συνδυάζοντας μία σημαντική εξοικονόμηση βάρους, αλλά και χρημάτων όσον αφορά τη διαδικασία καμπύλωσής τους. Μάλιστα η οικονομική ωφέλεια είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα που πρέπει να γεφυρωθεί.



Σχήμα 1-9: Διαδικασία καμπύλωσης δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού



Σχήμα 1-10: Καμπυλωμένες δοκοί με διάκενα κορμού σε σιδηροδρομικό σταθμό στο Άμστερνταμ



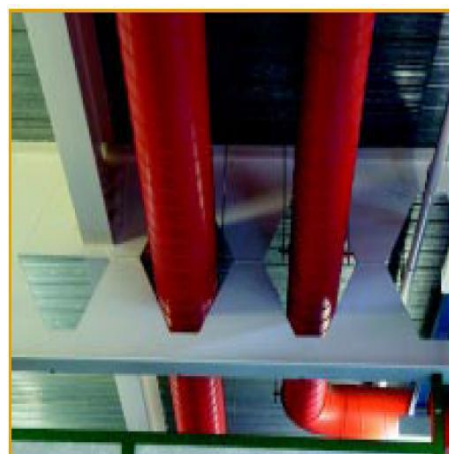
Σχήμα 1-11: Καμπυλωμένες δοκοί με κυκλικά διάκενα κορμού σε είσοδο πάρκου στο Άμστερνταμ



Σχήμα 1-12: Καμπυλωμένες δοκοί με επιμήκη κυκλικά διάκενα κορμού σε σιδηροδρομικό σταθμό στο Βερολίνο

1.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Σημαντικός λόγος για τη χρησιμοποίηση των δοκών με διάκενα κορμού, εκτός από τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων και την ταυτόχρονη παρουσίαση ενός ωραίου αισθητικά αποτελέσματος, είναι η ενσωμάτωση των λειτουργιών ενός κτιρίου ώστε να είναι εύκολη η χάραξη και η εγκατάσταση. Προσφέρουν σε κτιριακούς χώρους τη δυνατότητα για εύκολη εγκατάσταση αγωγών, σωληνώσεων, συστημάτων εξαερισμού, πυρόσβεσης και καλωδιώσεων, για το σκοπό αυτό είναι ευνοϊκή η χρήση δοκών με κυκλικά διάκενα κατά μήκος του κορμού τους. Επίσης, καθίσταται εύκολη η προσέγγιση του αντίστοιχου εξοπλισμού και η δυνατότητα συντήρησης, επισκευής ή αντικατάστασης του κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου ([1], [5], [6]). Οι δοκοί με διάκενα κορμού χρησιμοποιούνται ευρέως ως κύριες δοκοί ή διαδοκίδες σε πλαίσια. Σε σύγκριση με τις συμπαγείς δοκούς από τις οποίες προήλθαν, έχουν ύψος περίπου 1.6 φορές μεγαλύτερο και επταπλάσια αντοχή. Ενώ, αν πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των δοκών με διάκενα κορμού και των δικτυωμάτων θα προτιμηθούν διατηρητές δοκοί γιατί η διαδικασία κατασκευής είναι λιγότερο απαιτητική και κουραστική και το κόστος βαφής των δικτυωμάτων είναι αρκετά υψηλό.



(α)

(β)

Σχήμα 1-13: Διέλευση αγωγών διαμέσου (α) κυκλικών διακένων (β) εξαγωνικών διακένων



Σχήμα 1-14: Διέλευση πολλών αγωγών διαμέσου επιμηκών διακένων ελλειπτικής μορφής

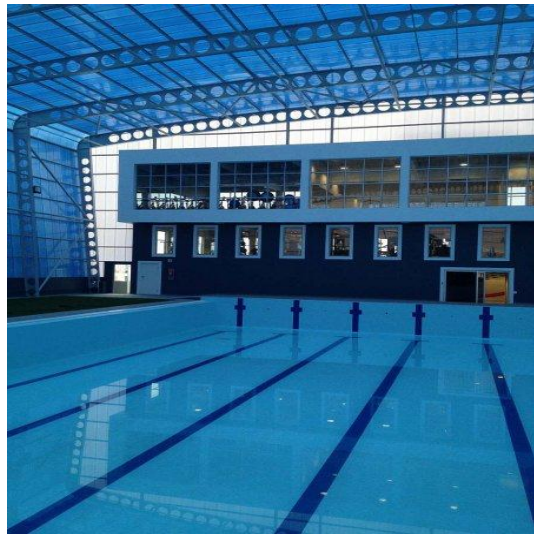
Βασικοί τύποι κατασκευών στις οποίες χρησιμοποιούνται οι δοκοί με διάκενα κορμού είναι: αθλητικές εγκαταστάσεις – στάδια, νοσοκομεία, χώροι parking. Η φέρουσα ικανότητα και η οικονομία που προσφέρουν οι δοκοί οροφής με διάκενα κορμού σε κατασκευές μεγάλων ανοιγμάτων, τις καθιστούν κατάλληλες και ευρέως διαδεδομένες για χρήση σε αθλητικές εγκαταστάσεις. Είναι ελαφρύτερες από τις συμπαγείς δοκούς και πολύ πιο οικονομικές από τις δικτυωτές δοκούς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Όσο αφορά τους χώρους parking, με μία διαδικασία προκαμπύλωσής τους, οι διάτρητες δοκοί μπορούν να αντισταθμίσουν τα βέλη κάμψης από τα κινητά φορτία, ενώ η καμπύλωση τους ευνοεί την αποστράγγιση των υδάτων. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη των διακένων κορμού των δοκών συμβάλλει σημαντικά στον εξαερισμό που απαιτείται από τους κανονισμούς. Τέλος τα μεγάλα διάκενα παρέχουν ένα φωτεινό και ευάερο χώρο.



Σχήμα 1-15: Στεγασμένος χώρος parking στη Μεγάλη Βρετανία



Σχήμα 1-16: Στεγασμένος χώρος έκθεσης αυτοκινήτων



Σχήμα 1-17: Αθλητικές εγκαταστάσεις

Παρόλο που οι δοκοί με διάκενα κορμού παράγονται σε ποικιλία υψών και ανοιγμάτων, κατάλληλες για μικρά έως μεσαία φορτία, υπάρχουν παραδείγματα [7] πιο φιλόδοξων εφαρμογών σε γέφυρες και θόλους, όπως στο Dougherty το 1993 που χρησιμοποιήθηκαν ως δοκοί θολωτών στεγών ανοίγματος 28 m. Επίσης υπάρχουν πιο πρόσφατα παραδείγματα [7] όπου χρησιμοποιήθηκαν σε γέφυρες, όπως είναι οι δύο αμφιέριστες γέφυρες ανοίγματος 20 m και 30 m που κατασκευάστηκαν για το Texas State Highway Department καθώς και μία συνεχής γέφυρα τριών ανοιγμάτων στη Νέα Ζηλανδία όπου ενσωματώθηκαν τα διάτρητα δοκάρια στο σύμμικτο κατάστρωμα της.



Σχήμα 1-18: Αμφιέριστη γέφυρα με σύμμικτο κατάστρωμα και κύριες δοκούς με διάκενα κορμού



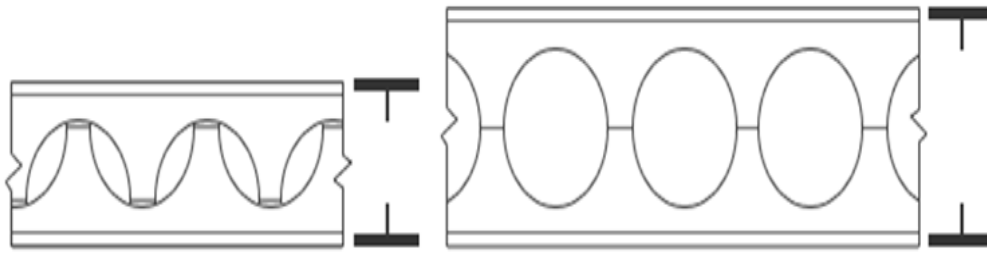
Σχήμα 1-19: Γέφυρα με κύριες δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους

Οι δοκοί με διάκενα κορμού παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα [1]:

- Είναι ελαφρύτερες κατασκευές από τις πρότυπες διατομές, καθώς έχουν μικρότερο βάρος από τις αντίστοιχες πρότυπες διατομές ίδιου ύψους.
- Έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής.
- Διευκολύνουν τη διέλευση αγωγών, σωληνώσεων και συστημάτων εξαερισμού μέσα από τα διάκενα των δοκών, αντί για χρήση ψευδοροφών. Αυτή άλλωστε η λειτουργία συνιστά έναν από τους κύριους λόγους κατασκευής τους, που οδηγεί και στη μείωση του συνολικού ύψους του ορόφου.
- Εύκολη συναρμολόγηση στο εργοτάξιο.
- Προσφέρουν ένα εντυπωσιακό αισθητικό αποτέλεσμα και γι' αυτό προτιμούνται για αρχιτεκτονικούς λόγους σε εμφανείς θέσεις.



Σχήμα 1-20: Δοκοί με διάκενα κορμού σε εμφανείς θέσεις



Σχήμα 1-21: Μεταβολή ύψους δοκού με διάκενα κορμού σε σύγκριση με το ύψος της αρχικής συμπαγούς δοκού

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι τα ακόλουθα [1]:

- Εξαιτίας των διαφορετικών μορφών αστοχίας ή ακόμα και καινούργιων μορφών, είναι αρκετά ασαφείς κατασκευές οι οποίες δεν είναι συμβατές με απλές μεθόδους ανάλυσης.
- Έχουν μικρή αντοχή σε διάτμηση λόγω των διακένων και ευνοούν την ανάπτυξη λυγισμού του κορμού. Για το λόγο αυτό συχνά τοποθετούνται ενισχύσεις γύρω από τα ανοίγματα. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου έχουμε μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία ή το στατικό μοντέλο του φορέα είναι συνεχής δοκός πολλών ανοιγμάτων, δεν ενδείκνυται η χρήση δοκών με διάκενα κορμού. Προτιμάται να χρησιμοποιούνται διάτρητες δοκοί όταν τα επιβαλλόμενα φορτία είναι σχετικά μικρά και μεγάλα διάκενα θα ήταν προτιμότερο να τοποθετηθούν σε περιοχές χαμηλής διατμήσεως.
- Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται πυροπροστασία δεν συνιστάται η χρήση τους, αφού απαιτείται στρώμα επικάλυψης τουλάχιστον 20% παχύτερο σε σύγκριση με τις ελατές διατομές για να αποκτήσουν τον ίδιο βαθμό πυραντίστασης.
- Η διατμητική παραμόρφωση των διατομών T είναι σημαντική και η ανάλυση των βελών είναι περισσότερο περίπλοκη σε σχέση με τις συμπαγούς δοκούς.
- Οι εσωτερικές γωνίες των διακένων προκαλούν συγκέντρωση τάσεων και το όριο χρήσης δοκών με διάκενα κορμού σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δυναμικά φαινόμενα είναι αυστηρό.

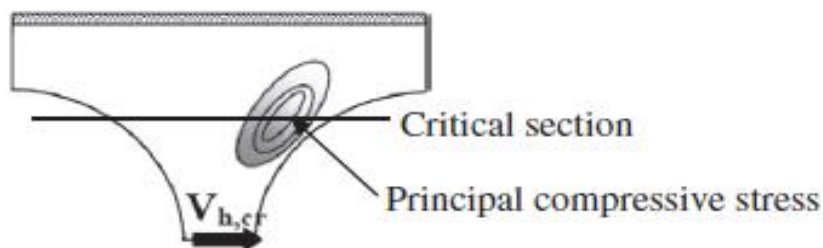


Σχήμα 1-22: Εσωτερικός χώρος κτιρίου με δοκούς διάκενα κορμού

2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η συμπεριφορά των δοκών με διάκενα κορμού και οι μορφές αστοχίας τους. Η δημιουργία ενός μεμονωμένου διάκενου ή πολλαπλών διακένων σε μία ελατή ή συγκολλητή διατομή αλλάζει την κατανομή των τάσεων και επηρεάζει τη δομική συμπεριφορά, η οποία διαφοροποιείται από αυτή των συμπαγών δοκών σε πολλές απόψεις. Η παρουσία των διακένων όχι μόνο αλλάζει τη σχετική σημασία ορισμένων μορφών αστοχίας αλλά εισάγει και καινούργιες. Αυτές οι καινούργιες μορφές αστοχίας πηγάζουν από το διαφορετικό τρόπο μεταφοράς της διατμητικής δύναμης από το ένα συμπαγές τμήμα του κορμού της δοκού στο άλλο μέσω της διατομής του διάκενου. Η εμφάνιση αυτών των νέων μορφών εξαρτάται από τη δυσκαμψία της δοκού (λυγηρότητα του κορμού), τα ειδικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διάτρητων δοκών, τη γεωμετρία και το είδος των διακένων και την πρόβλεψη πλευρικής εξασφάλισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικοί κανόνες σχεδιασμού δοκών με διάκενα κορμού που προέκυψαν ύστερα από πειραματικές μελέτες και η ανάγκη ενίσχυσης των δοκών ώστε να αυξηθεί η αντοχής τους, όταν αυτό είναι αναγκαίο.



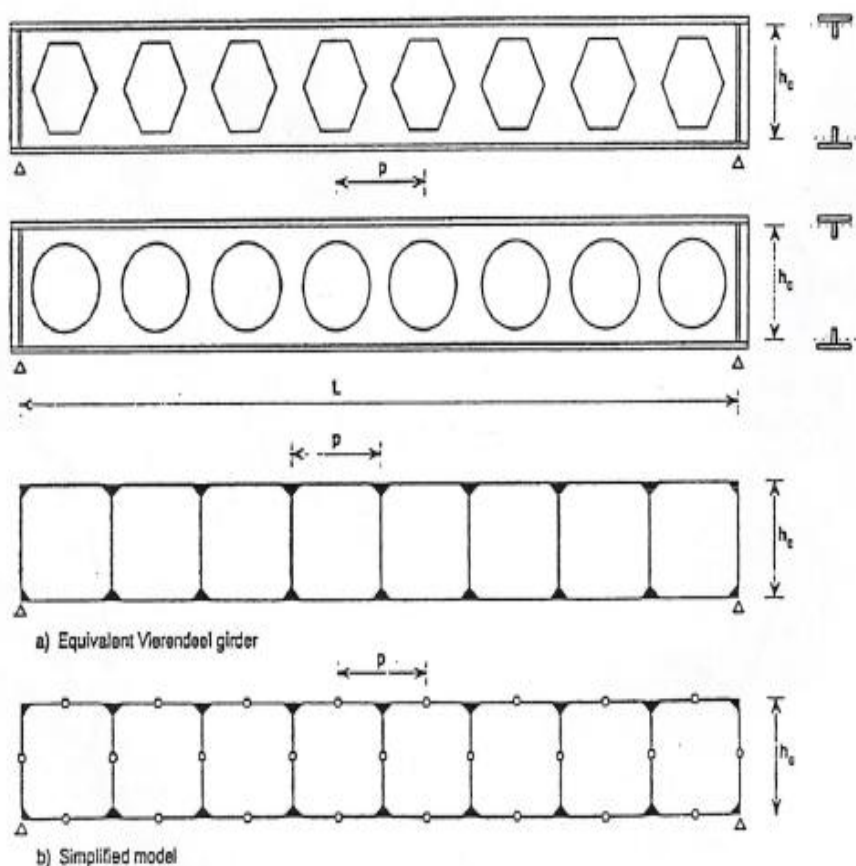
Σχήμα 2-1: Μεταφορά διατμητικής δύναμης στο συμπαγές τμήμα του κορμού



Σχήμα 2-2: Ενισχυμένο ορθογωνικό διάκενο

2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Μία δοκός με πολλαπλά διάκενα κορμού αναλύεται ως μία ισοδύναμη δοκός Vierendeel, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3. Η δοκός Vierendeel (ονομάστηκε έτσι από τον Βέλγο μηχανικό Arthur Vierendeel) είναι ένας φορέας που, ανεξάρτητα από τον τρόπο στήριξής του, συντίθεται από μία σειρά ορθογωνικών πλαισίων. Τα πλαίσια αυτά αποτελούνται από ευθύγραμμες ράβδους και παράλληλους μεταξύ τους ορθοστάτες. Η ανάλυση αυτών των δοκών συνήθως γίνεται με την υπόθεση ότι τα φορτία δρουν κατά μήκος των γραμμών δράσης των ορθοστατών και όχι σε ενδιάμεσα σημεία των ευθύγραμμων ράβδων. Το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί εάν υποθέσουμε σημεία μηδενικής ροπής (αρθρώσεις) στο μέσο κάθε ανοίγματος και στο μέσο του ύψους κάθε ορθοστάτη (δηλαδή συμπαγούς τμήματος του κορμού). Σύμφωνα με το μοντέλο της δοκού Vierendeel, η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται από τα εξωτερικά φορτία, αναλαμβάνεται από ένα ζεύγος αξονικών δυνάμεων των πελμάτων. Η κατακόρυφη τέμνουσα δύναμη μοιράζεται ομοιόμορφα και στις δύο διατομές T στις θέσεις μηδενικής ροπής. Η δύναμη αυτή προκαλεί μία επιπρόσθετη καμπτική ροπή, η οποία αντιστοιχεί στο μέρος της συνολικής κάμψης που δεν αναλαμβάνεται από το ζεύγος των αξονικών δυνάμεων. Η οριζόντια τέμνουσα δύναμη που εμφανίζεται στους ορθοστάτες αντιστοιχεί στη διαφορά των αξονικών δυνάμεων των διατομών σε κάθε διάκενο. Συνεπώς, οι ορθοστάτες καταπονούνται από μία καμπτική ροπή που προέρχεται από την οριζόντια εγκάρσια δύναμη.



Σχήμα 2-3: Μοντέλο ανάλυσης δοκού Vierendeel

Η επιρροή μεγάλων ή σε κοντινές αποστάσεις διακένων στην συμπεριφορά μιας δοκού είναι περίπλοκη. Σε σύγκριση με τις συμπαγούς δοκούς υπάρχουν περισσότεροι παράγοντες ([8], [14]) που μπορούν να προκαλέσουν αστοχία:

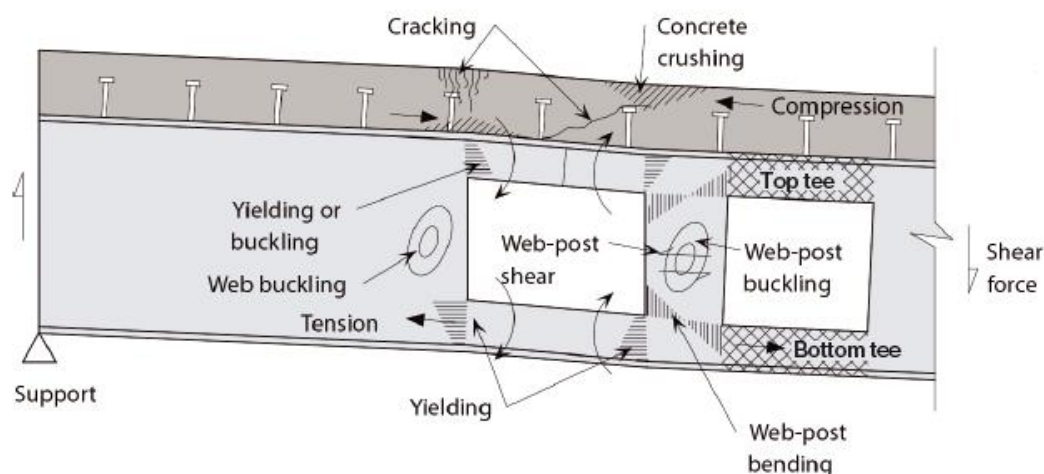
- Αν το διάκενο βρίσκεται σε περιοχή υψηλής τέμνουσας ή/και σε περιοχή υψηλής ροπής.
- Αν η δοκός φορτίζεται ομοιόμορφα ή με συγκεντρωμένο φορτίο.
- Το σχήμα του διακένου, το οποίο για παράδειγμα μπορεί να είναι κυκλικό, ορθογωνικό, πολυγωνικό ή επιμήκης κυκλικό.
- Η θέση του διακένου καθ' ύψος της διατομής.
- Η απόσταση μεταξύ των διακένων (μπορεί να εμφανισθούν ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις στο συμπαγές τμήμα του κορμού μεταξύ των διακένων).
- Η μη συμμετρική μεταλλική διατομή (ανάλογα με το λόγο των εμβαδών του κάτω και άνω πέλματος).
- Η λυγηρότητα του κορμού (η οποία επηρεάζει την αντοχή σε λυγισμό).

Τα διάκενα κορμού προκαλούν μείωση στη διατμητική αντοχή της δοκού λόγω της αφαίρεσης ενός σημαντικού τμήματος του κορμού, αλλά προκαλεί μικρότερη μείωση στην καμπτική αντοχή, αφού η κάμψη αναλαμβάνεται κυρίως από τα πέλματα. Η δομική αντοχή μιας δοκού με διάκενα κορμού θεωρείται η κρίσιμη μεταξύ της συνολικής αντοχής σε κάμψη, στρεπτοκαμπτικό λυγισμό και διάτμηση

και της τοπικής αντοχής των συμπαγών τμημάτων του κορμού, μεταξύ των διακένων, και της αντοχής των διατομών T.

Μία δοκός με διάκενα κορμού πρέπει να ελεγχθεί για τις ακόλουθες μορφές αστοχίας [7]:

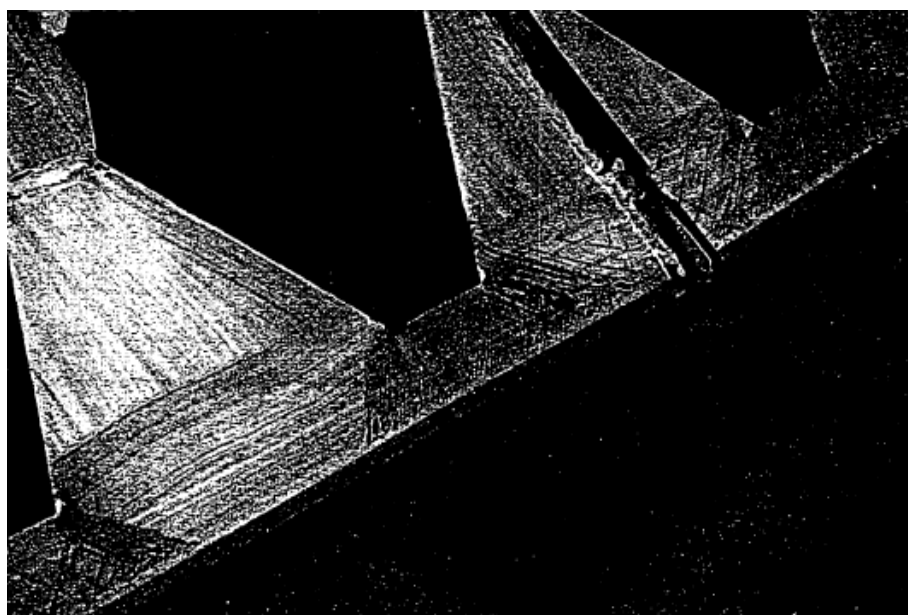
- Καθολική κάμψη, η οποία εξαρτάται από την σύνθετη καταπόνηση στη θέση του διάκενου.
- Κατακόρυφη διάτμηση, λόγω της απομείωσης του εμβαδού του κορμού.
- Τοπική κάμψη Vierendeel η οποία οφείλεται στη μεταφορά διατμητικής δύναμης κατά μήκος του διάκενου, που πρέπει να είναι συνεπής με το ρυθμό μεταβολής της ροπής κάμψης κατά μήκος της δοκού.
- Οριζόντια διάτμηση στο συμπαγές τμήμα του κορμού, η οποία είναι κρίσιμη σε περίπτωση διακένων κοντινών αποστάσεων, καθώς εξαρτάται από την επιφάνεια των συμπαγών τμημάτων του κορμού.
- Κάμψη των συμπαγών τμημάτων του κορμού, η οποία είναι κρίσιμη στην περίπτωση ορθογωνικών διακένων κοντινών αποστάσεων.
- Λυγισμό των συμπαγών τμημάτων του κορμού, ο οποίος είναι κρίσιμος στην περίπτωση συμπαγών τμημάτων κορμού μεγάλης λυγηρότητας.
- Διατμητικός λυγισμός, ο οποίος είναι κρίσιμος στην περίπτωση συμπαγών τμημάτων κορμού μεγάλης λυγηρότητας.
- Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός της δοκού
- Θραύση του συγκολλημένου τμήματος στη συμπαγή επιφάνεια του κορμού.



Σχήμα 2-4: Πιθανές μορφές αστοχίας δοκού με διάκενα κορμού

2.2.1 Αστοχία από κάμψη

Αστοχία από κάμψη [7] μπορεί να συμβεί όταν η διατομή υπόκειται σε καθαρή κάμψη (σημαντική ροπή κάμψης και αμελητέα διάτμηση). Αυτό το είδος αστοχίας αναφέρθηκε πρώτη φορά στις μελέτες των Toprak και Cooke (1959) και Halleux (1967). Στην αρχική μελέτη των Toprak και Cooke βρέθηκε ότι σε δοκό που υπόκειται σε καθαρή κάμψη οι διατομές T πάνω και κάτω από τα διάκενα υποχώρησαν με παρόμοιο τρόπο με αυτό των δοκών με συμπαγή κορμό. Συνεπώς, στις σύμμικτες ή μεταλλικές δοκούς, η ολική καμπτική αντοχή μπορεί να εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπόψη την πλαστική ροπή M_{pl} της διατομής από την αξονική γραμμή του διάκενου.



Σχήμα 2-5: Αστοχία από κάμψη

2.2.2 Αστοχία από στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

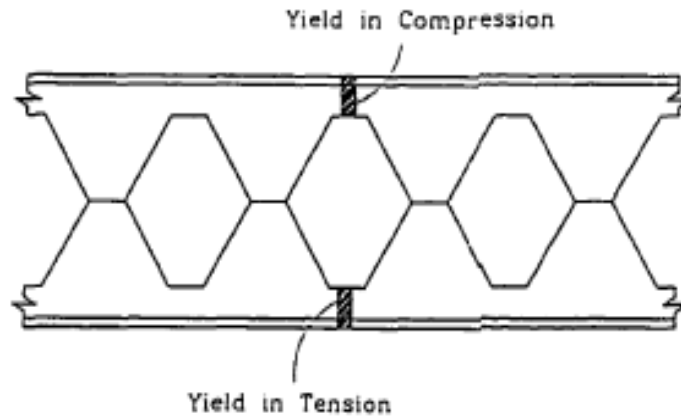
Οι μη σύμμικτες δοκοί με διάκενα κορμού είναι πιο ευαίσθητες στον στρεπτοκαμπτικό λυγισμό [7] σε σχέση με τις σύμμικτες δοκοί λόγω της απουσίας πλευρικής εξασφάλισης στο θλιβόμενο άνω πέλμα. Συνεπώς, είναι επιρρεπείς να λυγίσουν πλευρικά λόγω των σχετικά πιο ψηλών και λεπτών διατομών τους και της μειωμένης στρεπτικής ακαμψίας του κορμού. Στις σύμμικτες δοκούς με διάκενα κορμού, η σύμμικτη πλάκα παρέχει συνεχή πλευρική εξασφάλιση στο θλιβόμενο άνω πέλμα. Η συμπεριφορά σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό των δοκών με διάκενα κορμού είναι παρόμοια με αυτή των δοκών με συμπαγή κορμό. Αυτό το είδος αστοχίας διερευνήθηκε από τους Nethercot και Kerdal (1982), οι οποίοι συμπέραναν ότι τα διάκενα κορμού έχουν αμελητέα επίδραση στον στρεπτοκαμπτικό λυγισμό των δοκών που εξέτασαν. Όλες οι δοκοί που μελετήθηκαν παρουσίασαν την ίδια συνεχή ομαλή εμφάνιση πλευρικού λυγισμού, χωρίς παραμορφώσεις των συμπαγών τμημάτων του κορμού. Συνεπώς, πρότειναν πως οι δοκοί με διάκενα κορμού μπορούν να αναλυθούν με παρόμοιο τρόπο με αυτό των δοκών με συμπαγή κορμό αλλά με τη διαφορά ότι θα χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες της μειωμένης διατομής.

2.2.3 Αστοχία λόγω μηχανισμού Vierendeel

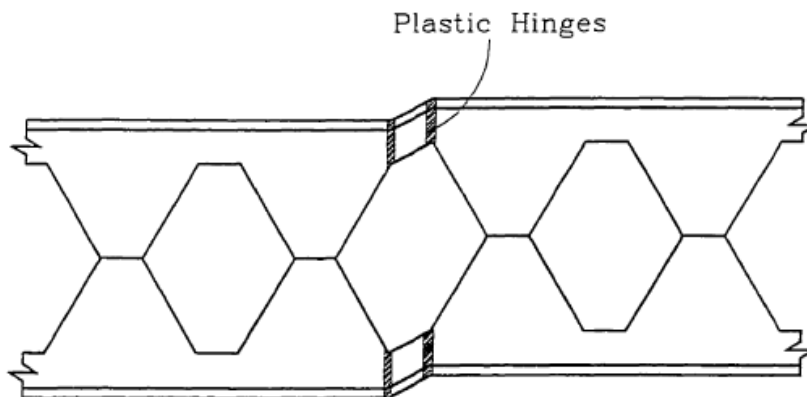
Η αστοχία λόγω μηχανισμού Vierendeel [7] αναφέρθηκε πρώτα στις μελέτες των Alfillisch (1957) και Toprac και Cooke (1959), για δοκούς με πολυγωνικά διάκενα κορμού και τους Renwood και McCutcheon (1968), για δοκούς με κυκλικά διάκενα. Σε κορμούς με μεγάλα διάκενα που υπόκεινται σε υψηλή αναλογία τέμνουσας και ροπή, ο μηχανισμός Vierendeel είναι πιθανό να συμβεί. Όταν μία διάτρητη δοκός υποβάλλεται σε διάτμηση, οι διατομές T πάνω και κάτω από τα διάκενα κορμού πρέπει να μεταφέρουν την επιβαλλόμενη διάτμηση όπως και την ροπή πρώτης και δεύτερης τάξης. Η ροπή πρώτης τάξης είναι η καθολική ροπή κάμψης και η ροπή δεύτερης τάξης, γνωστή και ως ροπή Vierendeel, είναι αποτέλεσμα της διατμητικής δύναμης στις διατομές T κατά μήκος του διάκενου κορμού. Επομένως, το οριζόντιο μήκος του διάκενου επηρεάζει άμεσα τη ροπή Vierendeel. Λόγω απουσίας τοπικής ή ολικής αστάθειας, οι δοκοί με διάκενα κορμού έχουν δύο βασικές μορφές κατάρρευσης, που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τη θέση του διάκενου. Οι δύο μορφές είναι:

- Πλαστική παραμόρφωση των άνω και κάτω διατομών T [7] σε περιοχή υψηλής καμπτικής ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6.

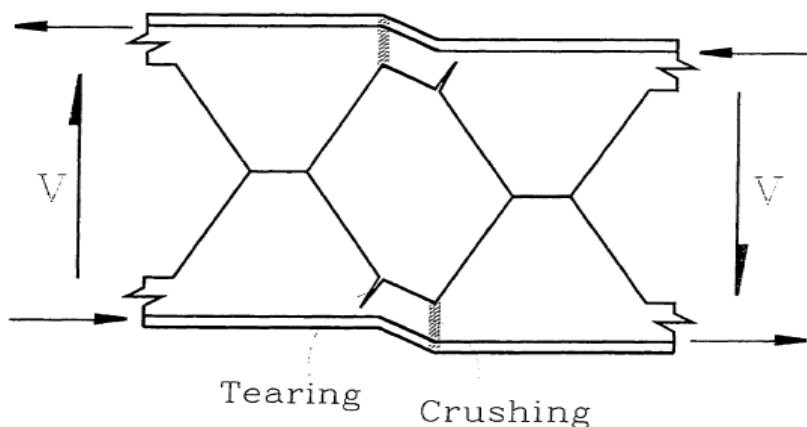
- Δράση Vierendeel [7] εξαιτίας του σχηματισμού τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων στην άνω και κάτω διατομή T πάνω και κάτω από το διάκενο, λόγω του συνδυασμού καθολικής κάμψης και ροπής Vierendeel. Η κάμψη Vierendeel προκαλείται από την ανάγκη η μεταφορά της διατμητικής δύναμης κατά μήκος του διακένου να είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της ροπής κάμψης. Στα σημεία αυτά οι ροπές Vierendeel, εξαιτίας των δυνάμεων διάτμησης που ενεργούν στα μέσα των διακένων, εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους. Δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των διακένων, με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα ανοίγματα του προσομοιώματος Vierendeel να παραμορφώνονται με τη μορφή παραλληλόγραμμου και να αστοχούν, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2-7 και 2-8.



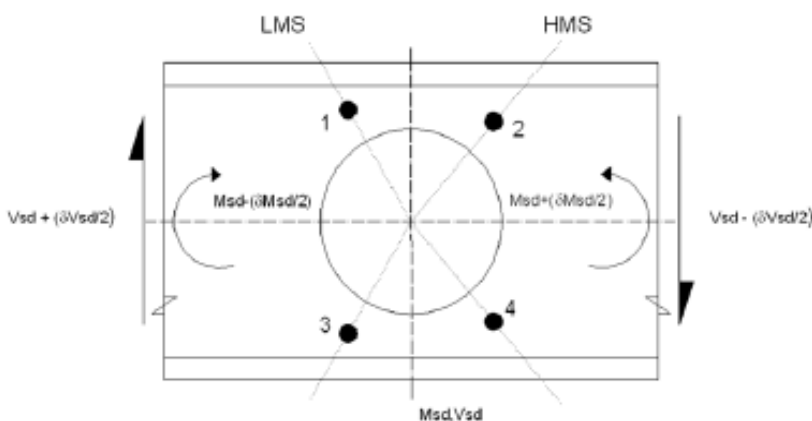
Σχήμα 2-6: Πλαστική παραμόρφωση δοκού με διάκενα κορμού σε περιοχή υψηλής καμπτικής ροπής



Σχήμα 2-7: Παραμόρφωση με μορφή παραλληλογράμμου δοκού με διάκενα κορμού



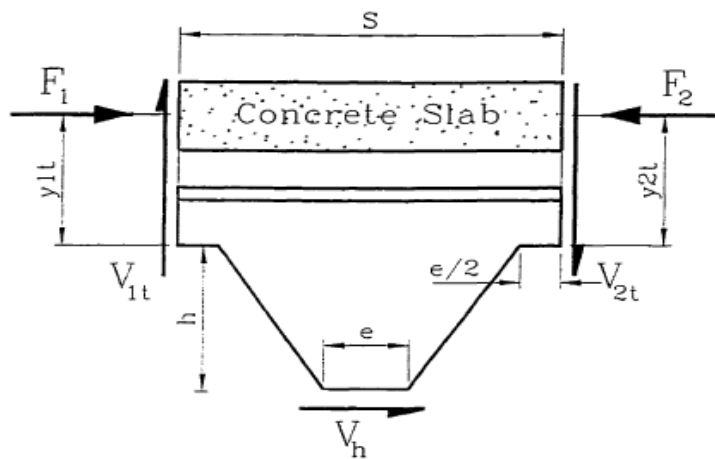
Σχήμα 2-8: Δράση Vierendeel



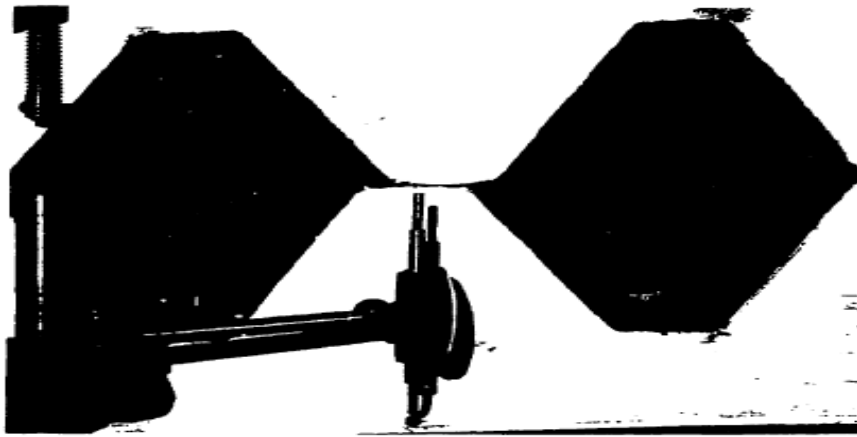
Σχήμα 2-9: Μηχανισμός Vierendeel

2.2.4 Αστοχία από θραύση της συγκόλλησης στο συμπαγές τμήμα του κορμού

Αστοχία από θραύση της συγκόλλησης στο συμπαγές τμήμα του κορμού [7] μπορεί να συμβεί όταν το πάχος του κορμού ή το μήκος του συγκολλημένου τμήματος είναι μικρό. Αυτό το είδος αστοχίας μπορεί εύκολα να αναλυθεί με τη βοήθεια του διαγράμματος ελευθέρου σώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-10, που αναπτύχθηκε από τους Hosain και Spiers (1971) και Renwood (1969). Η θραύση προκαλείται από τη δράση οριζόντιας διατμητικής δύναμης στο συμπαγές τμήμα του κορμού, η οποία είναι απαραίτητη για την ισορροπία των δυνάμεων διάτμησης που αναπτύσσονται στα σημεία μηδενικής ροπής στα άκρα της άνω διατομής T. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από τους Hosain και Spiers, έδειξαν ότι αποτελεί ψαθυρή μορφή αστοχίας, αφού μπορεί να συμβεί χωρίς προειδοποίηση. Συνεπώς, πρέπει να δίνεται προσοχή σε αυτή τη μορφή αστοχίας κατά τον σχεδιασμό δοκών με διάκενα κορμού.



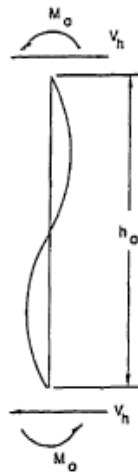
Σχήμα 2-10: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος για την ανάλυση των συγκολλημένων τμημάτων



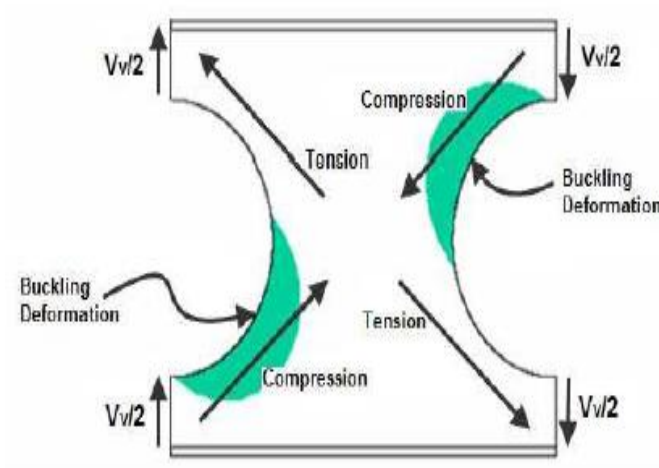
Σχήμα 2-11: Θραύση του συγκολλημένου τμήματος από πείραμα των Hosain και Spiers

2.2.5 Αστοχία από διατμητικό λυγισμό του κορμού

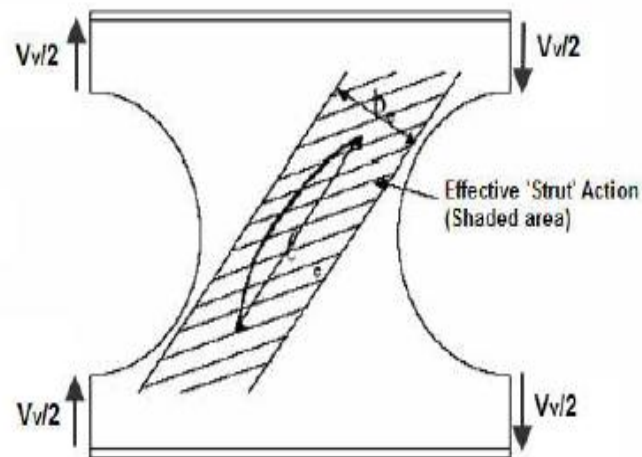
Το συμπαγές τμήμα του κορμού υποβάλλεται σε οριζόντια διατμητική δύναμη, η οποία θα προκαλέσει διπλή ροπή-καμπυλότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-12, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διατμητικού λυγισμού [7]. Αυτό το είδος αστοχίας μελετήθηκε από τους Sherbournel (1966), Halleux (1967), Bazile και Texier (1968), Kolosowski (1982) και Zaarour και Renwood (1996). Ο διατμητικός λυγισμός του συμπαγές τμήματος του κορμού των δοκών με διάκενα κορμού φαίνεται στα Σχήματα 2-13 και 2-14.



Σχήμα 2-12: Διπλή ροπή - καμπυλότητα στο συμπαγές τμήμα του κορμού



Σχήμα 2-13: Συμπεριφορά του συμπαγούς τμήματος του κορμού



Σχήμα 2-14: Μοντέλο διαμητικού λυγισμού του συμπαγούς τμήματος του κορμού

2.2.6 Αστοχία από τοπικό λυγισμό

Η αστοχία από τοπικό λυγισμό [7] εξαρτάται από την κατηγορία κατάταξης της διατομής. Διατομές που υπόκεινται σε κάμψη και ανήκουν στην Κατηγορία 2 μπορούν να αναπτύξουν πλήρη πλαστική συμπεριφορά με περιορισμένη στρωφική ικανότητα. Κατηγορίας 3 είναι αυτές όπου μόνο η τάση των ακραίων ινών μπορεί να περάσει στην πλαστική περιοχή καθώς ο τοπικός λυγισμός αποτρέπει την ανάπτυξη πλήρους πλαστικής κατανομής τάσεων. Κατηγορίας 4 είναι αυτές στις οποίες τοπικός λυγισμός συμβαίνει στην ελαστική περιοχή και η αντοχή σε κάμψη υπολογίζεται από την ενεργή διατομή. Στις δοκούς με διάκενα κορμού ο τοπικός λυγισμός μπορεί να συμβεί με τρεις τρόπους:

- Λυγισμός του θλιβόμενου πέλματος [7].
- Λυγισμός της θλιβόμενης διατομής T [7] λόγω καθολικής κάμψης. Για μη ενισχυμένα διάκενα, αυτός ο έλεγχος απαιτείται σε μεγάλα διάκενα που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής ροπής.
- Κατακόρυφη αστάθεια των συμπαγών τμημάτων του κορμού (δίπλα στα διάκενα) [7] σε περιοχές υψηλής διάτμησης.

2.3 ΓΕΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης χρήσης δοκών με διάκενα κορμού, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες σχετικά με το σχεδιασμό και την ανάλυση τους. Από αποτελέσματα αυτών των μελετών έχουν προκύψει βασικοί κανόνες σχεδιασμού για όλα τα είδη διακένων αλλά και πιο συγκεκριμένα για κυκλικά και ορθογωνικά διάκενα, οι οποίοι παρουσιάζονται στη συνέχεια. Οι βασικοί κανόνες σχεδιασμού [9] για όλα τα σχήματα διακένων είναι:

- Αποφυγή δημιουργίας διακένων σε ζώνες υψηλής διάτμησης.
- Αποφυγή κατανομής διακένων σε κοντινές αποστάσεις.
- Το διάκενο πρέπει να δημιουργείται κεντρικά στον κορμό και η εκκεντρότητα του διακένου να αποφεύγεται, όπου αυτό είναι δυνατό.
- Μη ενισχυμένα διάκενα είναι συνήθως κατάλληλα σε περιοχές χαμηλής διάτμησης και χαμηλής ροπής κάμψης.

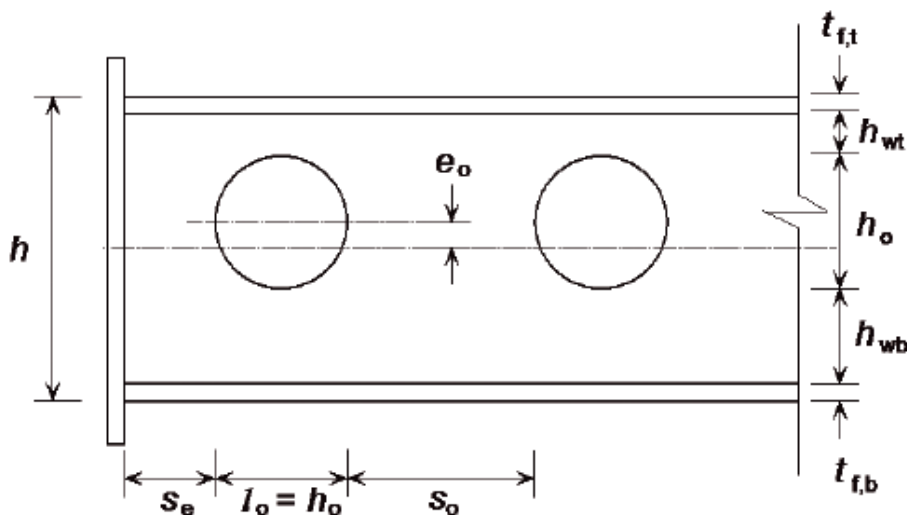
- Το διάκενο πρέπει να δημιουργείται σε απόσταση από την στήριξη τουλάχιστον δύο φορές το ύψος της δοκού ή 10% του ανοίγματος (l) της δοκού, όποιο από τα δύο είναι μέγιστο.
- Η καθαρή απόσταση μεταξύ των διακένων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το ύψος της δοκού.
- Η καλύτερη θέση δημιουργίας ενός μεμονωμένου διακένου είναι εκεί όπου η διατμητική δύναμη είναι ελάχιστη.
- Τα συγκεντρωμένα φορτία δεν πρέπει να ασκούνται σε απόσταση μικρότερη από το συνολικό ύψος της δοκού (h) από την πλευρά του κοντινότερου διακένου.

Αν τηρηθούν οι παραπάνω κανόνες, το πρόσθετο βέλος λόγω κάθε διακένου μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το 3% του βέλους στο μέσο του ανοίγματος της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού.

2.3.1 Κανόνες σχεδιασμού για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού

Ύστερα από μελέτες σε δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού (Cellular Beams) [4] προέκυψαν οι εξής βασικοί κανόνες σχεδιασμού:

- Το μέλος πρέπει να είναι Κατηγορίας 1 ή 2.
- Τα διάκενα πρέπει να δημιουργούνται στον άξονα της δοκού.
- Η διάμετρος των κυκλικών διακένων πρέπει να περιορίζεται σε $0.5 \cdot h$, όπου h είναι το ύψος της δοκού.
- Η απόσταση μεταξύ των κέντρων γειτονικών διακένων μετρείται παράλληλα με τον άξονα του μέλους και δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 2.5 της διαμέτρου του μεγαλύτερου διακένου.
- Το φορτίο που ασκείται στο μέλος πρέπει να είναι ομοιόμορφα καταμεμημένο.
- Η μέγιστη διάτμηση του μέλους δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50% της διατμητικής αντοχής της απομειωμένης διατομής.



Σχήμα 2-15: Βασικοί γεωμετρικοί παράμετροι δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού

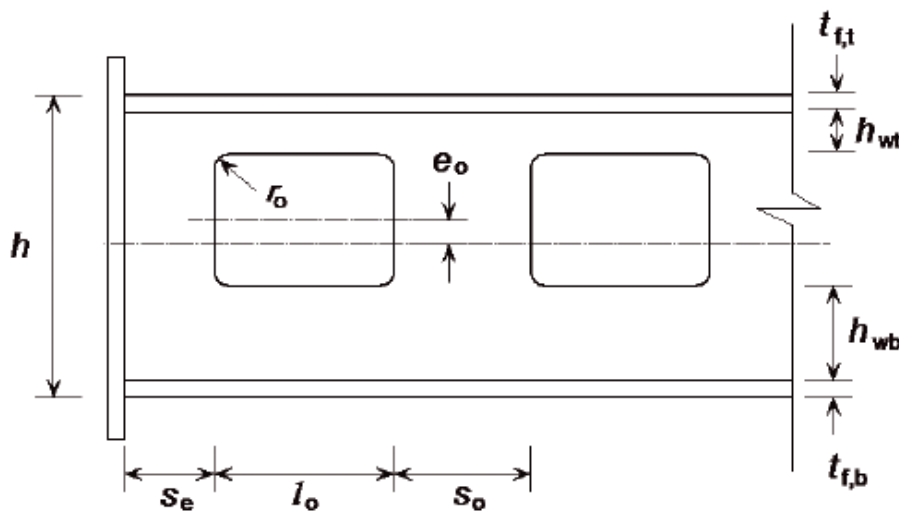
2.3.2 Κανόνες σχεδιασμού για δοκούς με ορθογωνικά διάκενα κορμού

Ύστερα από μελέτες σε δοκούς με ορθογωνικά διάκενα κορμού [4] προέκυψαν οι βασικοί κανόνες σχεδιασμού:

- Το ύψος του κορμού πάνω από το διάκενο δεν πρέπει να υπερβαίνει το $10 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ (το όριο για Κατηγορία 2 για προεξέχοντα τμήματα που υπόκεινται σε θλίψη σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 του EN1993-1-1 §5.5).
- Το ύψος του κορμού κάτω από το διάκενο δεν πρέπει να υπερβαίνει το $14 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ (το όριο για Κατηγορία 3 για προεξέχοντα τμήματα που υπόκεινται σε θλίψη σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 του EN1993-1-1 §5.5).
- Το ύψος του διακένου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.6 του ύψους της δοκού.
- Το μήκος του διακένου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1.5 του ύψους της δοκού.
- Η καθαρή απόσταση μεταξύ των διακένων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.5 φορές το μήκος του μεγαλύτερου διακένου.
- Η διατμητική τάση στο καθαρό εμβαδόν διάτμησης του διακένου δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή

$$\frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M_0}}$$

- Οι γωνίες των ορθογωνικών διακένων πρέπει να καμπυλώνονται.
- Οι τάσεις στις άκρες των ορθογωνικών διακένων στην άνω και κάτω διατομή T από τοπική αξονική δύναμη πρέπει να ικανοποιεί την παράγραφο 6.2.10 του EN1993-1-1.
- Η απόσταση από κάθε σημείο του διακένου στο κοντινότερο συγκεντρωμένο φορτίο δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 0.5 του ύψους της δοκού.



Σχήμα 2-16: Βασικοί γεωμετρικοί παράμετροι δοκών με ορθογωνικά διάκενα κορμού

2.4 ΔΟΚΟΙ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Συχνά, δοκοί με διάκενα κορμού όπου τα διάκενα βρίσκονται σε περιοχή υψηλής διάτμησης και ροπής ή απαιτείται αύξηση της αντοχής των δοκών, ενισχύονται [9] με οριζόντιες ενισχύσεις ή με ενισχύσεις περιφερειακά του διακένου. Οριζόντιες ενισχύσεις από ορθογωνικά ελάσματα συγκολλούνται στην πάνω ή/και κάτω άκρη του διακένου, από τη μία ή και τις δύο πλευρές. Η επιρροή των ενισχύσεων στη μηχανική συμπεριφορά των δοκών είναι η αύξηση της τοπικής αντοχής σε ροπή Vierendeel και η αποφυγή τοπικού λυγισμού στον κορμό των διατομών T. Κατακόρυφες ενισχύσεις μπορεί να

χρειαστούν στη θέση συγκεντρωμένων φορτίων και στη σύνδεση με δευτερεύοντες δοκούς. Όταν χρησιμοποιούνται κατακόρυφες ενισχύσεις πρέπει να είναι πλήρους ύψους εκτός αν το μη ενισχυμένο τμήμα του κορμού δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό. Δακτυλιοειδείς ενισχύσεις συγκολλούνται γύρω από το εσωτερικό του κυκλικού διάκενου και έχουν την ικανότητα να αποτρέψουν τον λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού μεταξύ των διακένων (για κορμούς Κατηγορίας 3). Για την επιλογή του μεγέθους και της θέσης των οριζόντιων ενισχύσεων πρέπει να δίνεται σημασία στην εύκολη σύνδεση των ενισχύσεων με τον κορμό της δοκού (πρέπει να υπάρχει προσβασιμότητα για να πραγματοποιούνται οι συγκολλήσεις). Όταν το διάκενο βρίσκεται κοντά στην διατομή των πελμάτων συγκολλήσεις μερικής διείσδυσης από τη μία πλευρά της ενίσχυσης μπορεί να είναι η μόνη λύση.

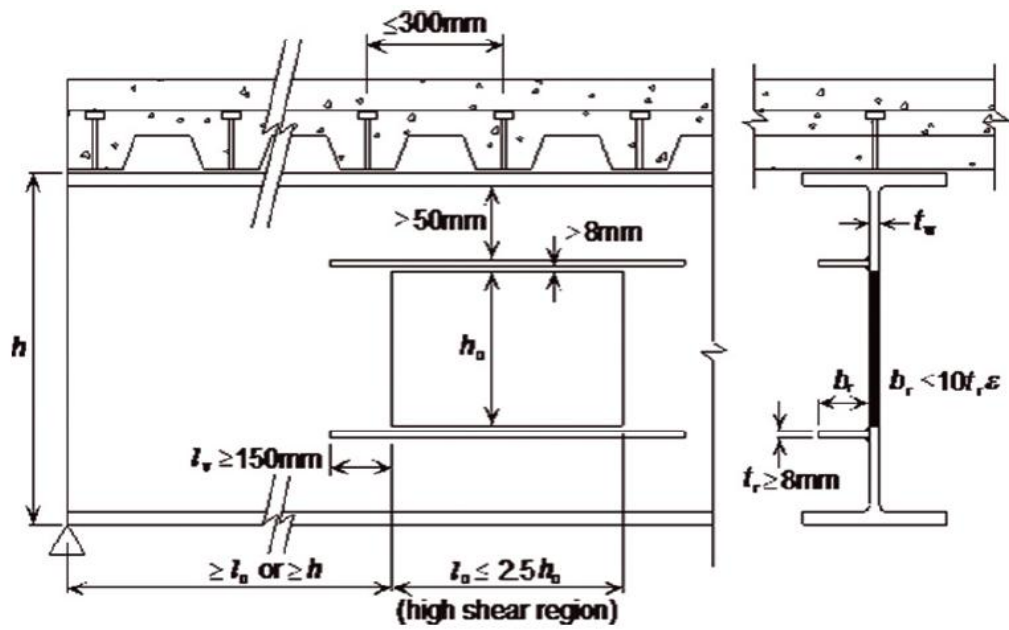
Η διατομή των ενισχύσεων πρέπει να κατατάσσεται τουλάχιστον σε διατομές κατηγορίας 3. Αν η δοκός σχεδιάζεται ως κατηγορία 1 ή 2, τότε κάθε προεξέχων τμήμα που δεν ικανοποιεί τα όρια για κατηγορία 2 πρέπει να θεωρείται ως μη κατάλληλο. Στην περιοχή του διάκενου, ο κορμός αντιμετωπίζεται σαν κατηγορίας 2 αν είναι ενισχυμένος. Όσον αφορά το μέγιστο μέγεθος της ενίσχυσης εξαρτάται από την ικανότητα του κορμού να αντισταθεί στις τοπικές δυνάμεις αγκύρωσης, οι οποίες μεταφέρονται από τη συγκόλληση μεταξύ της ενίσχυσης και του κορμού στο τέλος του διάκενου. Ένα κατάλληλο μήκος αγκύρωσης απαιτείται ώστε να αναπτυχθεί η αξονική αντοχή της ενίσχυσης. Ενισχύσεις συγκολλημένες από τη μία πλευρά του κορμού μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές από άποψη κατασκευής αλλά είναι απαραίτητο να βεβαιωθεί ότι ο κορμός είναι επαρκώς ικανός να μεταφέρει την κάμψη, η οποία δημιουργείται από τις έκκεντρες δυνάμεις που μεταφέρονται από τις ενισχύσεις στον κορμό.



Σχήμα 2-17: Οριζόντιες ενισχύσεις δοκών με ορθογωνικά διάκενα κορμού

Ύστερα από μελέτες έχουν προκύψει οι παρακάτω βασικοί κανόνες σχεδιασμού [9] για ενισχυμένα ορθογωνικά διάκενα:

- Η απόσταση μεταξύ των άκρων των διακένων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.5 φορές το μήκος του μεγαλύτερου διακένου.
- Η ενίσχυση του διακένου δεν πρέπει να αποτελεί προεξέχων τμήμα που θα υπερβαίνει το $10 \cdot t_r$, όπου t_r είναι το πάχος της ενίσχυσης.
- Η ελάχιστη προβολή των ενισχύσεων μετά το διάκενο πρέπει να είναι τουλάχιστον $20 \cdot t_r$, όπου t_r είναι το πάχος της ενίσχυσης.
- Η οριζόντια κεντρική γραμμή του διακένου πρέπει να βρίσκεται εντός $\frac{d}{10}$ από τη διαμήκη κεντρική γραμμή της δοκού, όπου d είναι το ύψος του κορμού της δοκού μεταξύ των πελμάτων.
- Η διατμητική τάση στην καθαρή διατμητική περιοχή του διακένου δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή $\frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{Mo}}$
- Οι τάσεις στην άκρη του διακένου στην άνω και κάτω διατομή T που αναπτύσσονται λόγω τοπικών αξονικών δυνάμεων, κάμψης Vierendeel και διατμητικών δυνάμεων πρέπει να ικανοποιούν την παράγραφο 6.2.10 του EN1993-1-1. Η κατακόρυφη τέμνουσα πρέπει να μοιράζεται ισοδύναμα στην άνω και κάτω διατομή T.
- Η απόσταση από κάθε σημείο του διακένου στο κοντινότερο συγκεντρωμένο φορτίο δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το ύψος της δοκού.
- Οι ενισχύσεις είναι προτιμότερο να συγκολληθούν με εξωραφές και από τις δύο πλευρές του κορμού. Το πάχος της εξωραφής πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του μισού του πάχους της ενίσχυσης.
- Το μήκος αγκύρωσης l_v της ενίσχυσης πέρα από το τέλος κάθε διακένου πρέπει γενικά να είναι τουλάχιστον 25% του μήκους του διακένου και οι συγκολλήσεις πρέπει να ελέγχονται για τη μεταφορά δυνάμεων σ' αυτό το μήκος.



Σχήμα 2-18: Συνιστώμενα όρια διαστάσεων για ενισχυμένα διάκενα κορμού σε περιοχές υψηλής τέμνουσας

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση που χρησιμοποιείται για τις δοκούς με διάκενα κορμού με βάση το προσχέδιο του μέρους 1-13 του Ευρωκώδικα 3 (Eurocode 3 Part 1-13) [10]. Στο μέρος 1-13 του Ευρωκώδικα 3 γίνεται αναλυτική αναφορά σε δοκούς με μεμονωμένα ή πολλαπλά διάκενα στον κορμό, πολυγωνικού ή κυκλικού σχήματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με δοκούς με πολλαπλά κυκλικά διάκενα κατά μήκος του κορμού τους. Για το λόγο αυτό θα γίνει παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο το προσχέδιο του Ευρωκώδικα 3 [10] προσομοιώνει και αντιμετωπίζει δοκούς με πολλαπλά διάκενα σε όλο το μήκος τους. Αρχικά, θα γίνει αναφορά στους ορισμούς που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των δοκών, θα παρουσιασθούν οι μορφές αστοχίας που πρέπει να ελεγχθούν και ο τρόπος υπολογισμού της αντοχής δοκών με κυκλικά και πολυγωνικά διάκενα. Τέλος, θα γίνει έλεγχος μίας δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σύμφωνα με το προσχέδιο του Ευρωκώδικα 3.

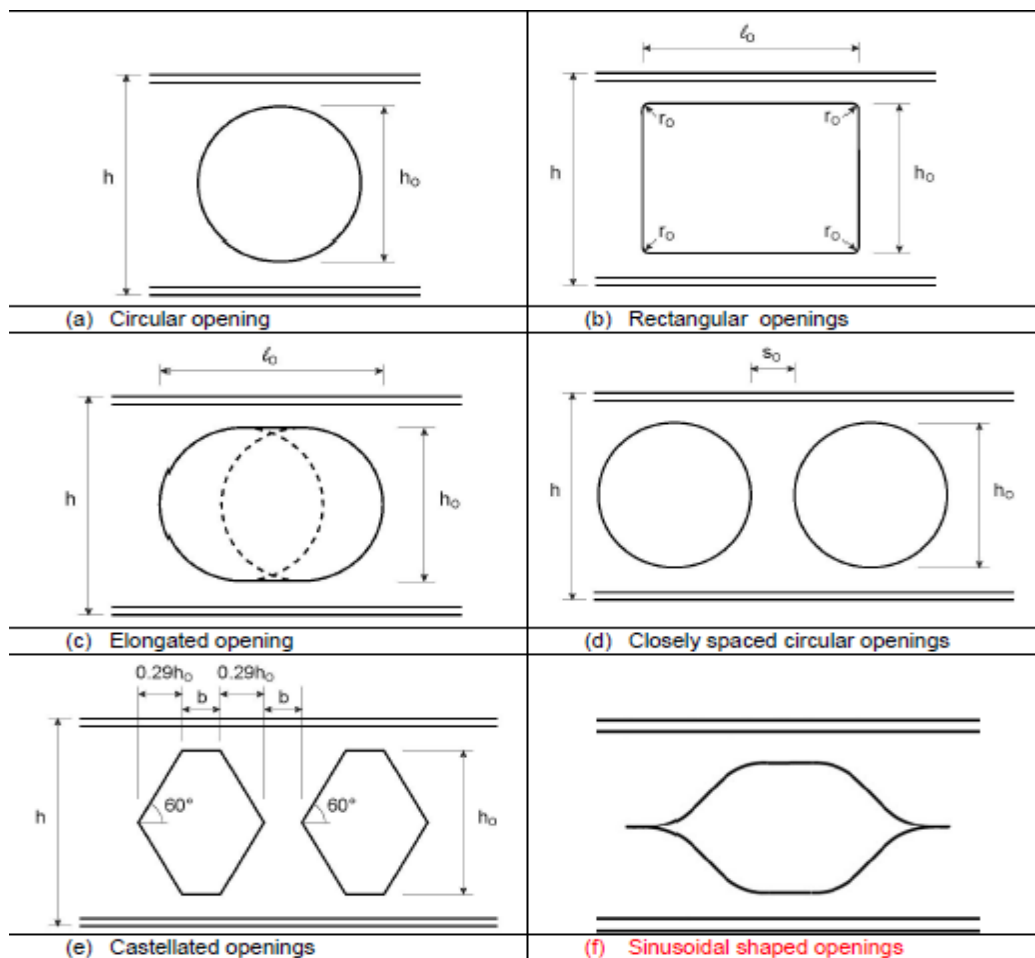
3.2 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

3.2.1 Πεδίο εφαρμογής του προσχεδίου

Το προσχέδιο του Μέρους 1-13 του Ευρωκώδικα 3 αναφέρονται στο παρακάτω πεδίο εφαρμογής:

- Το παράρτημα αυτό συμπεριλαμβάνει διατάξεις για την επέκταση της εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3 Μέρους 1-1 για ελατές και συγκολλητές διατομές με διάκενα κορμού χαλύβδινων δοκών.
- Οι κανονισμοί ισχύουν για ομοιόμορφα μέλη με I ή H διατομές, οι οποίες είναι συμμετρικές ως προς τον ασθενή άξονα. Δεν ισχύουν για μη πρισματικές ή καμπυλωμένες δοκούς, αν και οι ίδιες αρχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
- Οι κανονισμοί ισχύουν για χαλύβδινες δοκούς που υπόκεινται σε θετική και αρνητική ροπή κάμψης με μικρές θλιπτικές δυνάμεις που δεν υπερβαίνουν την τιμή ($N_{pl}/100$), όπου N_{pl} είναι η αντοχή θραύσης της χαλύβδινης διατομής.
- Έλεγχοι απαιτούνται τοπικά στα διάκενα και επίσης στην συνολική ευστάθεια του μέλους σύμφωνα με τον EN1993-1-1 [11] με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στις ιδιότητες της διατομής ώστε να ληφθούν υπόψη τα διάκενα.

- Οι κανονισμοί ισχύουν για διάκενα που είναι κυκλικά, ορθογωνικά, επιμήκη κυκλικά, εξαγωνικά και ημιτονοειδή στο σχήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1.
- Οι κανονισμοί, επίσης, ισχύουν για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού που κατασκευάζονται ύστερα από κόψιμο και επανασυγκόλληση δύο χαλύβδινων διατομών που μπορεί να έχουν διαφορετικές διαστάσεις.
- Η λυγηρότητα του κορμού (d/t) δεν πρέπει να ξεπερνά το $120 \cdot \epsilon$. Οι τοπικοί έλεγχοι γύρω και ανάμεσα στα διάκενα ισχύουν για λυγηρότητα κορμού μέχρι αυτό το όριο. Η αντοχή σε διατμητικό λυγισμό του κορμού απομακρυσμένου από το διάκενο πρέπει να ελέγχεται σύμφωνα με τον EN1993-1-1 [11].
- Χαλύβδινες δοκοί με διάκενα κορμού συχνά σχεδιάζονται ως σύμμικτες και γι' αυτό οι απαιτήσεις του EN1994-1-1 [12] πρέπει να ακολουθούνται και να λαμβάνονται υπόψη οι τοπικοί έλεγχοι γύρω από τα διάκενα του κορμού των σύμμικτων δοκών.



Σχήμα 3-1: Σχήματα διακένων σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13

3.2.2 Όροι και ορισμοί

Στους Κανονισμούς του προσχέδιου του EN1993-1-13 χρησιμοποιούνται οι παρακάτω όροι και ορισμοί:

- Διατομή T (Tee):
 - Χαλύβδινη διατομή T κορμού – πέλματος κάτω ή πάνω από το διάκενο

- Για δοκό με κυκλικά διάκενα, οι διατομές T μπορούν να διαμορφώνονται από ελατές διατομές και γι' αυτό να έχουν διαφορετικές αναλογίες.
- Κάμψη Vierendeel:
 - Η τοπική κάμψη των διατομών T που οφείλεται στη μεταφορά της διατμητικής δύναμης κατά μήκος των διακένων.
- Συμπαγές τμήμα του κορμού (web-post):
 - Το συμπαγές τμήμα του κορμού είναι η επιφάνεια του κορμού που παραμένει ανάμεσα σε δύο γειτονικά διάκενα.
 - Το συμπαγές τμήμα του κορμού μεταφέρει οριζόντια διατμητική δύναμη ανάμεσα στα διάκενα και απαιτείται να είναι ευσταθές υπό την επιρροή αυτής της δύναμης, ώστε να αποφευχθεί ο λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού.
 - Το τελευταίο συμπαγές τμήμα (web-post) είναι η επιφάνεια του κορμού ανάμεσα στη σύνδεση και το ακραίο διάκενο στο τέλος του ανοίγματος.

3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΜΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Τα διάκενα πρέπει να θεωρούνται μεμονωμένα ή αραιότερα κατανεμημένα όταν η απόσταση από άκρη σε άκρη ξεπερνά το h_0 για κυκλικά ή εξαγωνικά διάκενα και το l_0 για επιμήκη κυκλικά ή ορθογωνικά διάκενα. Όταν δεν ισχύουν οι παραπάνω γενικοί κανόνες, τα διάκενα πρέπει να θεωρούνται κατανεμημένα σε κοντινές αποστάσεις. Οι γεωμετρικοί κανονισμοί που παρουσιάζονται παρακάτω μπορούν να χρησιμοποιούνται ως γενικός οδηγός για το σχεδιασμό δοκών με διάκενα κορμού αλλά δεν πρέπει να αποκλείουν τους ελέγχους σχεδιασμού.

3.3.1 Κυκλικά διάκενα

$$h_0 \leq 0.75 \cdot h$$

Γενικός κανόνας

$$d_t \text{ και } d_b \geq r + 10 \text{ mm αλλά } \geq 30 \text{ mm}$$

Απαίτηση κατασκευής

Όπου r είναι η ακτίνα συναρμογής ή το $1.4 \times$ πάχος συγκόλλησης

$$s_0 \geq 0.1 \cdot h_0$$

Για χαλύβδινες δοκούς, αλλά το όριο είναι ευρύτερο για δοκούς που σχεδιάζονται ως σύμμικτες

3.3.2 Ορθογωνικά και επιμήκη κυκλικά διάκενα

$$h_0 \leq 0.75 \cdot h$$

Γενικός κανόνας

$$d_t \geq l_0 / 10$$

Αν το διάκενο είναι μη ενισχυμένο – για την πρόληψη της αστάθειας της άνω διατομής T

$$l_0 \leq 2.5 \cdot h_0$$

Για μη ενισχυμένα διάκενα – γενικός κανόνας

$$d_b / d_t \leq 1.25$$

Γενικός κανόνας για να αποφευχθούν υψηλές ροπές στο συμπαγές τμήμα του κορμού

$$d_b / d_t \geq 0.8$$

Γενικός κανόνας για να αποφευχθούν υψηλές ροπές στο συμπαγές τμήμα του κορμού

$$s_0 \geq 0.5 \cdot l_0$$

Γενικός κανόνας για να αποφευχθεί η αστάθεια στο συμπαγές τμήμα του κορμού

$$s_e \geq h \text{ και } \geq l_o$$

Γενικός κανόνας για να αποφευχθεί η αστάθεια στο τελευταίο συμπαγές τμήμα του κορμού

$$r_o \geq 2 \cdot t_w \text{ αλλά } r_o \geq 15 \text{ mm}$$

Κατασκευαστική απαίτηση

3.3.3 Εξαγωνικά διάκενα

$$h_o \leq 0.70 \cdot h$$

Γενικός κανόνας

$$s_o \geq 0.25 \cdot h_o$$

Γενικός κανόνας για να αποφευχθεί η αστάθεια στο συμπαγές τμήμα του κορμού

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

3.4.1 Ενεργό μήκος και ύψος διακένων

- Για την κάμψη Vierendeel και τον υπολογισμό του βέλους, το σχήμα του διάκενου μπορεί να προσομοιάζεται ως ένα ισοδύναμο ορθογώνιο για να προσδιοριστεί η αντοχή του προς την εφαρμοζόμενη δύναμη διάτμησης, η οποία γίνεται με την ανάπτυξη της τοπικής αντοχής σε κάμψη των διατομών κορμού – πέλματος γύρω από το διάκενο.
- Οι διαστάσεις του ισοδύναμου ορθογωνίου που χρησιμοποιούνται δίνονται στον Πίνακα 3-1.
- Για άλλα σχήματα διακένων είναι πρώτα απαραίτητο να οριστεί ένα ισοδύναμο ορθογώνιο με αναλυτικές μεθόδους. Τα συνηθισμένα σχήματα διακένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν φαίνονται στο Σχήμα 3-1.
- Μία εναλλακτική μέθοδος με βάση τις τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα ακτινικό επίπεδο γύρω από το κυκλικό διάκενο δίνεται στο Παράρτημα Α του προσχεδίου του EN1993-1-13. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από λογισμικό υπολογιστή και συνδέεται με ένα πιο σύνθετο μοντέλο για το λυγισμό των συμπαγών τμημάτων του κορμού.

Πίνακας 3-1: Ισοδύναμα μεγέθη διακένων για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη Vierendeel

Σχήμα διάκενου	Ενεργό μήκος, l_{eff}	Ενεργό ύψος, d_{eff}
Ορθογωνικό	l_o	h_o
Κυκλικό	$0.45 \cdot h_o$	$0.9 \cdot h_o$
Επιμήκες Κυκλικό	$l_o - 0.55 \cdot h_o$	$0.9 \cdot h_o$
Εξαγωνικό	$b \geq 0.25 \cdot h_o$	h_o
Ημιτονοειδές	Για $h_o \leq 2 \cdot l_s$: $l_{eff} = b + 2 \cdot l_s - 0.5 \cdot h_o$	h_o
Ημιτονοειδές	Για $h_o > 2 \cdot l_s$: $l_{eff} = b + l_s$	h_o

3.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

3.5.1 Κατηγοριοποίηση των διατομών T

- Η κατηγοριοποίηση των πελμάτων ή του πλήρη κορμού μπορεί να γίνει σύμφωνα με τον EN1993-1-1.
- Τα προεξέχοντα τμήματα του κορμού της άνω διατομής T μπορούν να κατηγοριοποιούνται, ανάλογα με την αναλογία του ενεργού μήκους της διατομής T στο διάκενο, l_t , προς το προεξέχων ύψος d_t , όπως παρακάτω:

$$\text{Κορμοί κατηγορίας 2: } d_t \leq \frac{10 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{l_t}\right)^2}}, \text{ αν } l_t > 32 \cdot \varepsilon \cdot t_w \quad (3-1)$$

Όλοι οι κορμοί κατηγορίας 3 μπορούν να θεωρούνται κατηγορίας 2 αν $l_t \leq 32 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ (3-2)

$$\text{Κορμοί κατηγορίας 3: } d_t \leq \frac{14 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{36 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{l_t}\right)^2}}, \text{ αν } l_t > 36 \cdot \varepsilon \cdot t_w \quad (3-3)$$

Όλοι οι κορμοί κατηγορίας 4 μπορούν να θεωρούνται κατηγορίας 3 αν $l_t \leq 36 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ (3-4)

Για κορμούς κατηγορίας 4 οι ιδιότητες της ενεργού διατομής μπορούν να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την οριακή τιμή του d_t για κορμούς κατηγορίας 3.

- Το ενεργό μήκος l_t της διατομής T σε ένα διάκενο μπορεί να υπολογίζεται όπως στον Πίνακα 3-2 για την ευστάθεια του κορμού πάνω και κάτω από το διάκενο:

Πίνακας 3-2: Ενεργό μήκος l_t

$l_t = l_0$	Ορθογωνικά διάκενα
$l_t = 0.7 \cdot h_0$	Κυκλικά διάκενα
$l_t = l_0 - 0.3 \cdot h_0$	Επιμήκη κυκλικά διάκενα
$l_t = 0.5 \cdot l_0$	Εξαγωνικά διάκενα
$l_t = b + 0.5 \cdot l_s$	Ημιτονοειδή διάκενα

- Η εφελκυστική δύναμη στην κάτω διατομή T τροποποιεί την κατηγοριοποίηση της διατομής
 - Κορμοί των κάτω διατομών T μπορούν να θεωρούνται κατηγορίας 2 αν:

$$\left(\frac{N_{Ed}(x)}{A_{a,b} \cdot f_{yd}} \right) \geq 1 - \frac{20 \cdot \varepsilon \cdot t_w^2}{A_{a,b}} \quad (3-5)$$

Όπου,

$N_{Ed}(x)$ είναι η αξονική δύναμη στην κάτω διατομή T στη θέση x του ανοίγματος. Για ένα συγκεκριμένο διάκενο, η θέση (x) πρέπει να επιλέγεται για το δυσμενέστερο συνδυασμό N (από την ανάλυση της καθολικής κάμψης σε ένα ζεύγος αξονικών δυνάμεων N) και M (από την κάμψη Vierendeel) (στο ένα άκρο του διακένου). Η κατηγοριοποίηση πρέπει να πραγματοποιείται για κάθε διάκενο.

$A_{a,b}$ είναι το εμβαδόν της κάτω διατομής T.

- Όλοι οι κορμοί κατηγορίας 4 μπορούν να θεωρούνται κατηγορίας 3 αν:

$$d_b \leq \frac{14 \cdot \varepsilon' \cdot t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{36 \cdot \varepsilon' \cdot t_w}{l_t} \right)^2}}, \text{ αν } l_t > 36 \cdot \varepsilon' \cdot t_w \quad (3-6)$$

Όπου,

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \left(\frac{N_{Ed}(x)}{A_{a,b} \cdot f_{yd}} \right)^2}} \quad (3-7)$$

3.6 ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ΟΚΑ)

3.6.1 Κανόνες σχεδιασμού για μεμονωμένα διάκενα κορμών

3.6.1.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός συμπαγών δοκών πρέπει να επαληθεύεται σύμφωνα με τον EN1993-1-1, και πρόσθετες επαληθεύσεις, πρέπει να πραγματοποιούνται σε κάθε διάκενο κορμού της δοκού στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας στην περιοχή που έχει επηρεαστεί από το διάκενο για:

- Αντοχή σε κάμψη.
- Αντοχή σε διάτμηση.
- Αντοχή σε κάμψη Vierendeel (από τη μεταφορά της διατμητικής δύναμης σε τοπική κάμψη των διατομών T).
- Αντοχή σε διατμητικό λυγισμό στην περίπτωση μεμονωμένων διακένων.
- Αντοχή των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε περίπτωση διακένων κατανεμημένων σε κοντινές αποστάσεις.

Η αυξημένη ευκαμψία λόγω του διακένου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), παρ' ότι απλοποιημένοι κανόνες είναι κατάλληλοι εφόσον το πρόσθετο βέλος που αναπτύσσεται λόγω της δημιουργίας των μεμονωμένων διακένων είναι σχετικά μικρό.

3.6.1.2 Αντοχή σε διάτμηση δοκών με διάκενα κορμού

Η αντοχή σε διάτμηση της δοκού με διάκενα κορμού δίνεται από τη σχέση:

$$V_{o,pl,Rd} = \left[V_{pl,Rd} - \frac{h_o \cdot t_w \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} \right] \quad (3-8)$$

Όπου,

$V_{pl,Rd}$ Είναι η πλαστική διατμητική αντοχή της συμπαγούς διατομής σύμφωνα με τον EN1993-1-1 §6.2.6

h_o Είναι το ύψος του διακένου

t_w Είναι το πάχος του κορμού

Το ενεργό πάχος του κορμού των διατομών T μειώνεται λόγω της παρουσίας υψηλής κατακόρυφης διάτμησης σύμφωνα με τον EN1993-1-1 §6.2.8 (4) και δίνεται από τις σχέσεις:

$$t_{w,eff} = t_w \cdot \left[1 - (2 \cdot \rho - 1)^2 \right], \quad \text{για } \rho > 0.5 \quad (3-9)$$

$$t_{w,eff} = t_w, \quad \text{για } \rho \leq 0.5 \quad (3-10)$$

Όπου,

$t_{w,eff}$ Είναι το ενεργό πάχος του κορμού

t_w Είναι το πραγματικό πάχος του κορμού

$$\rho \quad \text{Είναι η αξιοποίηση της διάτμησης, } \rho = \frac{V_{Ed}}{V_{o,pl,Rd}} \quad (3-11)$$

Το παραπάνω ενεργό πάχος του κορμού των διατομών T πρέπει να χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της απομειωμένης διατομής των διατομών T για καθολική κάμψη και κάμψη Vierendeel.

3.6.1.3 Αντοχή σε ροπή κάμψης δοκού με διάκενα κορμού υπό την παρουσία διάτμησης

Η αντοχή σε κάμψη της χαλύβδινης διατομής στη θέση του διάκενου πρέπει να βασίζεται στην πλαστική αντοχή σε κάμψη των διατομών T για διατομές κατηγορίας 1 ή 2, ή στην ελαστική αντοχή σε κάμψη των διάτρητων διατομών για διατομές κατηγορίας 3 ή 4, όπως ορίστηκαν στην Παράγραφο 3.5.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η ενεργητικότητα του κορμού πρέπει να προσδιορίζεται όπως στην Παράγραφο 3.5.2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας και το $t_{w,eff}$ πρέπει να χρησιμοποιείται για να υπολογίζονται οι ιδιότητες των διατομών T για την καθολική κάμψη.

3.6.1.4 Αντοχή των διατομών T σε κάμψη Vierendeel

– Ο υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη Vierendeel βασίζεται σε ένα ισοδύναμο ορθογώνιο διάκενο όπως παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.4.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μία εναλλακτική μέθοδος παρουσιάζεται στο Παράρτημα A του προσχεδίου του EN1993-1-13 και βασίζεται στις τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα ακτινικό επίπεδο γύρω από τα κυκλικά διάκενα. Η ροπή Vierendeel λόγω της μεταφοράς της διατμητικής δύναμης κατά μήκος των διακένων $M_{V,Ed}$, πρέπει να είναι μικρότερη από τον συνδυασμό της αντοχής σε κάμψη Vierendeel των διατομών T, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$V_{Ed} \leq \frac{(2 \cdot M_{NV,b,Rd} + 2 \cdot M_{NV,t,Rd})}{l_e} \quad (3-12)$$

- Η πλαστική αντοχή σε κάμψη των διατομών T, $M_{pl,T}$, μπορεί να χρησιμοποιείται για διατομές κατηγορίας 2.
- Η ελαστική αντοχή σε κάμψη των διατομών T, $M_{el,T}$, μπορεί να χρησιμοποιείται για διατομές κατηγορίας 3.
- Η αντοχή σε κάμψη των διατομών T πρέπει να μειώνεται λόγω της παρουσίας αξονικής εφελκυστικής ή θλιπτικής δύναμης, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

- Πλαστική αντοχή (διατομές Κατηγορίας 1 και 2)

$$M_{N,pl,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right\} \quad (3-13)$$

- Ελαστική αντοχή (διατομές Κατηγορίας 3 και 4)

$$M_{N,el,Rd} = M_{el,Rd} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{el,Rd}} \right) \right\} \quad (3-14)$$

Όπου,

$M_{N,pl,Rd}$	Είναι η απομειωμένη πλαστική αντοχή της διατομής T
$M_{N,el,Rd}$	Είναι η απομειωμένη ελαστική αντοχή της διατομής T, όπου το ύψος του κορμού θεωρείται το μικρότερο από το πραγματικό ύψος και το όριο για κορμό κατηγορίας 3
$N_{pl,Rd}$	Είναι η πλαστική αντοχή της διατομής T, όπου το ύψος του κορμού θεωρείται το μικρότερο από το πραγματικό ύψος και το όριο για κορμό κατηγορίας 2
$N_{el,Rd}$	Είναι η ελαστική αντοχή της διατομής T, όπου το ύψος του κορμού θεωρείται το μικρότερο από το πραγματικό ύψος και το όριο για κορμό κατηγορίας 3
N_{Ed}	Είναι η αξονική θλιπτική ή εφελκυστική δύναμη λόγω της καθολικής ροπής κάμψης που ασκείται στην χαμηλότερη κάτω πλευρά του διακένου

3.6.1.5 Διατμητικός λυγισμός κορμού δίπλα από ένα μεμονωμένο διάκενο

- Όταν η λυγηρότητα του κορμού προσαρμόζεται στις συνθήκες που δίνονται στην παράγραφο 6.2.6 σχέση (6) του EN1993-1-1, η αντοχή του κορμού με ένα μεμονωμένο διάκενο πρέπει να ελέγχεται. Ο έλεγχος της αντοχής πραγματοποιείται με τη μέθοδο που παρουσιάζεται παρακάτω.
- Ο λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού δεν χρειάζεται να ελεγχθεί αν:

$$\frac{h_o}{t_w} \leq 25 \cdot \varepsilon \quad \text{Για κυκλικά και επιμήκη διάκενα}$$

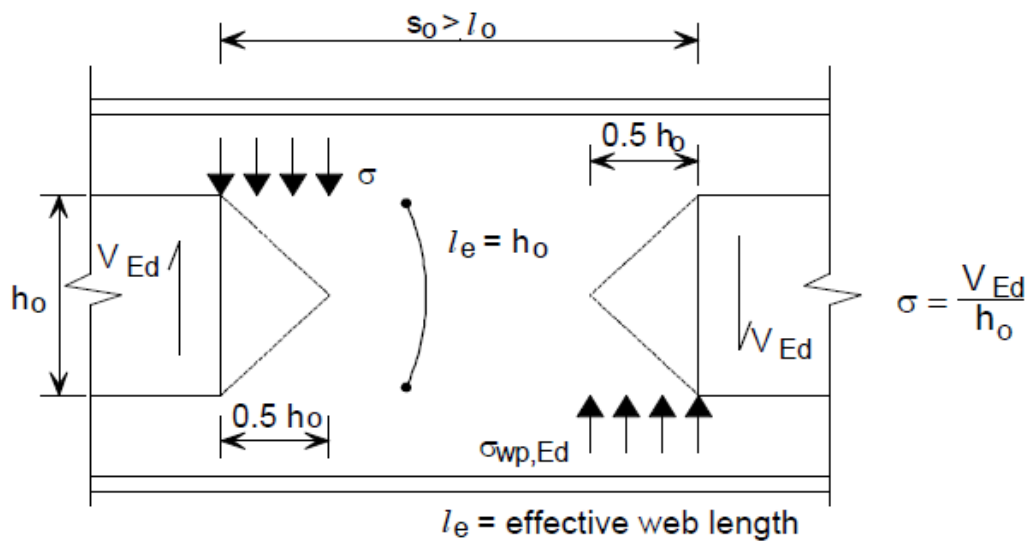
$$\frac{h_o}{t_w} \leq 20 \cdot \varepsilon \quad \text{Για ορθογωνικά και εξαγωνικά διάκενα}$$

- Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ευστάθειας του κορμού δίπλα από ένα μεμονωμένο διάκενο βασίζεται σε μία διαγώνια αναλογία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3. Το ενεργό πλάτος του συμπαγούς τμήματος του κορμού για τον έλεγχο λυγισμού δίνεται από τη σχέση:

$$b_{w,eff} = 0.5 \cdot h_o \quad (3-15)$$

- Η θλιπτική τάση που ενεργεί στον κορμό δίπλα στο διάκενο προκαλείται από τη μέγιστη διατμητική δύναμη στην άνω ή κάτω διατομή T, η οποία είναι $0.5 \cdot V_{Ed}$ για μία συμμετρική διατομή, που ενεργεί πάνω από το ενεργό πλάτος, $b_{w,eff}$, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{w,Ed} = \frac{V_{Ed}}{h_o \cdot t_w} \quad (3-16)$$



Σχήμα 3-3: Δυνάμεις στο συμπαγές τμήμα του κορμού δίπλα από μεμονωμένα ορθογωνικά διάκενα

- Η θλιπτική τάση αντοχής, $\sigma_{b,w,Rd}$, ισούται με $\frac{\chi_{wp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$, όπου το χ_{wp} υπολογίζεται βάσει της ανηγμένης λυγρότητας του κορμού:

- Για κυκλικά, εξαγωνικά και επιμήκη κυκλικά διάκενα:

$$\bar{\lambda} = \frac{2.4 \cdot h_o}{t_w} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (3-17)$$

- Για ορθογωνικά διάκενα:

$$\bar{\lambda} = \frac{3.5 \cdot h_o}{t_w} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (3-18)$$

Όπου,

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 \cdot \varepsilon \quad (3-19)$$

- Θλιπτική τάση αντοχής $\sigma_{b,w,Rd}$ καθορίζεται από:

- Την καμπύλη b του EN1993-1-1 για ελατές διατομές
- Την καμπύλη c του EN1993-1-1 για συγκολλητές διατομές

- Διατμητικός λυγισμός του κορμού δεν συμβαίνει δίπλα στο διάκενο αν ισχύει η σχέση:

$$\sigma_{w,Ed} \leq \sigma_{b,w,Rd} \quad (3-20)$$

- Για διάκενα με διαμήκη ενισχύσεις, το ενεργό πλάτος του συμπαγούς τμήματος του κορμού που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σε λυγισμό μπορεί να αυξηθεί λαμβάνοντας υπόψη την προβολή της ενίσχυσης, l_v , που ξεπερνά το διάκενο:

$$b_{w,eff} = 0.5 \cdot h_o + l_v \leq 0.75 \cdot h_o \quad (3-21)$$

- Όταν πρόσθετα φορτία δρουν δίπλα στα διάκενα, η επιρροή αυτών των φορτίων δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό της δοκού στη θέση του διάκενου αν τα φορτία δρουν στις παρακάτω ελάχιστες αποστάσεις από την άκρη του διάκενου:

$0.5 \cdot h_o$ Για κυκλικά ή εξαγωνικά διάκενα

$\min\{0.5 \cdot l_{eff}; 0.5h\}$ Για ορθογωνικά ή επιμήκη διάκενα

- Για κορμούς με μεγάλη λυγηρότητα, ισχύουν οι ίδιοι τοπικοί έλεγχοι, επιπρόσθετα με τον έλεγχο για διατμητικό λυγισμό του συμπαγούς κορμού.
- Μία απλή προσέγγιση για δοκούς με λυγηρούς κορμούς είναι ότι δεν χρειάζονται επιπλέον έλεγχοι γύρω από το διάκενο αν η αντοχή σε διατμητικό λυγισμό του κορμού μειώνεται λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των μεμονωμένων διακένων σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{bw,o,Rd} = 0.9 \cdot V_{bw,Rd} \cdot \left\{ 1 - \sqrt{\frac{h_o \cdot l_o}{h_w}} \right\} \quad (3-22)$$

Όπου,

$V_{bw,Rd}$ Είναι η αντοχή σε διατμητικό λυγισμό του συμπαγούς κορμού σύμφωνα με τον EN1993-1-5, §5.2

Για κυκλικά διάκενα $l_o = 0.7 \cdot h_o$

- Όταν η άκρη του διάκενου απέχει τουλάχιστον h_w από το τέλος της δοκού, η αντοχή σε διατμητικό λυγισμό $V_{bw,Rd}$ στη σχέση (3-22) της $V_{bw,o,Rd}$ πρέπει να λαμβάνεται για ένα άκαμπτο ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού ανεξάρτητο από το πραγματικό ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού.

3.6.2 Κανόνες σχεδιασμού για διάκενα κορμού κατανεμημένα σε κοντινές αποστάσεις

3.6.2.1 Γενικά

Οι κανόνες που παρουσιάζονται είναι συμπληρωματικοί των κανόνων της Παραγράφου 3.6.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας για μεμονωμένα διάκενα κορμού δοκών. Τα διάκενα θεωρούνται ότι κατανέμονται σε κοντινές αποστάσεις όταν η απόσταση από άκρη σε άκρη είναι μικρότερη από:

$s_o < h_o$ Για κυκλικά ή εξαγωνικά διάκενα

$s_o < l_{o,eff}$ Για ορθογωνικά ή επιμήκη διάκενα

Τα διάκενα, γενικά, χαρακτηρίζονται ως κατανεμημένα σε κοντινές αποστάσεις στην περίπτωση των δοκών με κυκλικά διάκενα (κυψελωτές δοκοί/cellular beams), δοκών με εξαγωνικά διάκενα (castellated beams) και δοκών με ημιτονοειδή διάκενα (sinusoidal beams). Οι δυνάμεις που ενεργούν στο συμπαγές τμήμα του κορμού ανάμεσα σε διάκενα κοντινών αποστάσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-4. Όταν η εκκεντρότητα της θέσης του διάκενου, e_o , είναι μεγάλη, μία ροπή $M_{wp,Ed}$ μπορεί να ενεργεί στην κεντρική γραμμή του συμπαγούς τμήματος του κορμού προκειμένου να διατηρηθεί ισορροπία μεταξύ των διατμητικών δυνάμεων στα ψηλότερα και χαμηλότερα μέρη της διατομής. Οι επιπρόσθετοι κανόνες που παρουσιάζονται αφορούν ελέγχους για τον λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού, οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι η ροπή που αναπτύσσεται στο συμπαγές τμήμα του κορμού μπορεί να αγνοηθεί. Οι διατμητικές δυνάμεις πρέπει να κατανέμονται μεταξύ των διατομών T , σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{b,Ed} = V_{t,Ed} + V_{wp,Ed} \cdot \frac{e_o}{s} \quad \text{Για } e_o > 0 \quad (3-23)$$

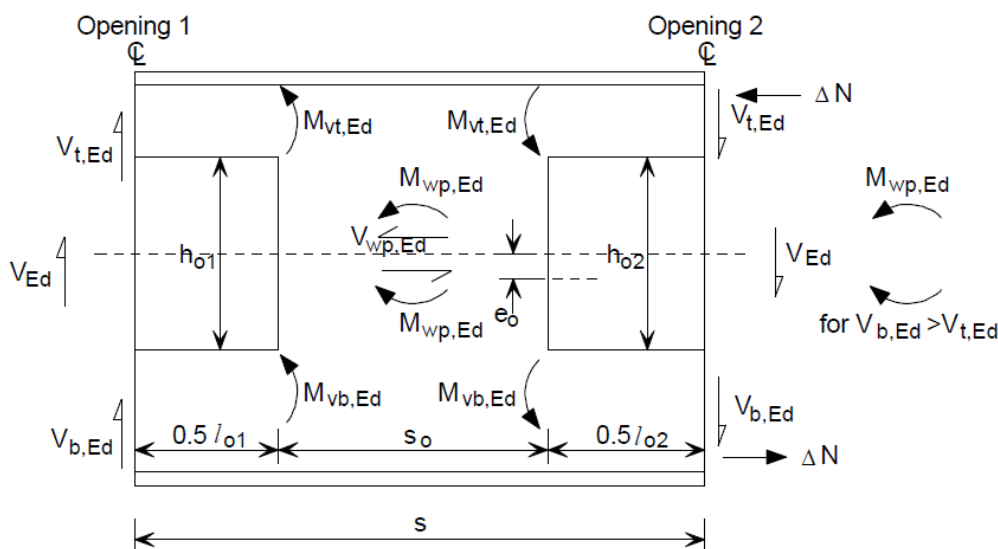
$$V_{t,Ed} = V_{b,Ed} + V_{wp,Ed} \cdot \frac{e_o}{s} \quad \text{Για } e_o < 0 \quad (3-24)$$

Όπου,

$V_{t,Ed}$ Είναι η διατμητική δύναμη στην άνω διατομή T

$V_{b,Ed}$ Είναι η διατμητική δύναμη στην κάτω διατομή T

$V_{wp,Ed}$ Είναι η οριζόντια διατμητική δύναμη στο συμπαγές τμήμα του κορμού για την κατακόρυφη διατμητική δύναμη V_{Ed}



Σχήμα 3-4: Δυνάμεις μεταξύ ορθογωνικών διακένων

3.6.2.2 Αντοχή σε διάτμηση και λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού

- Ένα γενικό μοντέλο δίνεται για κάθε σχήμα διάκενου και βασίζεται στην διαγώνια αναλογία που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-5. Στο Παράρτημα A του προσχεδίου του EN1993-1-13 παρουσιάζεται μια εναλλακτική μέθοδος που αναφέρεται συγκεκριμένα στις δοκούς με κυκλικά διάκενα (Cellular beams).
- Η θλιπτική τάση που ενεργεί στο συμπαγές τμήμα του κορμού ισούται με την οριζόντια διατμητική τάση που ενεργεί στο συμπαγές τμήμα του κορμού και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed}}{s_o \cdot t_w} < 0.577 \cdot f_y \quad (3-25)$$

Όπου,

s_o Είναι το πλάτος του συμπαγούς τμήματος του κορμού

- Η θλιπτική τάση αντοχής, $\sigma_{b,wp,Rd}$, είναι ίση με $\frac{\chi_{wp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$, όπου ο μειωτικός συντελεστής χ_{wp} προσδιορίζεται από την ανηγμένη λυγρότητα του κορμού:

- Για κυκλικά και επιμήκη κυκλικά διάκενα:

$$\frac{\pi}{\lambda} = \frac{1.75 \cdot \sqrt{s_{o,eff}^2 + h_o^2}}{t_w} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (3-26)$$

- Για ορθογωνικά διάκενα:

$$\frac{\pi}{\lambda} = \frac{2.5 \cdot \sqrt{s_{o,eff}^2 + h_o^2}}{t_w} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (3-27)$$

Όπου,

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 \cdot \varepsilon$$

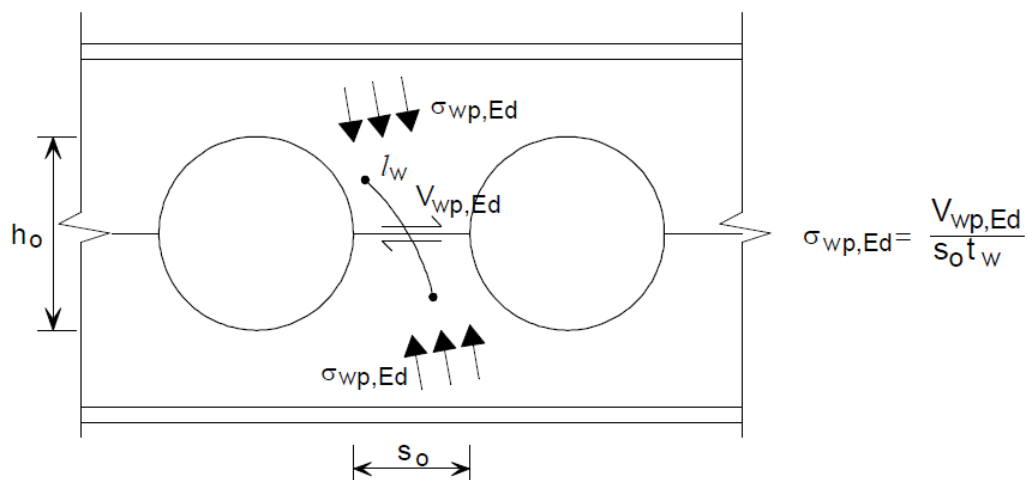
$s_{o,eff}$ Είναι το ενεργό μήκος του συμπαγούς τμήματος του κορμού και ισούται με s_o εκτός:

$s_{o,eff} = h_o$ Για επιμήκη διάκενα όταν $s_o \geq h_o$

$s_{o,eff} = 2 \cdot h_o$ Για ορθογωνικά διάκενα όταν $s_o \geq 2 \cdot h_o$

- Όταν μία δοκός με πολλαπλά κυκλικά διάκενα κορμού κατασκευάζεται από 2 διαφορετικές διατομές, το ενεργό πάχος του κορμού για τον υπολογισμό της λυγηρότητας του κορμού στις σχέσεις (3-26) και (3-27) λαμβάνεται ως ο μέσος όρος του πάχους του κορμού πάνω και κάτω από την αξονική γραμμή του διάκενου. Το ελάχιστο πάχος του κορμού χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θλιπτικής τάσης του συμπαγούς τμήματος του κορμού στη σχέση (3-25).
- Η θλιπτική τάση αντοχής $\sigma_{b,wp,Rd}$ προσδιορίζεται από:
 - Την καμπύλη λυγισμού b σύμφωνα με τον EN1993-1-1 για ελατές διατομές
 - Την καμπύλη λυγισμού c σύμφωνα με τον EN1993-1-1 για συγκολλητές διατομές
- Λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού δεν συμβαίνει αν ισχύει η σχέση:

$$\sigma_{w,Ed} \leq \sigma_{b,w,Rd} \quad (3-28)$$



Σχήμα 3-5: Ανάλυση τάσεων και δυνάμεων σύμφωνα με τη διαγώνια αναλογία για το λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού ανάμεσα σε κυκλικά διάκενα

- Για γειτονικά διάκενα με οριζόντιες ενισχύσεις, το ενεργό πλάτος $s_{o,eff}$ του συμπαγούς τμήματος του κορμού για τον υπολογισμό της ανηγμένης λυγηρότητας στις σχέσεις (3-26) και (3-27) είναι δυνατόν να τροποποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη την προβολή της ενίσχυσης, l_v , που ξεπερνά τα διάκενα:

$$s_{o,eff} = s_o - l_v \geq 0.5 \cdot s_o \quad (3-29)$$

3.6.2.3 Αντοχή σε διάτμηση και λυγισμό των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού

- Στο ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού δίπλα στη σύνδεση πρέπει να γίνεται έλεγχος ισορροπίας των δυνάμεων που ενεργούν σ' αυτό. Όταν υπάρχει εγκοπή ή τομή στο τέλος της δοκού, τα τοπικά φαινόμενα που αναπτύσσονται δίπλα στην εγκοπή πρέπει να ελέγχονται.
- Για την ευστάθεια του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού δίπλα στη σύνδεση, η λυγηρότητα του τμήματος αυτού μπορεί να σύμφωνα με τις σχέσεις (3-26) και (3-27), στις οποίες:

$$s_{o,eff} = 0.7 \cdot s_e \quad \text{Για ελάσματα πλήρους ύψους συγκολλημένα στο ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού}$$

$$s_{o,eff} = s_e \quad \text{Για απλή κοχλιωτή σύνδεση}$$

Για ελάσματα πλήρους ύψους συγκολλημένα στο ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού, η διατμητική τάση που ενεργεί στο τμήμα αυτό μπορεί να υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed}}{\{(s_e + 2 \cdot t_p) \cdot t_w\}} < 0.577 \cdot f_y \quad (3-30)$$

Για άλλες περιπτώσεις:

$$\sigma_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed}}{s_e \cdot t_w} < 0.577 \cdot f_y \quad (3-31)$$

Όπου,

t_p Είναι το πάχος του ελάσματος

3.6.2.4 Αντοχή σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

- Η ροπή αντοχής σχεδιασμού σε λυγισμό μίας πλευρικά μη εξασφαλισμένης δοκού με διάκενα κορμού συνήθη σχήματος που υπόκειται σε κάμψη στον ισχυρό άξονα πρέπει να υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3-32)$$

- Το W_y αναφέρεται είτε στο $W_{pl,y}$, $W_{el,y}$ ή $W_{eff,y}$ και εξαρτάται από την κατηγορία της διατομής για κάμψη στον ισχυρό άξονα, σύμφωνα με την Παράγραφο 3.5.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και πρέπει να υπολογίζεται με βάση τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της ασθενέστερης διατομής (δηλαδή αυτής στο κέντρο ενός διάκενου).
- Το χ_{LT} πρέπει να υπολογίζεται ακολουθώντας τη διαδικασία της παραγράφου 6.3.2.3 του EN1993-1-1. Για τον προσδιορισμό της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_{LT}$ πρέπει να γίνεται χρήση των γεωμετρικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών της ασθενέστερης διατομής και οι τιμές του συντελεστή ατελειών α_{LT} που θα χρησιμοποιούνται είναι:

- $a_{LT} = 0.49$ Για διπλής συμμετρίας ελατές διατομές (καμπύλη λυγισμού c)
- $a_{LT} = 0.76$ Για συγκολλητές, απλής συμμετρίας ελατές διατομές ή όταν οι διατομές T έχουν διαφορετικής ποιότητα χάλυβα (καμπύλη λυγισμού d)

Οι τιμές για το $\overline{\lambda_{LT,o}}$ και το β μπορούν να λαμβάνονται ως εξής:

$$\overline{\lambda_{LT,o}} = 0.2$$

$$\beta = 1.0$$

- Η ευστάθεια και των δύο πελμάτων μίας συνεχούς δοκού πρέπει να ελέγχεται ανάλογα με την κατανομή της ροπής και τη θέση της πλευρικής εξασφάλισης.

3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΟΚΛ)

- Η ύπαρξη των διακένων οδηγεί σε ένα πρόσθετο βέλος κάμψης και διάτμησης το οποίο πρέπει να υπολογίζεται σύμφωνα με μία κατάλληλη μέθοδο που θα βασίζεται στις αρχές της ελαστικής θεωρίας. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν προσεγγίσεις που είναι κατάλληλες για συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως δοκοί με κυκλικά (Cellular beams) ή εξαγωνικά (Castellated beams) πολλαπλά διάκενα.
- Το πρόσθετο βέλος στο μέσο του ανοίγματος της διάτρητης χαλύβδινης με διάκενα κορμού δοκού λόγω της παρουσίας ενός διάκενου στη θέση x από την κοντινότερη στήριξη μπορεί να υπολογίζεται προσεγγιστικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{w_{add}}{w_b} = k_o \cdot \left(\frac{l_{eff}}{L} \right) \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right) \quad \text{Για } x \leq 0.5 \cdot L \quad (3-33)$$

Όπου,

w_{add} Είναι το πρόσθετο βέλος στο μέσο του ανοίγματος της διάτρητης χαλύβδινης δοκού για κάθε διάκενο

w_b Είναι το βέλος καθαρής κάμψης της συμπαγούς χαλύβδινης δοκού

l_{eff} Είναι το ενεργό μήκος του διάκενου που λαμβάνεται από τον Πίνακα 3-1

L Είναι το μήκος της δοκού

k_o Είναι ένας συντελεστής που λαμβάνεται

$k_o = 0.7$ Για ενισχυμένα διάκενα

$k_o = 1.0$ Για μη ενισχυμένα διάκενα

- Για μία χαλύβδινη δοκό με πολλαπλά κυκλικά διάκενα κορμού που καταπονείται από ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο, το πρόσθετο βέλος στο μέσο του ανοίγματος μπορεί να υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\frac{w_{add}}{w_b} = 0.25 \cdot n_o \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right)^3 \cdot \left(\frac{h}{L} \right) \quad (3-34)$$

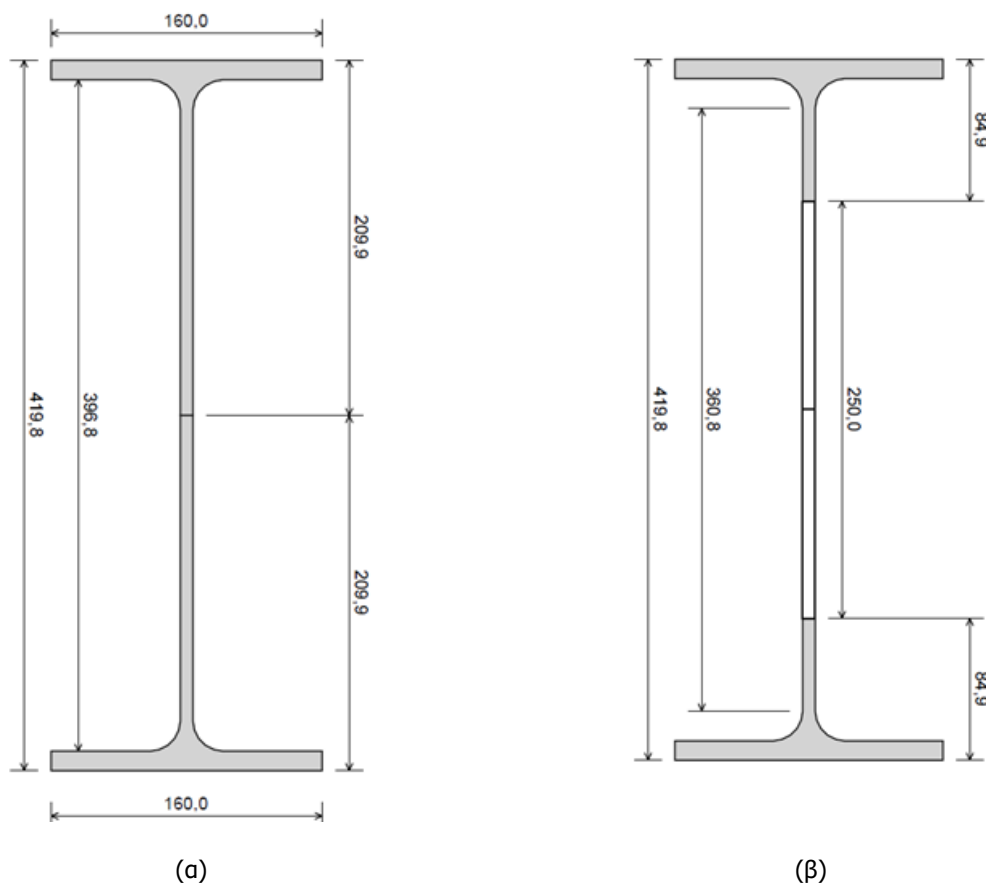
Όπου,

n_o Είναι ο αριθμός των διακένων κορμού στο άνοιγμα

- Κανονικά δεν είναι απαραίτητο να υπολογίζονται οι τάσεις στα διάκενα στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, με εξαίρεση τις περιπτώσεις δυναμικών φορτίων που πιθανώς μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία από κόπωση.

3.8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ EN1993-1-13

Η δοκός που μελετάται είναι αμφιέριστη και πλευρικά εξασφαλισμένη στη συναρμογή κορμού και με το άνω και κάτω πέλμα σε όλο της το μήκος, με μήκος ανοίγματος $L = 10$ m. Η δοκός έχει πολλαπλά κυκλικά διάκενα κορμού και η διατομή της αποτελείται από δύο διατομές IPE330 συνολικού ύψους $h = 419.80$ mm, πάχος κορμού $t_w = 7.5$ mm και πάχος πελμάτων $t_f = 11.5$ mm. Ο σχεδιασμός της διατομής της δοκού πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού προγράμματος ACB+ (ArcelorMittal Castellated Beams with circular openings). Σκοπός του προγράμματος είναι να διευκολύνει το σχεδιασμό δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού (Cellular Beams) σύμφωνα με τους κανονισμούς του EN1993-1-3 του Παραρτήματος N, το οποίο έχει αφαιρεθεί πλέον από τον Ευρωκώδικα. Το πρόγραμμα ACB+ σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από την CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Metallique – France). Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για το σχεδιασμό της δοκού και όχι για τον έλεγχο της. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συμπαγούς διατομής φαίνονται στο Σχήμα 3-6 (α) και της διατομής στη θέση του διάκενου στο Σχήμα 3-6 (β). Η δοκός έχει 26 κυκλικά διάκενα ομοιόμορφα κατανομημένα στον κορμό της, σε απόσταση $s_o = 125$ mm. Ο χάλυβας της δοκού είναι ποιότητας S355 με ελαστικό-πλαστικό, γραμμικώς κρατυνόμενο νόμο υλικού και τα χαρακτηριστικά του παρατίθενται στον Πίνακα 3-3. Ο έλεγχος της δοκού έγινε με τη βοήθεια φύλλου excel το οποίο παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 3-6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (α) Συμπαγούς δοκού (β) στη θέση του διάκενου

Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά χάλυβα S355

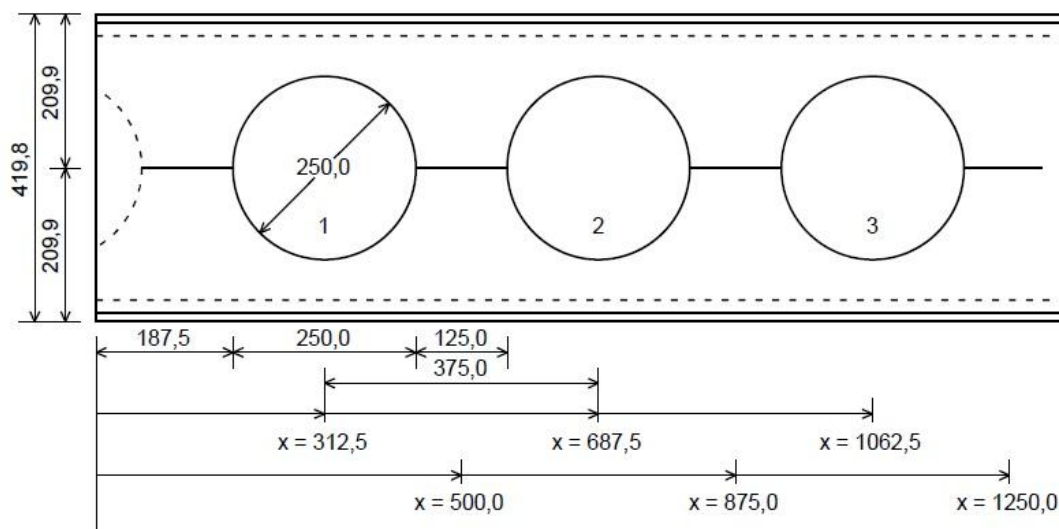
Μέτρο ελαστικότητας (E)	210 GPa
Λόγος Poisson (ν)	0.3
Όριο διαρροής (f_y)	355 MPa
Όριο θραύσης (f_u)	510 MPa
ϵ	0.81

Οι έλεγχοι που θα πραγματοποιηθούν στο παρόν παράδειγμα είναι:

- Αντοχή σε κάμψη της δοκού με διάκενα κορμού στη θέση των διακένων.
- Αντοχή σε κάμψη Vierendeel των διατομών T πάνω και κάτω από τα διάκενα.
- Αντοχή της συμπαγούς διατομής του κορμού σε διάτμηση, κάμψη και αξονική θλίψη.
- Υπολογισμός βελών, λόγω της ύπαρξης των διακένων, στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.

3.8.1 Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της δοκού με διάκενα κορμού

Η δοκός έχει 26 κυκλικά διάκενα ομοιόμορφα κατανεμημένα στον κορμό της. Η διάμετρος των διακένων είναι $h_0 = 250$ mm και η απόσταση των κέντρων γειτονικών διακένων είναι $s = 375$ mm. Στο Σχήμα 3-7 φαίνεται η όψη της δοκού από την αρχή της έως το 3^ο διάκενο.



Σχήμα 3-7: Όψη δοκού

3.8.2 Δράσεις και συνδυασμοί δράσεων

Το ίδιο βάρος της χαλύβδινης δοκού ισούται με $g_k = 0.46$ kN/m (μόνιμο φορτίο) και η δοκός καταπονείται με ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $q_k = 10$ kN/m (κινητό φορτίο). Οι συντελεστές ασφαλείας των δράσεων για την Οριακή Κατάσταση Ασφαλείας δίνονται στον Πίνακα 3-4, σύμφωνα με τον EN1993

Πίνακας 3-4: επιμέρους συντελεστές ασφαλείας των δράσεων στην ΟΚΑ

γ_G	1.35
γ_Q	1.50
γ_A, γ_F	1.0

Ο έλεγχος της δοκού για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας πραγματοποιείται για τον βασικό συνδυασμό δράσεων:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \cdot Q_{ki} \quad (3-35)$$

$$q_d = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = 1.35 \cdot 0.46 + 1.50 \cdot 10 = 15.62 \text{ kN/m}$$

Η δοκός καταπονείται από ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $q_d = 15.62 \text{ kN/m}$ και τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται είναι:

$$\text{Μέγιστη τέμνουσα στην στήριξη} \quad V_{Ed} = 78.11 \text{ kN}$$

$$\text{Μέγιστη ροπή στο μέσο της δοκού} \quad M_{Ed} = 195.26 \text{ kNm}$$

3.8.3 Γεωμετρικά δεδομένα για τον έλεγχο της δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού

Για τον έλεγχο της δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού πρέπει να υπολογιστούν τα γεωμετρικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν και οι διαστάσεις του ισοδύναμου ορθογωνίου που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής. Η διάμετρος του διάκενου ισούται με $h_o = 250 \text{ mm}$. Οι διαστάσεις του ισοδύναμου ορθογωνίου είναι:

$$\text{Ύψος ισοδύναμου ορθογώνιου διάκενου:} \quad h_{eo} = 0.9 \cdot h_o = 0.9 \cdot 250 = 225 \text{ mm}$$

$$\text{Μήκος ισοδύναμου ορθογώνιου διάκενου:} \quad l_e = 0.45 \cdot h_o = 0.45 \cdot 250 = 112.5 \text{ mm}$$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής είναι:

$$\begin{aligned} \text{Εμβαδόν διατομής T:} \quad A_T &= \frac{(A - h_{eo} \cdot t_w)}{2} = \\ &= \frac{(6934 - 225 \cdot 7.5)}{2} = 2623.25 \text{ mm}^2 = 26.23 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Ύψος διατομής T:} \quad h_T = \frac{(h - h_{eo})}{2} = \frac{(6934 - 225)}{2} = 97.4 \text{ mm}$$

$$\text{Ύψος κορμού διατομής T:} \quad h_{w,T} = d_t = d_b = h_T - t_f = 97.4 - 11.5 = 85.9 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Ύψος ελαστικού άξονα της διατομής T από} \\ \text{την εξωτερική ίνα του πέλματος:} \quad z_{el} &= \frac{b_f \cdot \frac{t_f^2}{2} + \left(t_f + \frac{h_{w,T}}{2} \right) \cdot h_{w,T} \cdot t_w}{A_T} = \\ &= \frac{160 \cdot \frac{11.5^2}{2} + \left(11.5 + \frac{85.9}{2} \right) \cdot 85.9 \cdot 7.5}{2623.25} = 17.41 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Ενεργό ύψος μεταξύ των ουδέτερων αξόνων} \\ \text{των διατομών T:} \quad h_{eff} = h - 2 \cdot z_{el} = 419.8 - 2 \cdot 17.41 = 385 \text{ mm}$$

$$\text{Ενεργό μήκος διατομής T σ' ένα διάκενο:} \quad l_t = 0.7 \cdot h_o = 0.7 \cdot 250 = 175 \text{ mm}$$

3.8.4 Γεωμετρικοί έλεγχοι για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού

Σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 3.3.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διακένων πρέπει να πληρούν τις εξής απαιτήσεις:

$$- h_o \leq 0.8 \cdot h$$

- $250 \leq 0.8 \cdot 419.8 \rightarrow 250 \text{ mm} \leq 335.84 \text{ mm}$ Ισχύει
 – d_t και $d_b \geq r + 10 \text{ mm}$ αλλά $\geq 30 \text{ mm}$
 $d_t = d_b = 85.9 \text{ mm} \geq 18 + 10 = 28 \text{ mm}$ Ισχύει
 $\rightarrow 85.9 \text{ mm} \geq 30 \text{ mm}$
 – $s_o \geq 0.1 \cdot h_o$
 $125 \geq 0.1 \cdot 250 \rightarrow 125 \text{ mm} \geq 25 \text{ mm}$ Ισχύει

3.8.5 Κατηγοριοποίηση διατομής

Η κατηγοριοποίηση της διατομής του πέλματος θα γίνει σύμφωνα με τον EN1993-1-1, §5.5 και τον Πίνακα 5.2β:

- $c = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = \frac{160 - 7.5 - 2 \cdot 18}{2} = 58.25 \text{ mm}$
 $\frac{c}{t_f} = \frac{58.25}{11.5} = 5.065$
 $9 \cdot \varepsilon = 7.29$
 $\frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon \rightarrow 5.0625 \leq 7.29 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$

Η κατηγοριοποίηση της άνω διατομής T θα γίνει σύμφωνα με την Παράγραφο 3.5.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- $l_t = 175 \text{ mm}$
 $32 \cdot \varepsilon \cdot t_w = 32 \cdot 0.81 \cdot 7.5 = 194.4 \text{ mm}$
 $l_t \leq 32 \cdot \varepsilon \cdot t_w \rightarrow 175 \text{ mm} \leq 194.4 \text{ mm} \rightarrow \text{Κατηγορία 2}$

Η κατηγοριοποίηση της κάτω διατομής T θα γίνει σύμφωνα με την Παράγραφο 3.5.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η μέγιστη αξονική δύναμη με την οποία γίνεται η κατάταξη της κάτω διατομής T βρίσκεται στο μέσο της δοκού όπου και η ροπή είναι μέγιστη και δίνεται από τη σχέση:

$$N_{bT,Ed}(x) = \frac{M_{Ed}(x)}{h_{eff} + z_{el}} \quad (3-36)$$

$$N_{bT,Ed,max} = \frac{M_{Ed,max}}{h_{eff} + z_{el}} = \frac{195.26}{385 + 17.41} \cdot 1000 = 485.25 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,max}}{A_{w,bT} \cdot f_{yd}} = \frac{485.25}{644.25 \cdot 355000} = 2.12$$

$$1 - \frac{20 \cdot \varepsilon \cdot t_w^2}{A_{w,bT}} = 1 - \frac{20 \cdot 0.81 \cdot 7.5^2}{644.25} < 0$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{w,bT} \cdot f_{yd}} \geq 1 - \frac{20 \cdot \varepsilon \cdot t_w^2}{A_{w,bT}} \rightarrow \text{Κατηγορία 2}$$

Οπότε, η διατομή είναι Κατηγορίας 2.

3.8.6 Έλεγχος δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σε ροπή κάμψης

Η αντοχή σε εφελκυστική δύναμη της κάτω διατομής T δίνεται από τη σχέση:

$$N_{bT,Rd} = \frac{A_{b,T}}{\gamma_{Mo}} \quad (3-37)$$

$$- N_{bT,Rd} = \frac{2623.25 \cdot 355}{1.0} \cdot 10^{-3} = 931.25 \text{ kN}$$

Ο πλαστικός ουδέτερος άξονας βρίσκεται στην άνω διατομή T και γι' αυτό η πλαστική αντοχή σε κάμψη δίνεται από την σχέση:

$$M_{c,Rd} = N_{b,T,Rd} \cdot h_{eff} \quad (3-38)$$

$$- M_{c,Rd} = 931.25 \cdot 385 \cdot 10^{-3} = 358.53 \text{ kNm}$$

Η εφελκυστική αξονική δύναμη ισούται με $N_{b,T,Ed} = 485.25 \text{ kN}$

Ο έλεγχος μπορεί να γίνει είτε σε όρους αξονικών δυνάμεων είτε σε όρους ροπής κάμψης:

$$- \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{195.26}{358.53} = 0.52 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

$$- \frac{N_{b,T,Ed}}{N_{bT,Rd}} = \frac{485.25}{931.25} = 0.52 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.7 Έλεγχος δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σε διάτμηση

Ο έλεγχος γίνεται στο πλησιέστερο διάκενο στη στήριξη, το οποίο είναι και το δυσμενέστερο με διατμητική δύναμη $V_{Ed} = 78.11 \text{ kN}$ και $M_{Ed} \approx 0$. Η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση ισούται με το άθροισμα των αντοχών των άνω και κάτω διατομών T και δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Rd} = V_{t,Rd} + V_{b,Rd} \quad (3-39)$$

Η πλαστική αντοχή των διατομών T δίνεται από τη σχέση:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (3-40)$$

Στην οποία,

$$A_v = A_{T,Vpl} - b_f \cdot t_f + (2 \cdot r + t_w) \cdot 0.5 \cdot t_f \quad (3-41)$$

Για την πλαστική αντοχή σε διάτμηση πρέπει να ληφθεί υπόψη το πλήρες ύψος του διάκενου και όχι αυτό του ισοδύναμου ορθογωνίου. Έτσι, το εμβαδόν της διατομής T είναι:

$$- A_{T,Vpl} = \frac{(A - h_o \cdot t_w)}{2} = \frac{(6934 - 250 \cdot 7.5)}{2} = 2529.5 \text{ mm}^2$$

$$- A_v = 2529.5 - 160 \cdot 11.5 + (2 \cdot 18 + 7.5) \cdot 0.5 \cdot 11.5 = 939.625 \text{ mm}^2$$

$$- V_{t,Rd} = V_{b,Rd} = \frac{939.625 \cdot \frac{355}{\sqrt{3}}}{1.0} \cdot 10^{-3} = 192.6 \text{ kN}$$

Οπότε,

$$- V_{Rd} = V_{t,Rd} + V_{b,Rd} = 192.6 + 192.6 = 385.2 \text{ kN}$$

$$- \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{78.11}{385.2} = 0.20 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.8 Έλεγχος δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού σε κάμψη των διατομών T

Θεωρείται ότι το 50% της διατμητικής δύναμης V_{Ed} μοιράζεται σε κάθε διατομή T. Εφόσον η διατμητική δύναμη σε κάθε διατομή T ($78.11 / 2 = 39.055 \text{ kN}$) είναι λιγότερη από το $0.5 \cdot V_{pl,Rd} = 96.3 \text{ kN}$, το πάχος του κορμού δεν απαιτείται να απομειωθεί όταν προσδιορίζεται η πλαστική αντοχή σε κάμψη και η αξονική αντοχή. Για διατομή Κατηγορίας 2, η πλαστική αντοχή σε κάμψη μίας μη ενισχυμένης διατομής T, με την απουσία αξονικής δύναμης και διάτμησης, δίνεται από τη σχέση:

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{w,T} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \cdot (0.5 \cdot h_{w,T} + t_f - z_{pl}) + \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \cdot \left(0.5 \cdot t_f - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f}\right) \quad (3-42)$$

Το ύψος του πλαστικού ουδέτερου άξονα της διατομής T_a από την εξωτερική ίνα του πέλματος δίνεται από τη σχέση:

$$z_{pl} = \frac{A_f + A_{w,T}}{2 \cdot b_f} \quad (3-43)$$

$$- z_{pl} = \frac{160 \cdot 11.5 + 85.9 \cdot 7.5}{2 \cdot 160} = 7.76 \text{ mm}$$

Οπότε,

$$- M_{pl,Rd} = \frac{85.9 \cdot 7.5 \cdot 355}{1.0} \cdot (0.5 \cdot 85.9 + 11.5 - 7.76) \cdot 10^{-6} + \frac{160 \cdot 11.5 \cdot 355}{1.0} \cdot \left(0.5 \cdot 11.5 - 7.76 + \frac{7.76^2}{11.5}\right) \cdot 10^{-6} = 10.68 + 2.11 = 12.79 \text{ kNm}$$

Η πλαστική αντοχή σε κάμψη της κάτω διατομής T μειώνεται λόγω της παρουσίας αξονικής εφελκυστικής δύναμης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$M_{b,T,N,Rd} = M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left\{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}\right)^2\right\} \quad (3-44)$$

$$- M_{b,T,N,Rd} = M_{pl,N,Rd} = 12.79 \cdot \left\{1 - \left(\frac{485.33}{931.25}\right)^2\right\} = 9.32 \text{ kNm}$$

Η πλαστική αντοχή σε κάμψη της άνω διατομής T δεν απομειώνεται λόγω της παρουσίας αξονικής δύναμης και έτσι:

$$- M_{t,T,N,Rd} = M_{pIRd} = 12.79kNm$$

Ο έλεγχος για την επάρκεια της αντοχής σε κάμψη Vierendeel είναι:

$$2 \cdot M_{b,T,N,Rd} + 2 \cdot M_{t,T,N,Rd} \geq V_{Ed} \cdot l_e \quad (3-45)$$

Έτσι χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές των αντοχών των διατομών T:

$$- 2 \cdot M_{b,T,N,Rd} + 2 \cdot M_{t,T,N,Rd} = 2 \cdot 9.32 + 2 \cdot 12.79 = 44.22kNm$$

$$- V_{Ed} \cdot l_e = 78.11 \cdot 112.5 \cdot 10^{-3} = 8.79kNm$$

$$- \frac{V_{Ed} \cdot l_e}{2 \cdot M_{b,T,N,Rd} + 2 \cdot M_{t,T,N,Rd}} = \frac{8.79}{44.22} = 0.20 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.9 Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε ροπή κάμψης

Η αντοχή σε κάμψη των συμπαγών τμημάτων του κορμού (στη μέση του ύψους ανάμεσα σε δύο γειτονικά κυκλικά διάκενα) δίνεται από τη σχέση:

$$M_{wp,Rd} = \frac{s_o^2 \cdot t_w \cdot f_y}{6} \quad (3-46)$$

$$- M_{wp,Rd} = \frac{125^2 \cdot 7.5 \cdot 355}{6} \cdot 10^{-6} = 6.94kNm$$

Η ροπή κάμψης των συμπαγών τμημάτων του κορμού ισούται με μηδέν, $M_{wp,Ed} = 0$. Έτσι, δεν απαιτείται ο έλεγχος επάρκειας αντοχής σε κάμψη στο συμπαγές τμήμα του κορμού για δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού.

3.8.10 Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διάτμηση

Η μέγιστη διατμητική δύναμη του συμπαγούς τμήματος του κορμού δεν ισούται με τη μέγιστη της δοκού, αλλά με αυτή που αναπτύσσεται στο συμπαγές τμήμα του κορμού ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο διάκενο.

$$V_{Ed} = V_{\max} - q_d \cdot \left(s_e + h_o + \frac{s_o}{2} \right) \quad (3-47)$$

$$- V_{Ed} = 78.11 - 15.62 \cdot \left(187.5 + 250 + \frac{125}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 70.29kN$$

Η οριζόντια διατμητική δύναμη του συμπαγούς τμήματος του κορμού ισούται με το μέγιστο των:

$$V_{wp,Ed,1} = \frac{V_{Ed} \cdot s}{h_{eff} + z_{el}} \quad (3-48)$$

$$- V_{wp,Ed,1} = \frac{70.29 \cdot 375}{385 + 17.41} = 65.51kN$$

$$V_{wp,Ed,2} = \frac{V_{Ed} \cdot s}{h_{eff}} \quad (3-49)$$

$$- V_{wp,Ed,2} = \frac{70.29 \cdot 375}{385} = 68.47kN$$

$$- V_{wp,Ed} = \max\{V_{wp,Ed,1} + V_{wp,Ed,2}\} = 68.47kN$$

Η θλιπτική τάση που ενεργεί στο συμπαγές τμήμα του κορμού οφείλεται σε αυτή την οριζόντια διατμητική δύναμη:

$$- \sigma_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed}}{s_o \cdot t_w} = \frac{68.47}{125 \cdot 7.5} \cdot (1000)^2 = 73035.40kN/m^2$$

Ο έλεγχος επάρκειας του συμπαγούς τμήματος του κορμού σε διάτμηση είναι:

$$\sigma_{wp,Ed} < 0.577 \cdot f_y$$

$$- 0.577 \cdot f_y = 0.577 \cdot 355000 = 204835kN/m^2$$

$$- \frac{\sigma_{wp,Ed}}{0.577 \cdot f_y} = \frac{73035.40}{204835} = 0.36 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.11 Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε λυγισμό

Η αντοχή σε θλιπτική τάση $\sigma_{b,wp,Rd}$ ισούται με $\frac{\chi_{wp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$. Για τον υπολογισμό του μειωτικού

συντελεστή χ_{wp} του συμπαγούς τμήματος του κορμού πρέπει να προσδιοριστεί η ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής. Για πολλαπλά κυκλικά διάκενα η ανηγμένη λυγηρότητα ισούται με:

$$- \bar{\lambda} = \frac{1.75 \cdot \{s_{o,eff}^2 + h_o^2\}}{t_w} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1.75 \cdot \{125^2 + 250^2\}}{7.5} \cdot \frac{1}{76} = 0.85$$

Όπου,

$$\bar{\lambda}_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 \cdot \varepsilon = 74$$

$$s_{o,eff} = s_o = 125 \text{ mm}$$

Για πρότυπες ελατές διατομές η καμπύλη λυγισμού είναι η b με συντελεστή ατελειών $\alpha = 0.34$. Σύμφωνα με τον EN1993-1-1 §6.3.1:

$$- \Phi = 0.5 \cdot \left\{ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right\} = 0.5 \cdot \left\{ 1 + 0.34 \cdot (0.85 - 0.2) + 0.85^2 \right\} = 0.98$$

$$- \chi_{wp} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0.98 + \sqrt{0.98^2 - 0.85^2}} = 0.69$$

Οπότε,

$$- \sigma_{b,wp,Rd} = \frac{\chi_{wp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.69 \cdot 355}{1.0} \cdot 1000 = 245240.50kN/m^2$$

Ο έλεγχος επάρκειας του συμπαγούς τμήματος του κορμού σε λυγισμό είναι:

$$- \frac{\sigma_{wp,Ed}}{\sigma_{b,wp,Rd}} = \frac{73035.40}{245240.50} = 0.30 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.12 Έλεγχος των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διάτμηση

Η μέγιστη διατμητική δύναμη του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού ισούται με τη μέγιστη διατμητική δύναμη της δοκού, στη στήριξη, $V_{Ed} = 78.11$ kN. Η οριζόντια διατμητική δύναμη του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού ισούται με το μέγιστο των παρακάτω:

Από τη σχέση (3.47)

$$- V_{wp,Ed,1} = \frac{78.11 \cdot 375}{385 + 17.41} = 72.79 \text{ kN}$$

Από τη σχέση (3.48)

$$- V_{wp,Ed,2} = \frac{78.11 \cdot 375}{385} = 76.08 \text{ kN}$$

$$- V_{wp,Ed} = \max\{V_{wp,Ed,1} + V_{wp,Ed,2}\} = 76.08 \text{ kN}$$

Η θλιπτική τάση που ενεργεί στο ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού οφείλεται σε αυτή την οριζόντια διατμητική δύναμη:

$$- \sigma_{wp,Ed} = \frac{V_{wp,Ed}}{s_e \cdot t_w} = \frac{76.08}{187.5 \cdot 7.5} \cdot (1000)^2 = 54100.29 \text{ kN/m}^2$$

Ο έλεγχος επάρκειας του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού είναι:

$$\sigma_{wp,Ed} < 0.577 \cdot f_y$$

$$- 0.577 \cdot f_y = 0.577 \cdot 355000 = 204835 \text{ kN/m}^2$$

$$- \frac{\sigma_{wp,Ed}}{0.577 \cdot f_y} = \frac{54100.29}{204835} = 0.26 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.13 Έλεγχος των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού σε λυγισμό

Η αντοχή σε θλιπτική τάση $\sigma_{b,wp,Rd}$ ισούται με $\frac{\chi_{wp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$. Για τον υπολογισμό του μειωτικού

συντελεστή χ_{wp} του συμπαγούς τμήματος του κορμού πρέπει να προσδιοριστεί η ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής. Για πολλαπλά κυκλικά διάκενα η ανηγμένη λυγηρότητα ισούται με:

$$- \bar{\lambda} = \frac{1.75 \cdot \{s_{e,eff}^2 + h_o^2\}}{t_w} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1.75 \cdot \{187.5^2 + 250^2\}}{7.5} \cdot \frac{1}{76} = 0.90$$

Όπου,

$$\bar{\lambda}_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 \cdot \varepsilon = 74$$

$$s_{o,eff} = s_o = 187.5 \text{ mm}$$

Για πρότυπες ελατές διατομές η καμπύλη λυγισμού είναι η b με συντελεστή ατελειών $\alpha = 0.34$. Σύμφωνα με τον EN1993-1-1 §6.3.1:

$$- \Phi = 0.5 \cdot \left\{ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right\} = 0.5 \cdot \left\{ 1 + 0.34 \cdot (0.90 - 0.2) + 0.90^2 \right\} = 1.02$$

$$- \chi_{wp} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1.02 + \sqrt{1.02^2 - 0.90^2}} = 0.66$$

$$- \sigma_{b,wp,Rd} = \frac{\chi_{wp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.66 \cdot 355}{1.0} \cdot 1000 = 234745.76 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Ο έλεγχος επάρκειας του συμπαγούς τμήματος του κορμού σε λυγισμό είναι:

$$- \frac{\sigma_{wp,Ed}}{\sigma_{b,wp,Rd}} = \frac{754100.29}{234745.76} = 0.23 < 1.0 \quad \text{Ο έλεγχος ικανοποιείται}$$

3.8.14 Έλεγχος της δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Για τον υπολογισμό του βέλους χρησιμοποιείται η σχέση (3-34) της παραγράφου 3.7 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εφόσον η δοκός που ελέγχεται έχει πολλαπλά κυκλικά διάκενα και φορτίζεται με ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο. Το βέλος καθαρής κάμψης για συμπαγή αμφιέρειστη δοκό δίνεται από τη σχέση:

$$w_b = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (3-50)$$

$$- w_b = \frac{5 \cdot 15.62 \cdot 10^4}{384 \cdot 210000000 \cdot \frac{20295}{(100)^4}} = 0.0477 \text{ m}$$

Οπότε,

$$\frac{w_{add}}{w_b} = 0.25 \cdot n_o \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right)^3 \cdot \left(\frac{h}{L} \right)$$

$$- \frac{w_{add}}{w_b} = 0.25 \cdot 26 \cdot \left(\frac{250}{419.8} \right)^3 \cdot \left(\frac{419.8/1000}{10} \right) = 0.0576$$

$$- w_{add} = 0.0576 \cdot w_b = 0.0576 \cdot 0.0477 = 0.003 \text{ m}$$

Το ολικό βέλος κάμψης της δοκού δίνεται από τη σχέση:

$$w_T = w_b + w_{add} \quad (3-51)$$

$$- w_T = 0.0477 + 0.003 = 0.05 \text{ m}$$

3.8.15 Δρόμος Ισορροπίας δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού

Στην παρούσα παράγραφο θα υπολογιστεί το οριακό φορτίο της δοκού, το οποίο ισούται με το ελάχιστο των φορτίων που απαιτείται για την ανάπτυξη της αντοχής της δοκού. Ο έλεγχος από τον οποίο θα προκύψει το οριακό φορτίο θα αποτελεί και την κρίσιμη μορφή αστοχίας της δοκού με διάκενα κορμού. Ακολούθως, για διάφορες τιμές του φορτίου θα υπολογιστεί το ολικό βέλος κάμψης

στο μέσο της δοκού και θα σχεδιαστεί ο δρόμος ισορροπίας σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13.

– Έλεγχος σε ροπή κάμψης:

- $N_{b,T,Ed} = N_{b,T,Rd} = 931.25kN$
- $M_{y,max} = N_{b,T,Ed} \cdot (h_{eff} + z_{el}) = 931.25 \cdot \frac{(385+17.41)}{1000} = 374.73kNm$
- $q_{u,1} = \frac{8 \cdot M_{y,max}}{L^2} = \frac{8 \cdot 374.73}{10^2} = 29.98kN/m$

– Έλεγχος δοκού με διάκενα κορμού σε διάτμηση

- $V_{Ed} = V_{Rd} = 385.17kN$
- $q_{u,2} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L} = \frac{2 \cdot 385.17}{10} = 77.03kN/m$

– Έλεγχος σε κάμψη των διατομών T

- $V_{Ed} \cdot l_e = 2 \cdot M_{b,T,N,Rd} + 2 \cdot M_{t,T,N,Rd} = 44.22kNm$
- $V_{Ed} = \frac{(2 \cdot M_{NV,b,Rd} + 2 \cdot M_{NV,t,Rd})}{l_e} = \frac{44.22}{\frac{112.50}{1000}} = 392.89kN$
- $q_{u,3} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L} = \frac{2 \cdot 392.89}{10} = 78.58kN/m$

– Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διάτμηση

- $\sigma_{wp,Ed} = 0.577 \cdot f_y = 204835kN/m^2$
- $V_{wp,Ed} = \sigma_{wp,Ed} \cdot s_o \cdot t_w = 204835 \cdot \frac{125 \cdot 7.5}{(1000)^2} = 192.03kN$
- $V_{Ed} = \frac{V_{wp,Ed} \cdot h_{eff}}{s} = \frac{192.03 \cdot 385}{375} = 197.15kN$
- $q_{u,4} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L} = \frac{2 \cdot 197.15}{10} = 43.81kN/m$

– Έλεγχος των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε λυγισμό

- $\sigma_{wp,Ed} = \sigma_{wp,b,Rd} = 24524050kN/m^2$
- $V_{wp,Ed} = \sigma_{wp,Ed} \cdot s_o \cdot t_w = 24524050 \cdot \frac{125 \cdot 7.5}{(1000)^2} = 229.91kN$
- $V_{Ed} = \frac{V_{wp,Ed} \cdot h_{eff}}{s} = \frac{229.91 \cdot 385}{375} = 236.04kN$

$$\bullet \quad q_{u,5} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L} = \frac{2 \cdot 236.04}{10} = 52.45 \text{ kN/m}$$

– Έλεγχος των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού

$$\bullet \quad \sigma_{wp,Ed} = 0.577 \cdot f_y = 204835 \text{ kN/m}^2$$

$$\bullet \quad V_{wp,Ed} = \sigma_{wp,Ed} \cdot s_e \cdot t_w = 204835 \cdot \frac{187.50 \cdot 7.5}{(1000)^2} = 288.05 \text{ kN}$$

$$\bullet \quad V_{Ed} = \frac{V_{wp,Ed} \cdot h_{eff}}{s} = \frac{288.05 \cdot 385}{375} = 295.72 \text{ kN}$$

$$\bullet \quad q_{u,6} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L} = \frac{2 \cdot 197.15}{10} = 59.14 \text{ kN/m}$$

– Έλεγχος των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού σε λυγισμό

$$\bullet \quad \sigma_{wp,Ed} = \sigma_{wp,b,Rd} = 234745.76 \text{ kN/m}^2$$

$$\bullet \quad V_{wp,Ed} = \sigma_{wp,Ed} \cdot s_o \cdot t_w = 234745.76 \cdot \frac{187.50 \cdot 7.5}{(1000)^2} = 330.11 \text{ kN}$$

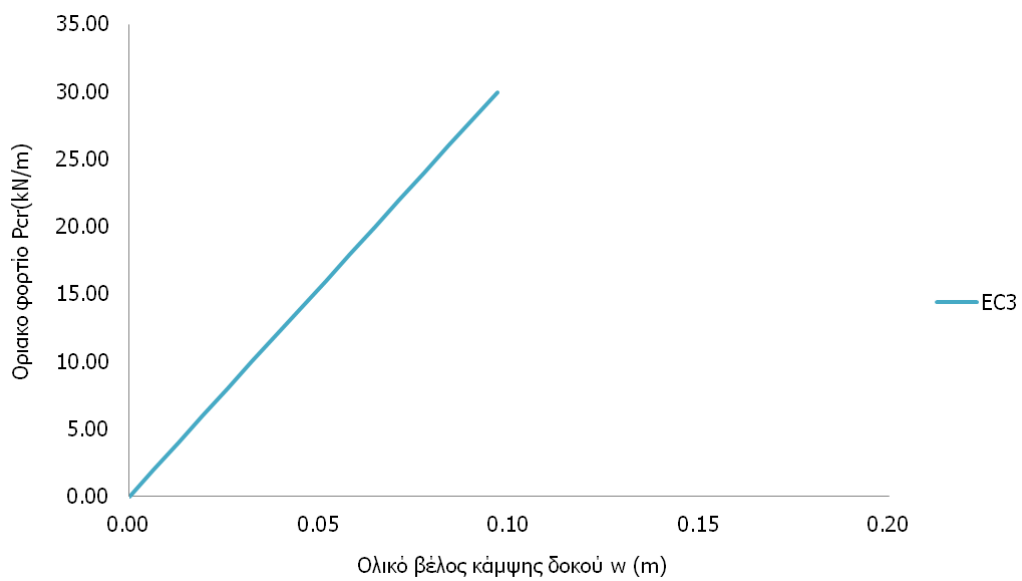
$$\bullet \quad V_{Ed} = \frac{V_{wp,Ed} \cdot h_{eff}}{s} = \frac{330.11 \cdot 385}{375} = 338.90 \text{ kN}$$

$$\bullet \quad q_{u,7} = \frac{2 \cdot V_{Ed}}{L} = \frac{2 \cdot 338.90}{10} = 67.78 \text{ kN/m}$$

Το οριακό φορτίο της δοκού με διάκενα κορμού είναι $q_u = \min \{q_{u,1}, q_{u,2}, q_{u,3}, q_{u,4}, q_{u,5}, q_{u,6}, q_{u,7}\} = 29.98$ kN/m και κρίσιμη μορφή είναι η αστοχία της δοκού σε κάμψη. Στον Πίνακα 3-5 παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού βέλους της δοκού για διάφορες τιμές του φορτίου και στο Σχήμα 3-8 απεικονίζεται ο δρόμος ισορροπίας της δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13. Θεωρείται ότι η σχέση φορτίου και βέλους κάμψης της δοκού είναι γραμμική, όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (3-34) και (3-49).

Πίνακας 3-5: Βέλος κάμψης δοκού για διάφορες τιμές του φορτίου

Φορτίο P (kN/m)	Βέλος w (m)
0	0
2	0.006
4	0.013
6	0.019
8	0.026
10	0.032
12	0.039
14	0.045
16	0.052
18	0.058
20	0.065
22	0.071
24	0.078
26	0.084
28	0.090
29.98	0.097



Σχήμα 3-8: Δρόμος Ισορροπίας δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13

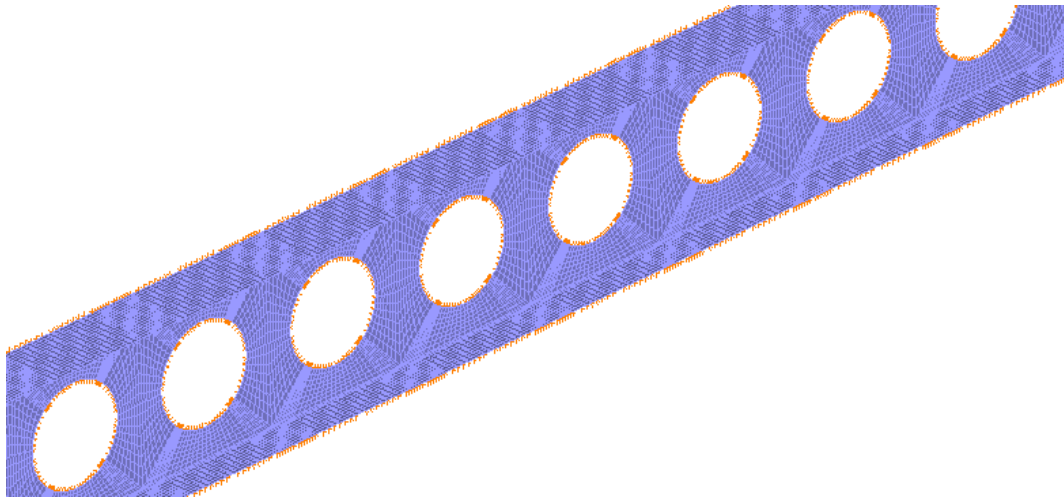
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA [13] για τη δοκό με κυκλικά διάκενα κορμού που μελετήθηκε σύμφωνα με το προσχέδιο του Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-13 [10] στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στόχος είναι να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων. Με τον έλεγχο της δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 διερευνήθηκε ποια μορφή αστοχίας είναι κρίσιμη και πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη αστοχία. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της δοκού με διάκενα κορμού αποτελούν τη βάση ώστε ακολούθως να γίνουν παραμετρικές αναλύσεις και να εξετασθεί η απόκριση της.

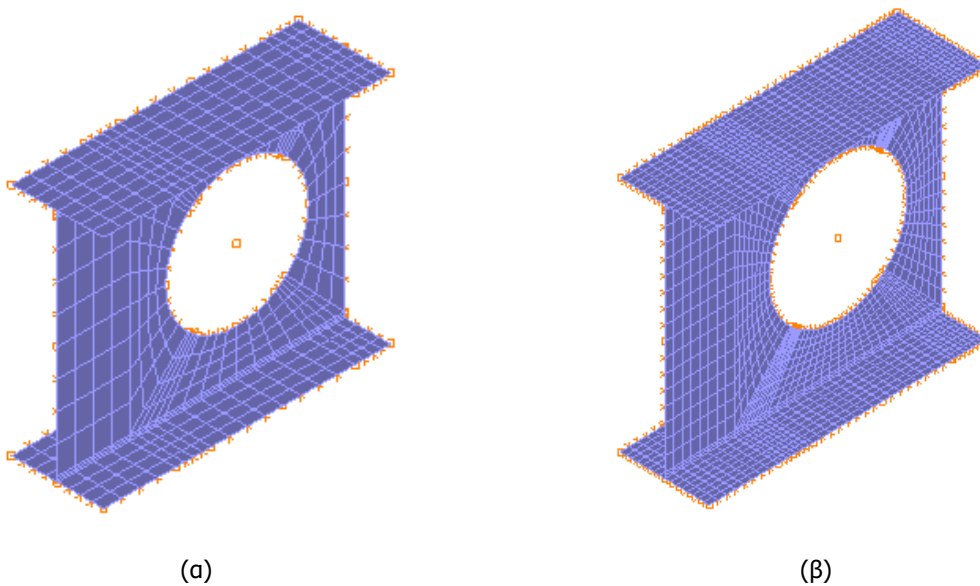
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης μίας δοκού με πολλαπλά κυκλικά διάκενα στον κορμό κατά την επιβολή ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου στο άνω πέλμα της επιτυγχάνεται μέσω της αξιόπιστης προσομοίωσης της δοκού. Ένας τρόπος αριθμητικής προσομοίωσης του προβλήματος είναι με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell-type finite elements). Αυτή η αριθμητική προσέγγιση προσφέρει επαρκή ακριβή εκτίμηση μίας ενδεχόμενης αστοχίας από τοπικό λυγισμό. Η χρήση επιφανειακών στοιχείων αυξάνει ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα του προσομοιώματος και το υπολογιστικό κόστος ως προς το χρόνο επίλυσης, τις δυσκολίες σύγκλισης του αλγορίθμου και τον όγκο των αποτελεσμάτων. Παρ' όλα αυτά υιοθετείται αυτός ο τρόπος προσομοίωσης της δοκού (Σχήμα 4-1).

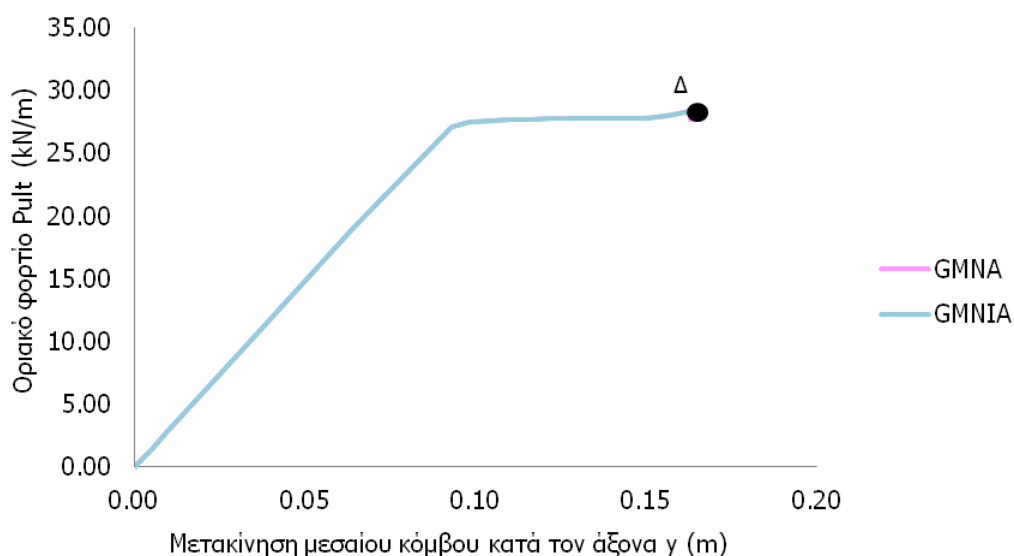


Σχήμα 4-1: Προσομοίωμα δοκού με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell-type finite elements)

Η αριθμητική επίλυση πραγματοποιείται με χρήση του εμπορικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Η δοκός που μελετάται έχει μήκος $L = 10$ m και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 3.8 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για τη διακριτοποίηση του φορέα δημιουργήθηκαν δύο πλέγματα (Σχήμα 4-2) και κατόπιν των αντίστοιχων αναλύσεων ευαισθησίας με στόχο την εύρεση της βέλτιστης διακριτοποίησης, λαμβάνοντας εξίσου υπόψη την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και το υπολογιστικό κόστος, επιλέχθηκε το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί να είναι το πυκνό. Ο χάλυβας της δοκού είναι ποιότητας S355 με ελαστικό-πλαστικό, γραμμικώς κρατυνόμο νόμο υλικού και τα χαρακτηριστικά του παρατίθενται στον Πίνακα 3-3 της Παραγράφου 3.8 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο τύπος των αναλύσεων που πραγματοποιούνται είναι γραμμικές αναλύσεις λυγισμού και μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας, υλικού και συνδυασμένης μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ή χωρίς αρχικές ατέλειες. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας συνοψολογίζεται στην ανάλυση προκειμένου να ληφθούν υπόψη φαινόμενα 2^{ης} τάξης λόγω των πρόσθετων βελών που αναμένονται να αναπτυχθούν στη δοκό λόγω της παρουσίας των διακένων.

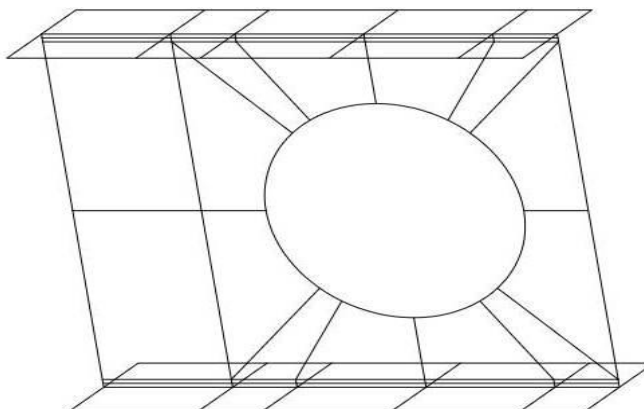


Σχήμα 4-2: Διακριτοποίηση δοκού (α)αραιό πλέγμα (β)πυκνό πλέγμα

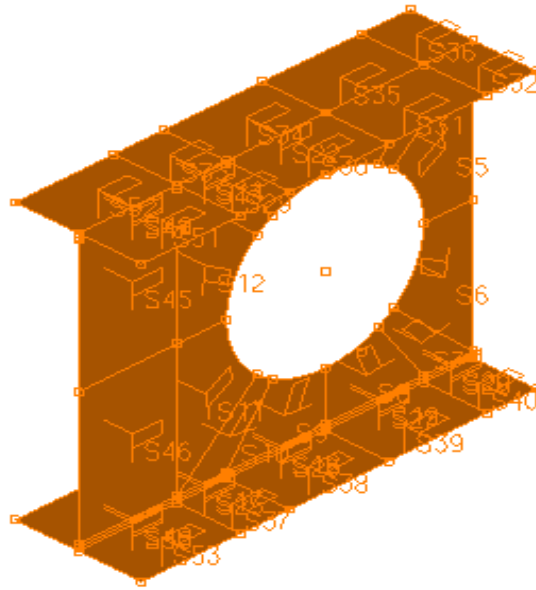


Σχήμα 4-3: Αναλύσεις ευαισθησίας

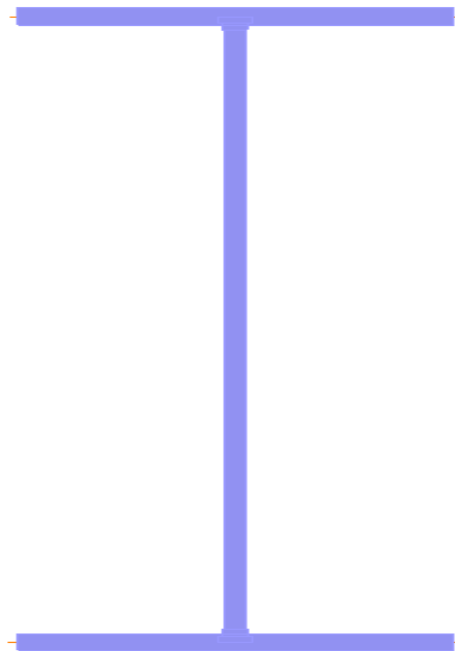
Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της δοκού βασίστηκε στη δημιουργία μίας αρχικής επιφάνειας, που ακολούθως με την αντιγραφή της δημιουργήθηκε η δοκός των 10 m. Υιοθετείται αυτή η μέθοδος προσομοίωσης για ομοιομορφία στο πλέγμα και στον προσανατολισμό των επιφανειών αλλά και για εξοικονόμηση χρόνου κατά το σχεδιασμό. Ο σχεδιασμός της αρχικής επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού προγράμματος σχεδιασμού AutoCAD. Στο Σχήμα 4-4 απεικονίζεται η αρχική επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή εισάγεται στο πρόγραμμα ADINA με την εντολή import, όπου ορίζονται οι 54 επιφάνειες γύρω από το διάκενο με τέτοιον τρόπο ώστε να έχουν ίδιο προσανατολισμό (Σχήμα 4-5). Αφού οριστούν οι επιφάνειες, πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του φορέα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα για τη διατομή του κορμού δημιουργούνται 3 ομάδες πεπερασμένων στοιχείων με διαφορετικό πάχος για να ληφθεί υπόψη η ακτίνα συναρμογής και τα αποτελέσματα να είναι πιο ακριβή (Σχήμα 4-6). Για τη δημιουργία της δοκού μήκους 10 m χρησιμοποιείται η εντολή Transformed, η οποία αντιγράφει την αρχική επιφάνεια και το πλέγμα που έχει οριστεί.



Σχήμα 4-4: Αρχική επιφάνεια διατομής δοκού στο πρόγραμμα AutoCAD



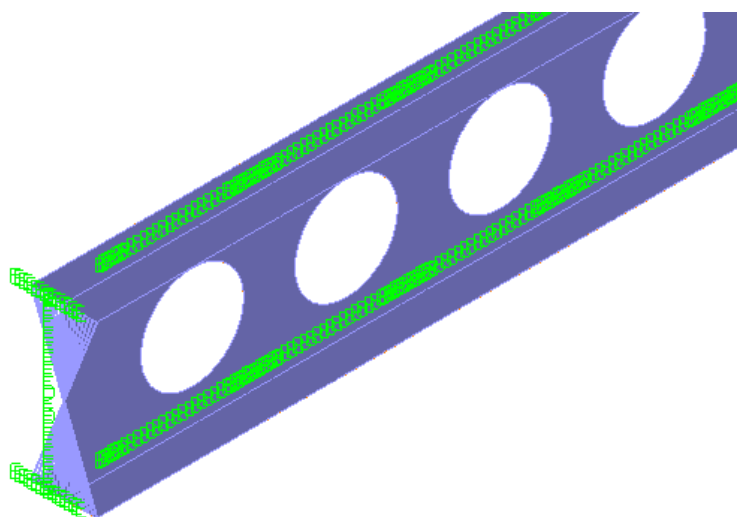
Σχήμα 4-5: Ορισμός επιφανειών γύρω από το διάκενο στο πρόγραμμα ADINA



Σχήμα 4-6: Προσομοίωση ακτίνας συναρμογής

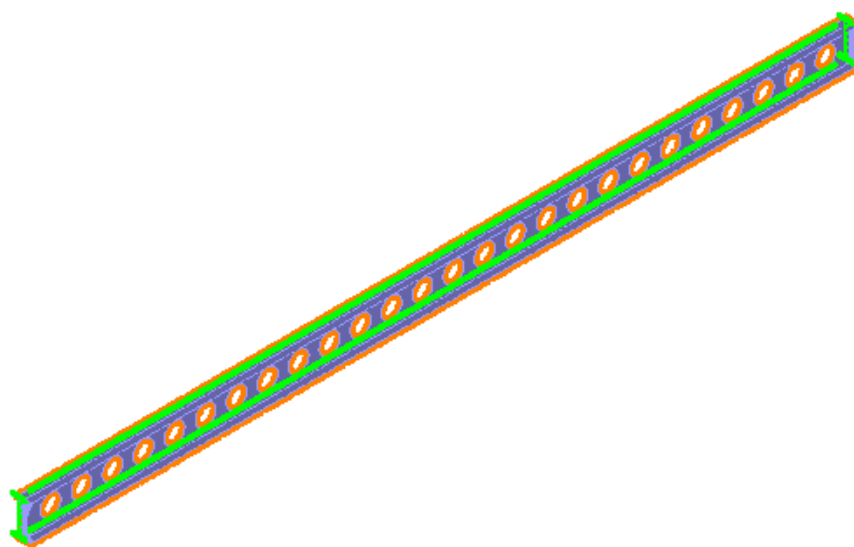
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται αμφιέριστη δοκός που είναι πλευρικά εξασφαλισμένη στη συναρμογή κορμού με το άνω και κάτω πέλμα σε όλο το μήκος της, ώστε ο πλευρικός λυγισμός να μην αποτελεί πιθανή μορφή αστοχίας. Οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν είναι άρθρωση στο αριστερό άκρο και κύλιση στο δεξί (Σχήμα 4-7). Η επιβολή των συνοριακών συνθηκών γίνεται μέσω άκαμπτων στοιχείων, που είναι αναγκαία για αυτές τις συνοριακές συνθήκες. Η εφαρμογή της συνοριακής συνθήκης γίνεται στον κεντρικό κόμβο της διατομής στήριξης για τον οποίο έχει δημιουργηθεί μία ομάδα κόμβων (node set). Σ' αυτή την ομάδα κόμβων επιβάλλεται η συνοριακή

συνθήκη στήριξης (άρθρωση ή κύλιση). Ο κόμβος αυτός ενώνεται με τη διατομή στήριξης της δοκού, στην οποία έχει δημιουργηθεί μία δεύτερη ομάδα κόμβων με τους υπόλοιπους κόμβους της διατομής στήριξης, μέσω άκαμπτων στοιχείων (άπειρη δυσκαμψία), τα οποία καλούνται "rigid links". Ακολούθως, η δοκός εξασφαλίζεται πλευρικά στο άνω και κάτω πέλαμα σε όλο το μήκος της (Σχήμα 4-8).



	U_1	U_2	U_3	θ_1	θ_2	θ_3
B	/	/	-	/	/	/
C	/	-	-	/	/	/
D	-	-	-	-	/	/
E	C	C	C	C	C	C

Σχήμα 4-7: Επιβολή συνωριακής συνθήκης στη διατομή στήριξης μέσω άκαμπτων στοιχείων (rigid links)



	U_1	U_2	U_3	θ_1	θ_2	θ_3
B	/	/	-	/	/	/
C	/	-	-	/	/	/
D	-	-	-	-	/	/
E	C	C	C	C	C	C

Σχήμα 4-8: Συνθήκες στήριξης και πλευρική εξασφάλιση κατά μήκος της δοκού

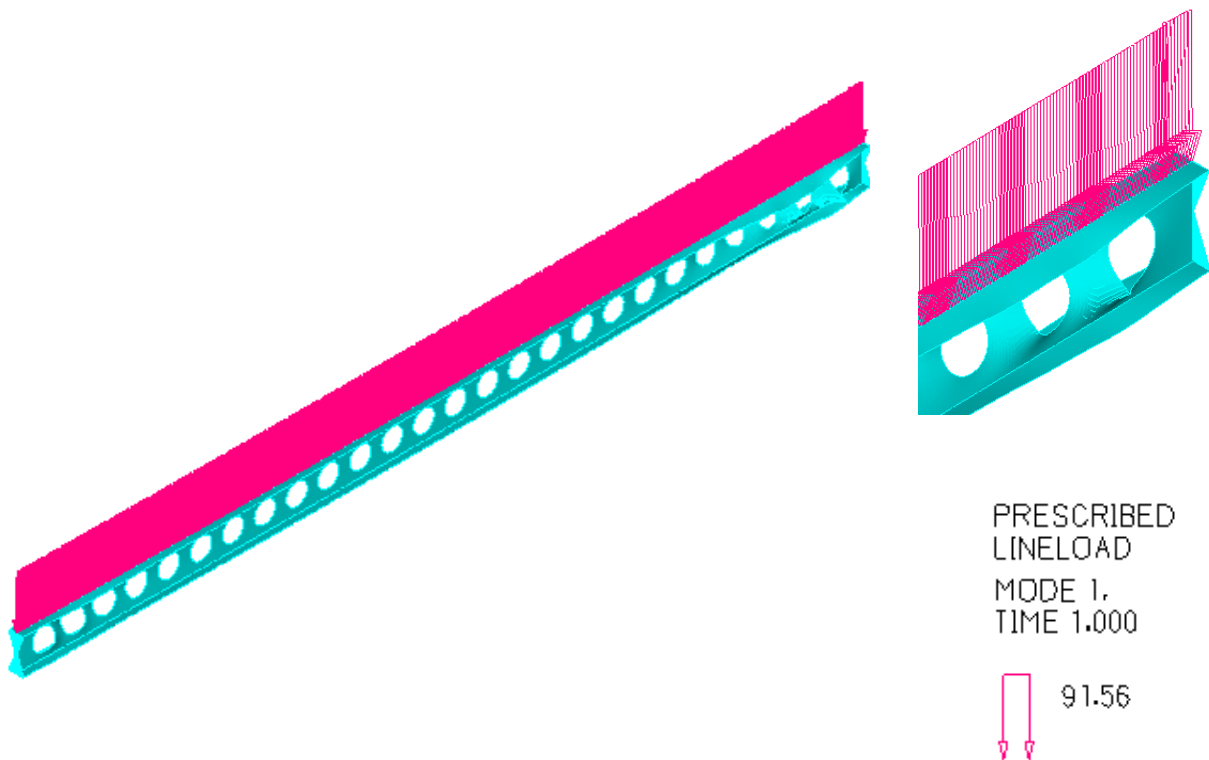
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

Το παράδειγμα της δοκού που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.8 του προηγούμενου Κεφαλαίου προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ADINA και επιλύθηκε σε γραμμική ανάλυση λυγισμού και σε μη γραμμικές αναλύσεις. Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι τιμές του φορτίου λυγισμού της δοκού (P_{cr})

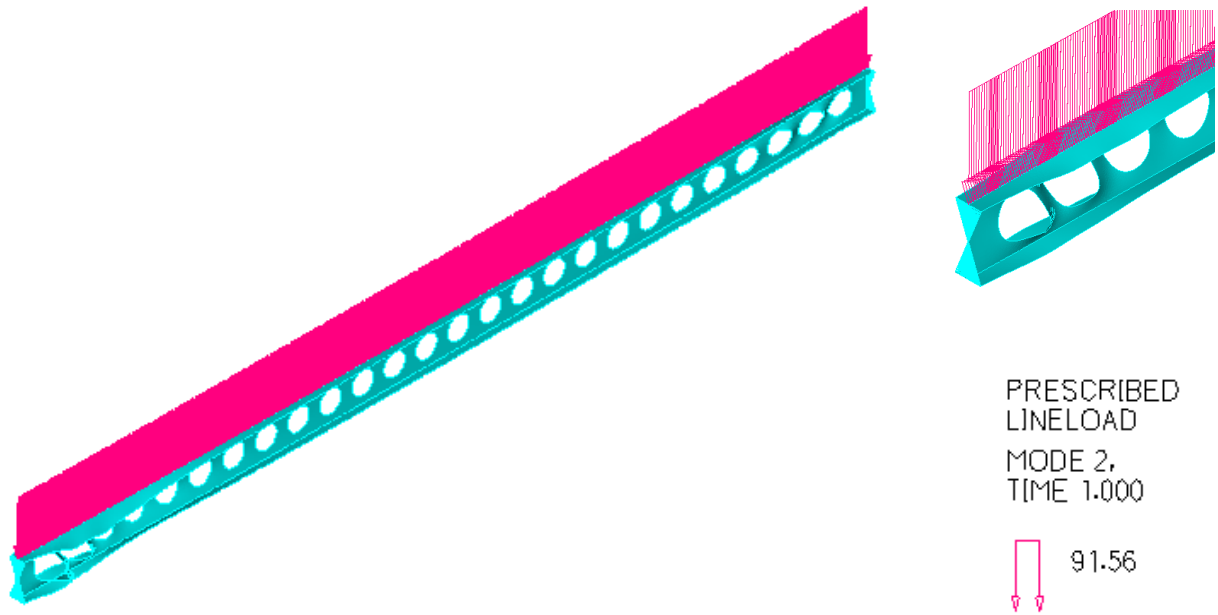
για τις πρώτες 6 ιδιομορφές και στο Σχήμα 4-9 έως το Σχήμα 4-14 απεικονίζονται οι πρώτες 6 ιδιομορφές λυγισμού, οι οποίες είναι ανά δύο αντισυμμετρικές. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr} = 91.56 \text{ kN/m}$ και η κρίσιμη μορφή αστοχίας σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή είναι ο τοπικός λυγισμός κορμού και πέλματος κοντά στην στήριξη.

Πίνακας 4-1: Φορτίο λυγισμού δοκού για τις πρώτες ιδιομορφές

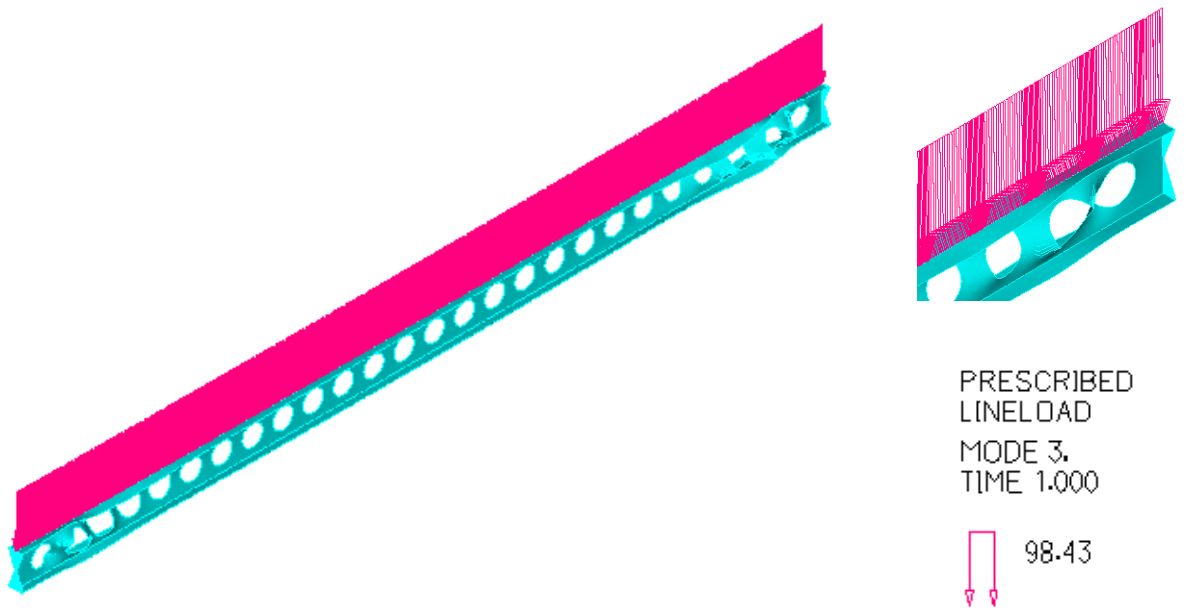
Ιδιομορφή λυγισμού	Φορτίο λυγισμού P_{cr} (kN/m)
1 ^η	91.56
2 ^η	91.56
3 ^η	98.43
4 ^η	98.43
5 ^η	104.8
6 ^η	104.8



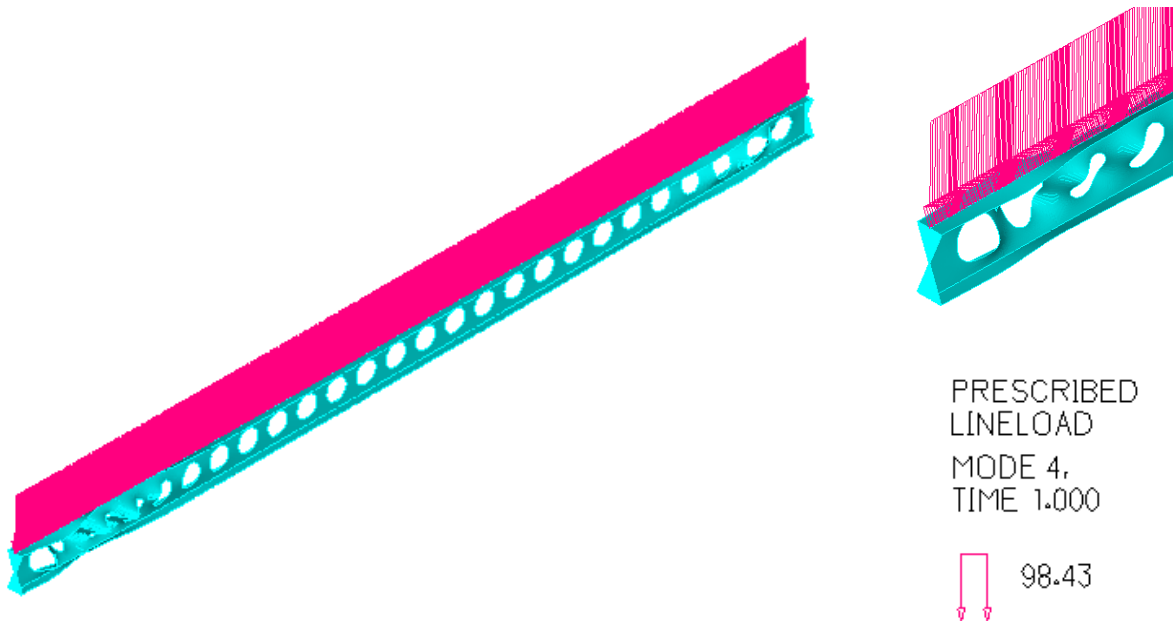
Σχήμα 4-9: 1^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



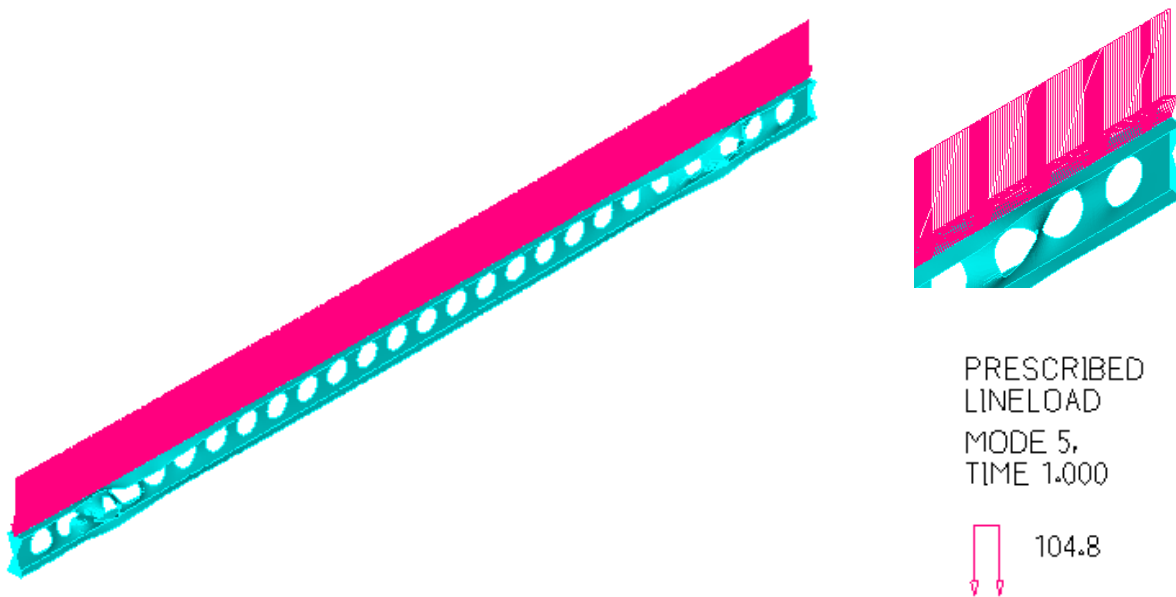
Σχήμα 4-10: 2^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



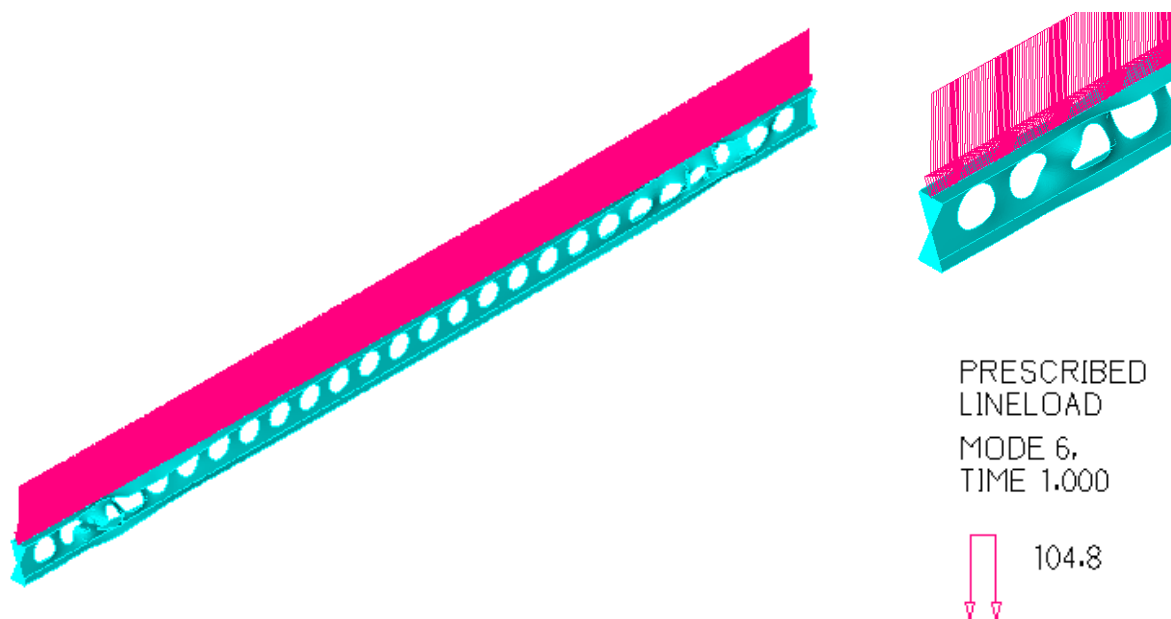
Σχήμα 4-11: 3^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



Σχήμα 4-11: 4^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



Σχήμα 4-11: 5^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



Σχήμα 4-11: 6^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

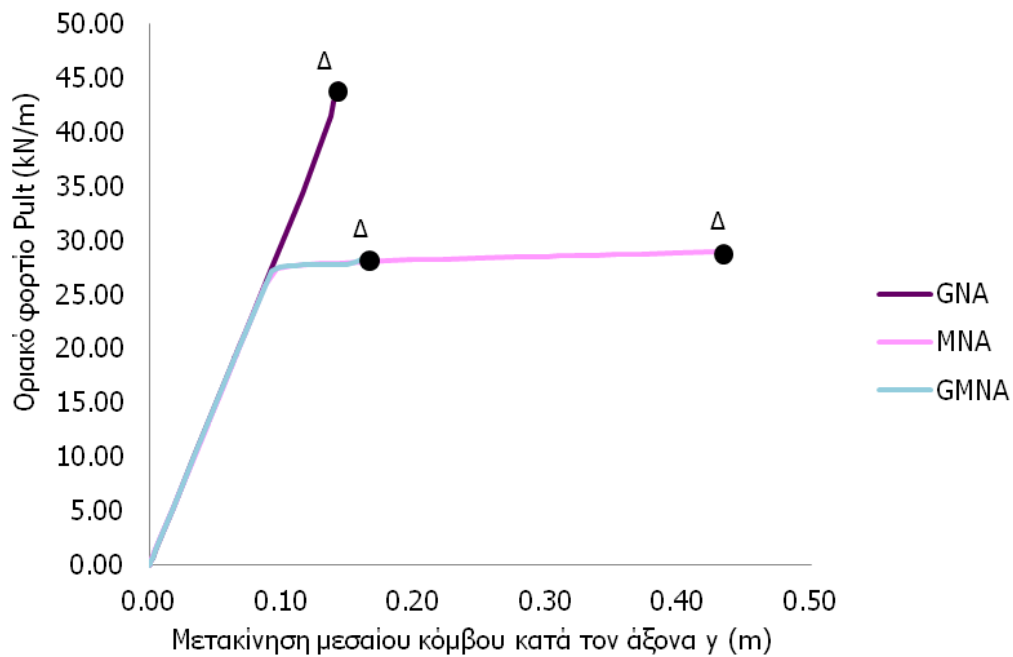
4.3.1 Επιρροή μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού

Κατά την επιβολή ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου στο άνω πέλμα της δοκού αναμένονται μεγαλύτερες μετακινήσεις λόγω της παρουσίας των διακένων. Αρχικά, θα διερευνηθεί η επιρροή της μη γραμμικότητας της γεωμετρίας στην απόκριση της δοκού και ακολούθως η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού. Για τις μη γραμμικές αναλύσεις υιοθετείται η μέθοδος arc-length (Collapse Analysis), η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση εντόνων μη-γραμμικών προβλημάτων και θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος. Για τη διερεύνηση της επιρροής πραγματοποιούνται τρεις τύποι μη γραμμικών αναλύσεων:

- Μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας (GNA), λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας.
- Μη γραμμικές αναλύσεις υλικού (MNA), λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη μη γραμμικότητα του υλικού.
- Μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας (GMNA), συνυπολογίζοντας τόσο τη μη γραμμικότητα του υλικού όσο και τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας.

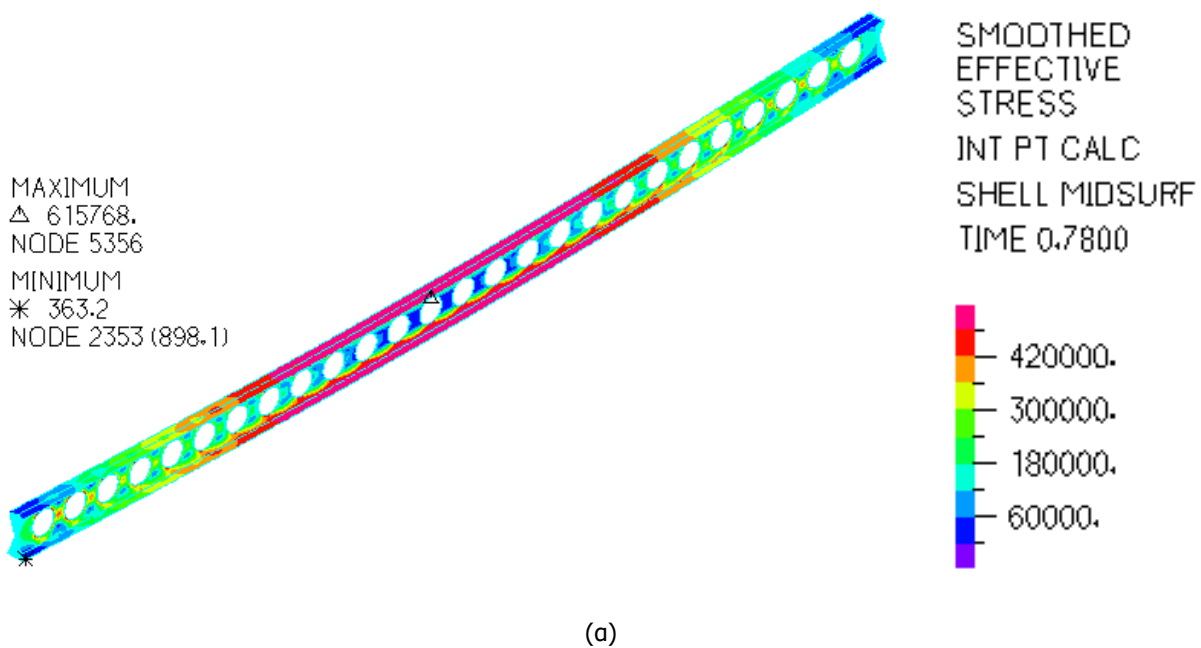
Σκοπός των αναλύσεων είναι να εξετασθεί κατά πόσο είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

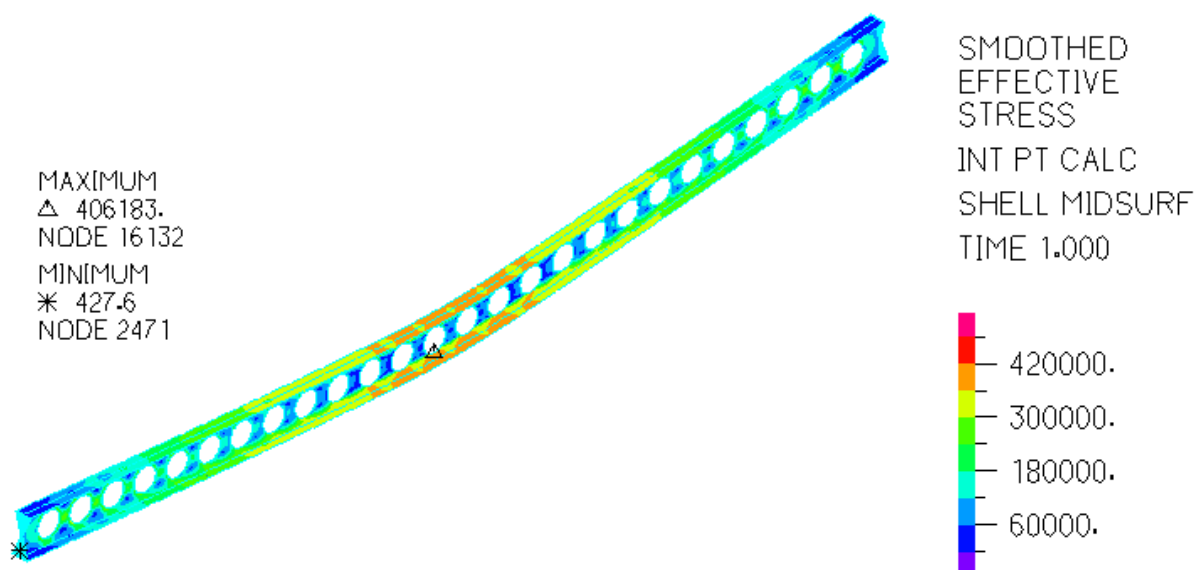
Στο Σχήμα 4-15 παρουσιάζεται η μετακίνηση (y) στο μεσαίο κόμβο της δοκού συναρτήσει του οριακού φορτίου (P_{ult}), όπου παρατηρείται μείωση του οριακού φορτίου και της δυνατότητας ανάπτυξης μετακινήσεων πριν την αστοχία για τη συνδυασμένη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Η μη γραμμικότητα του υλικού επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της δοκού, καθώς μειώνει το οριακό φορτίο και η παράλειψη της οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται από το δρόμο ισορροπίας για τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA).



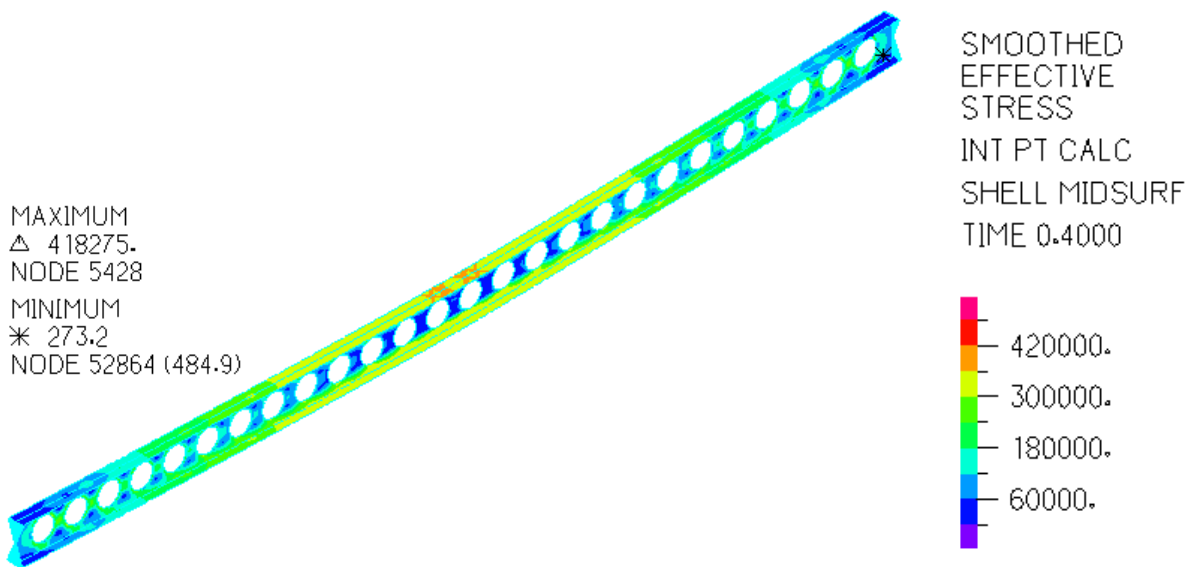
Σχήμα 4-15: Δρόμος ισορροπίας δοκού για μη γραμμικές αναλύσεις GNA, MNA, GMNA

Στο Σχήμα 4-16 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises στο Σημείο Δ (Σημείο αστοχίας) για τους τρεις τύπους μη γραμμικών αναλύσεων. Η συγκέντρωση των τάσεων αυξάνεται στο μέσο της δοκού περιφερειακά από το κυκλικό διάκενο. Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο η μη-γραμμικότητα της γεωμετρίας (GNA) η μέγιστη τιμή της τάσης είναι υψηλότερη και οφείλεται στο γεγονός πως δεν λαμβάνεται υπόψη η μη-γραμμικότητα του υλικού. Αντίθετα, όταν λαμβάνεται υπόψη η μη-γραμμικότητα του υλικού (MNA και GMNA) η μέγιστη τιμή των τάσεων ελαττώνεται.





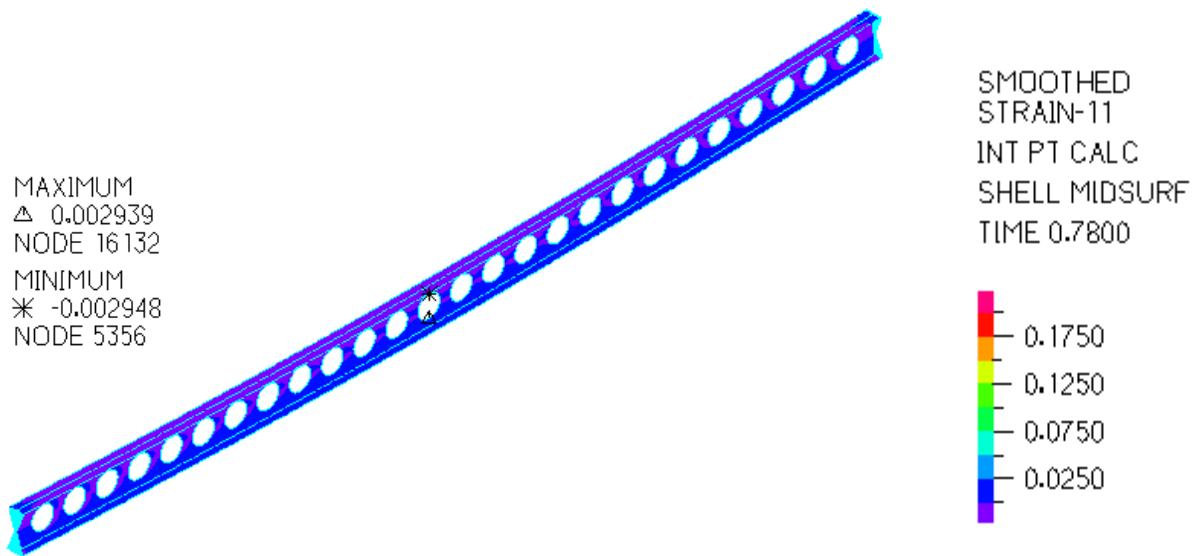
(β)



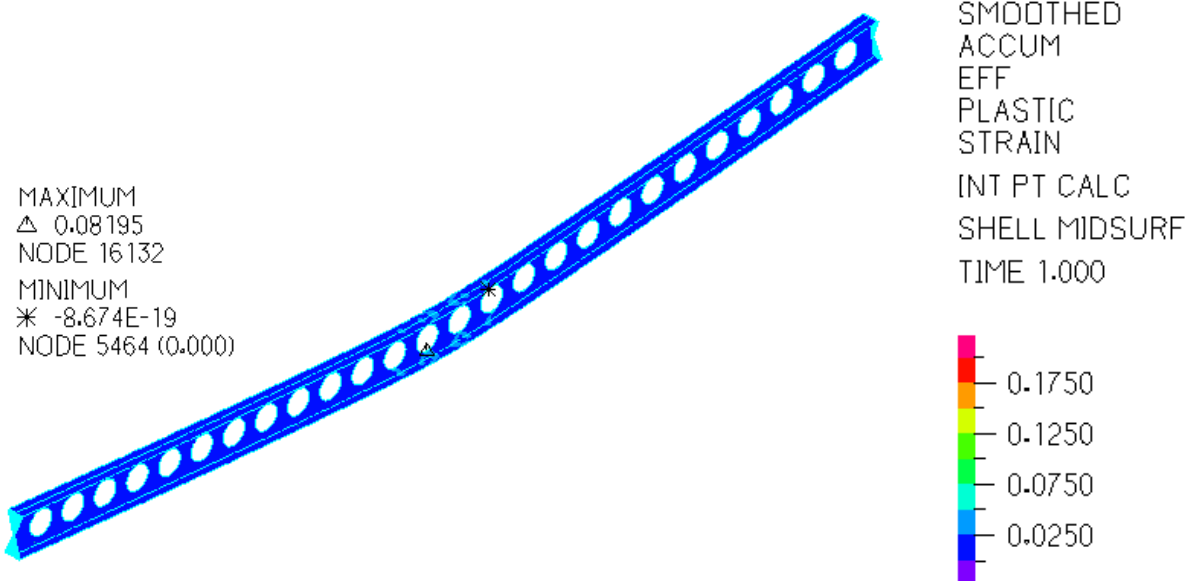
(γ)

Σχήμα 4-16: Κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο Δ για (α)GNA, (β)MNA και (γ)GMNA

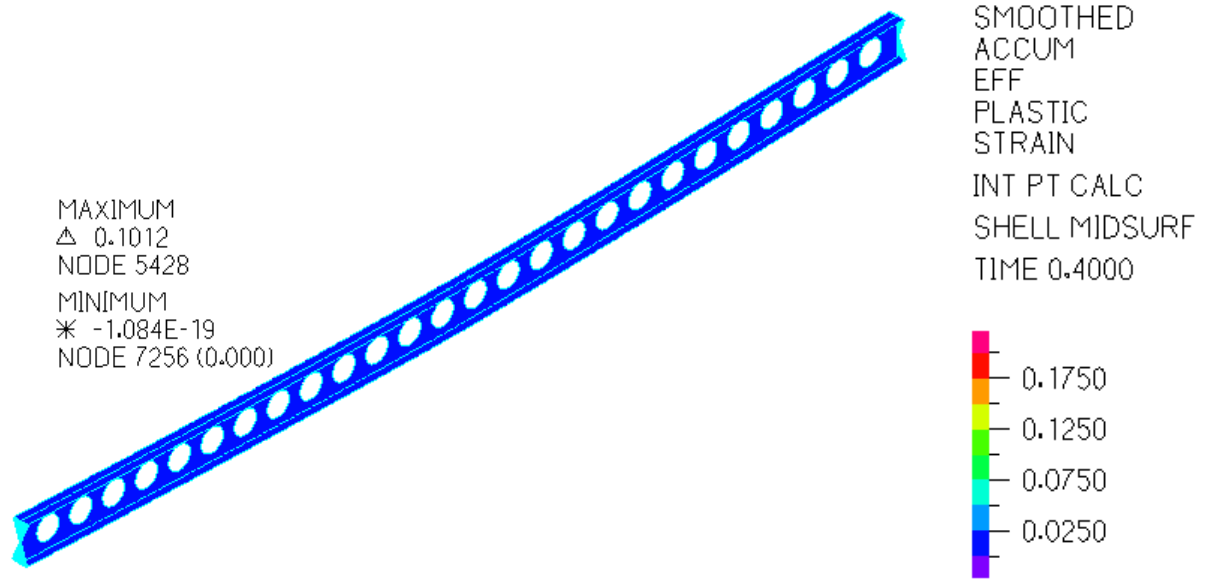
Στο Σχήμα 4-17 απεικονίζεται η παραμορφωμένη εικόνα της δοκού στο Σημείο Δ και για τους τρεις τύπους μη γραμμικών αναλύσεων και παρατηρείται πως η μέγιστη απόλυτη τιμή της παραμόρφωσης αναπτύσσεται πάνω ή κάτω από το διάκενο της μεσαίας διατομής της δοκού. Στο σχήμα 4-18 παρουσιάζεται η πλαστικοποίηση της διατομής κατά μήκος της δοκού για μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA) και συνδυασμένη μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNA). Στις δύο μη γραμμικές αναλύσεις η δοκός έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή γύρω από τα μεσαία διάκενα, στα οποία έχει παρατηρηθεί και η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων.



(a)

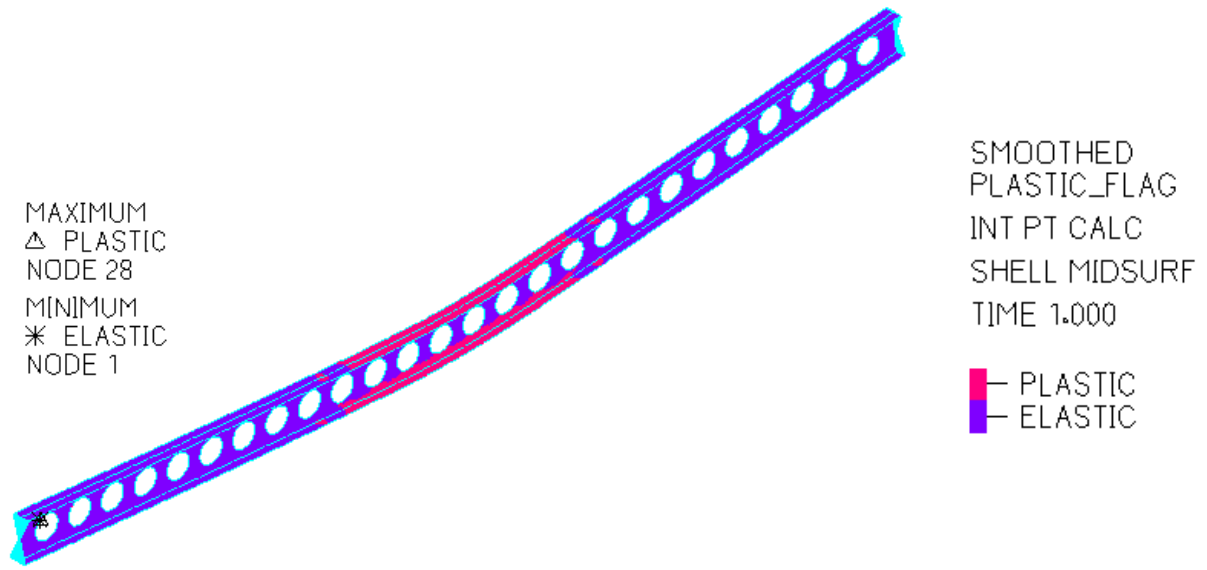


(β)

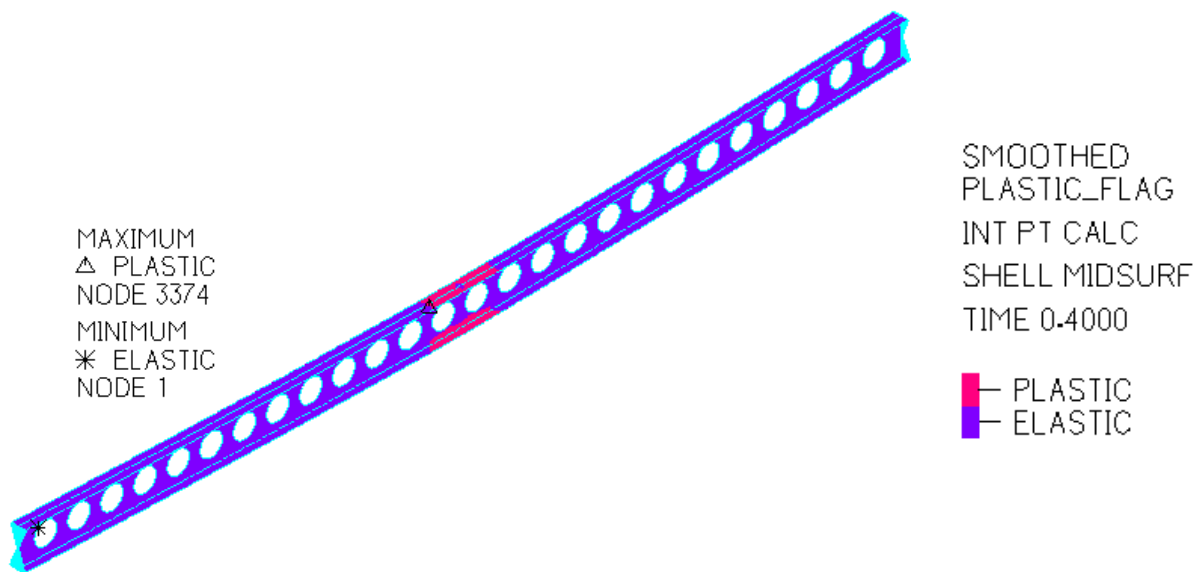


(γ)

Σχήμα 4-17: Κατανομή παραμορφώσεων στο σημείο Δ για (α)GNA, (β)MNA και (γ)GMNA



(α)



(β)

Σχήμα 4-18: Περιοχή πλαστικοποίησης στο σημείο Δ για (α)MNA και (β)GMNA

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγεται η ανάλυση της δοκού με διάκενα κορμού να πραγματοποιηθεί με μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ή χωρίς αρχικές ατέλειες, η οποία προσεγγίζει ακριβέστερα την πραγματικότητα.

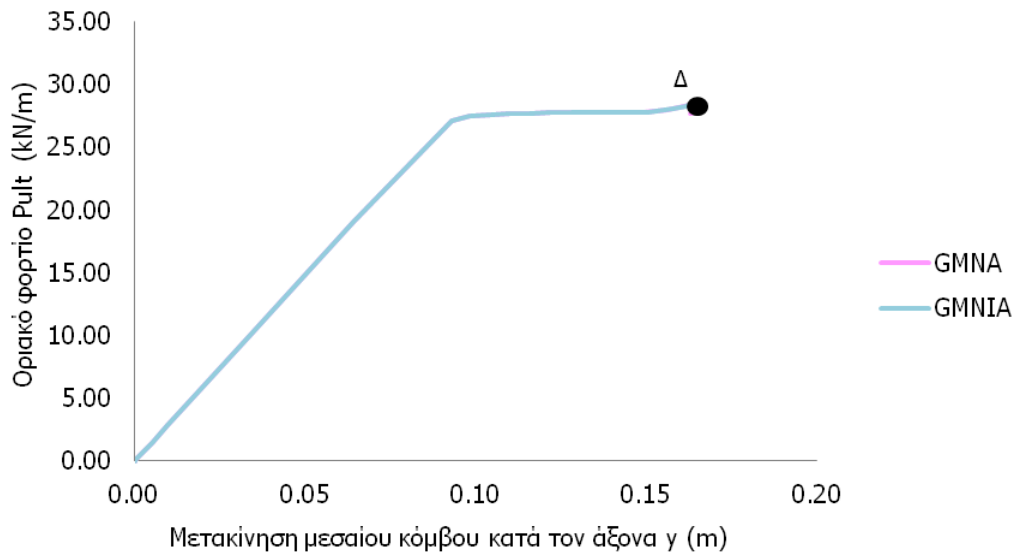
4.3.2 Επιρροή αρχικής ατέλειας

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η επίδραση της εισαγωγής αρχικής ατέλειας (ε) στο φορέα και η επιρροή του μεγέθους της στην απόκριση της δοκού με κυκλικά διάκενα στον κορμό. Το μέγεθος της αρχικής ατέλειας δόθηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 και η τιμή της είναι $\varepsilon_{0,d} = \frac{t_w}{10} = 0.00075$ m. Η

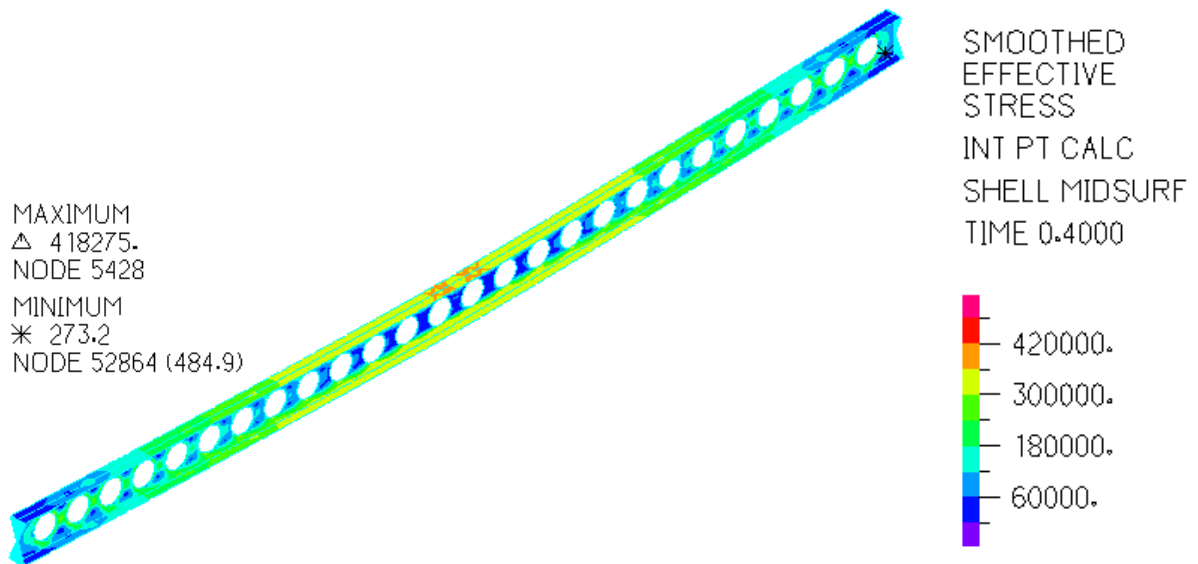
απόκριση της δοκού διερευνήθηκε για τρεις τιμές αρχικής ατέλειας: (α) $\varepsilon_1 = \frac{t_w}{20} = 0.000375$ m, (β) ε_2

$= \frac{t_w}{10} = 0.00075$ m και (γ) $\varepsilon_3 = \frac{t_w}{5} = 0.0015$ m. Στο Σχήμα 4-19 απεικονίζεται η μετακίνηση του

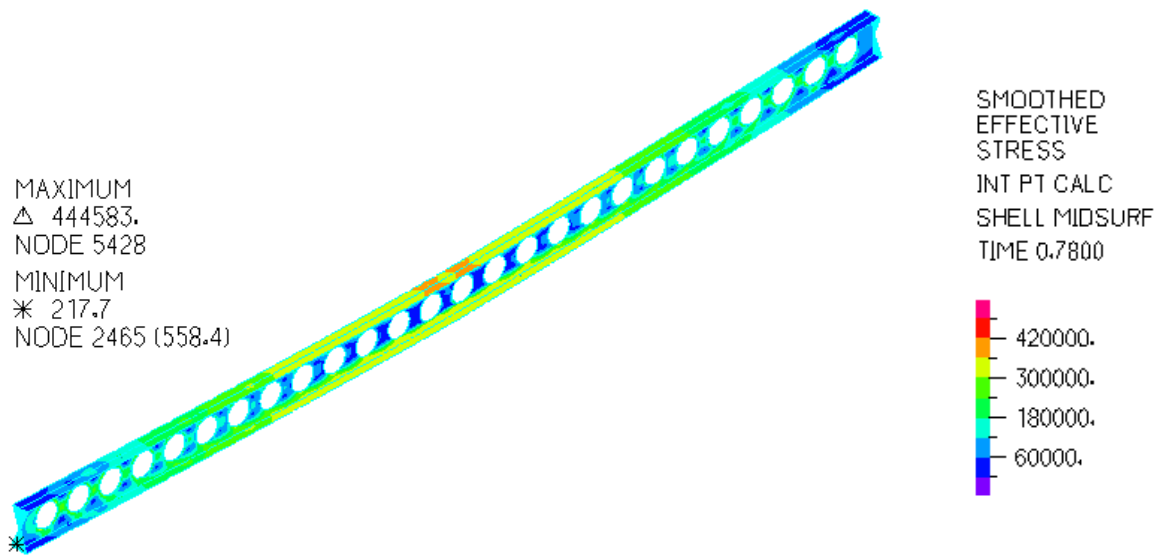
μεσαίου κόμβου της δοκού κατά τον άξονα y συναρτήσει του οριακού φορτίου για αναλύσεις συνδυασμένης μη-γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ή χωρίς αρχικές ατέλειες, με μέγεθος αρχικής ατέλειας $\varepsilon = 0.00075$ m. Η αρχική ατέλεια εισάγεται στη δοκό σύμφωνα με τη μορφή της 1^{ης} Ιδιομορφής λυγισμού. Η εισαγωγή της αρχικής ατέλειας δεν επηρεάζει την απόκριση του φορέα όσον αφορά το οριακό φορτίο (Σχήμα 4-19). Στο Σχήμα 4-20 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού. Η εισαγωγή της αρχικής ατέλειας δεν επηρεάζει την κατανομή των τάσεων κατά μήκος της δοκού, καθώς παρατηρείται πως κυμαίνονται στο ίδιο εύρος τιμών. Επίσης, η εισαγωγή της αρχικής ατέλειας δεν επηρεάζει την κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού (Σχήμα 4-21) και την ανάπτυξη της περιοχής πλαστικοποίησης (Σχήμα 4-22).



Σχήμα 4-19: Δρόμος ισορροπίας δοκού για μη γραμμικές αναλύσεις GMNA και GMNIA

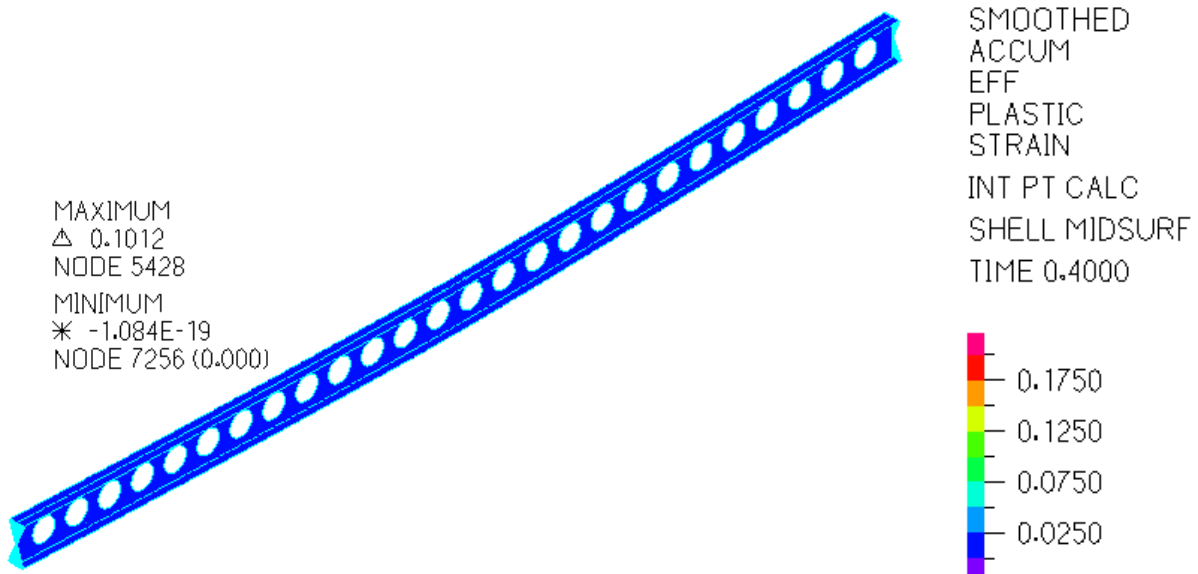


(a)

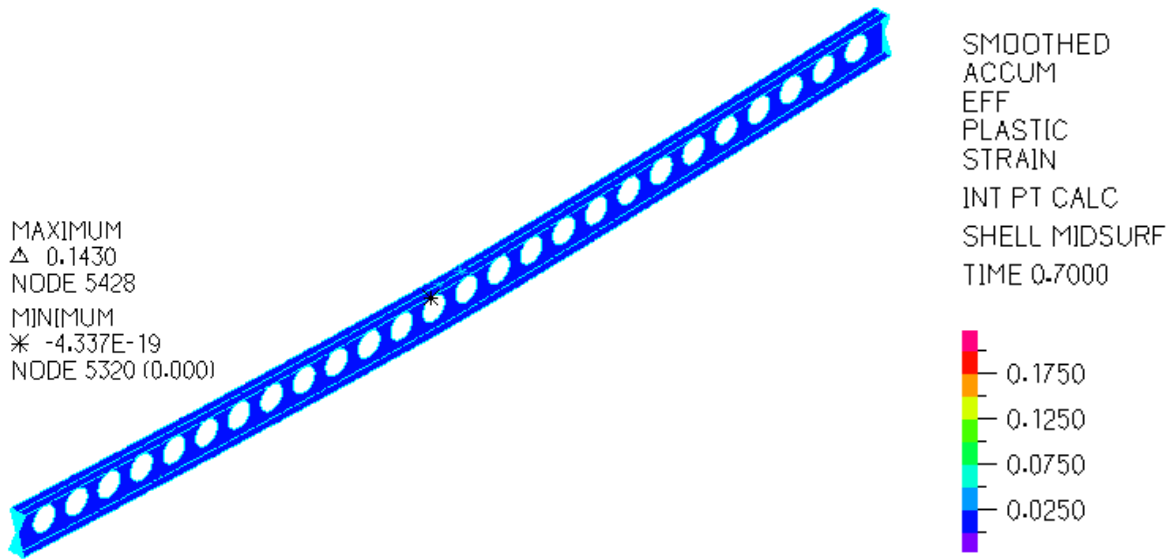


(β)

Σχήμα 4-20: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ για (α) GMNA και (β) GMNIA

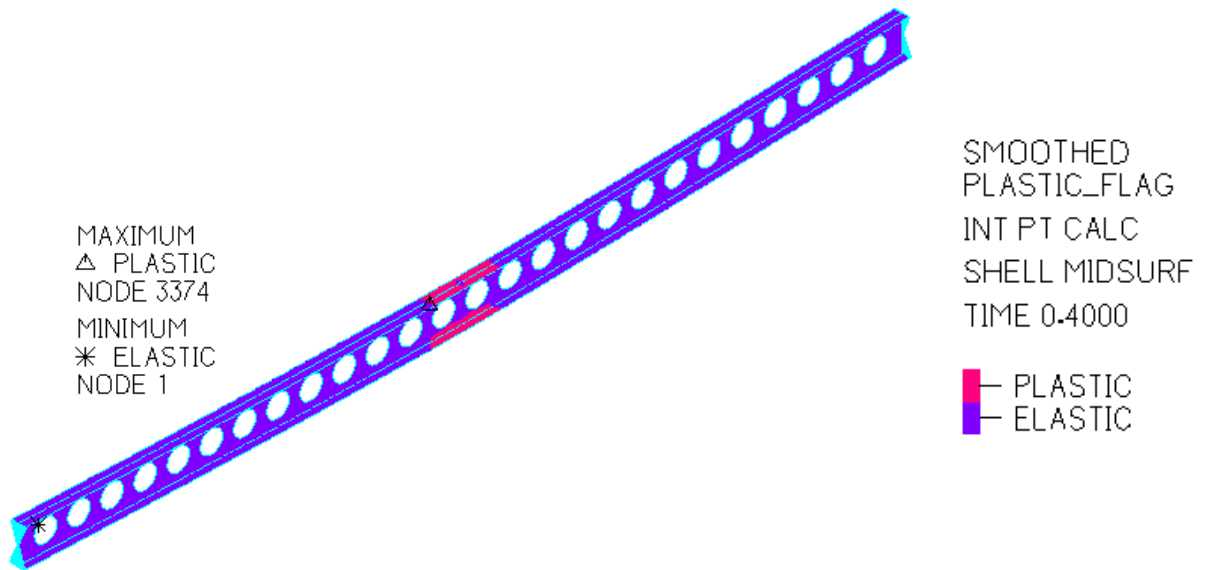


(α)

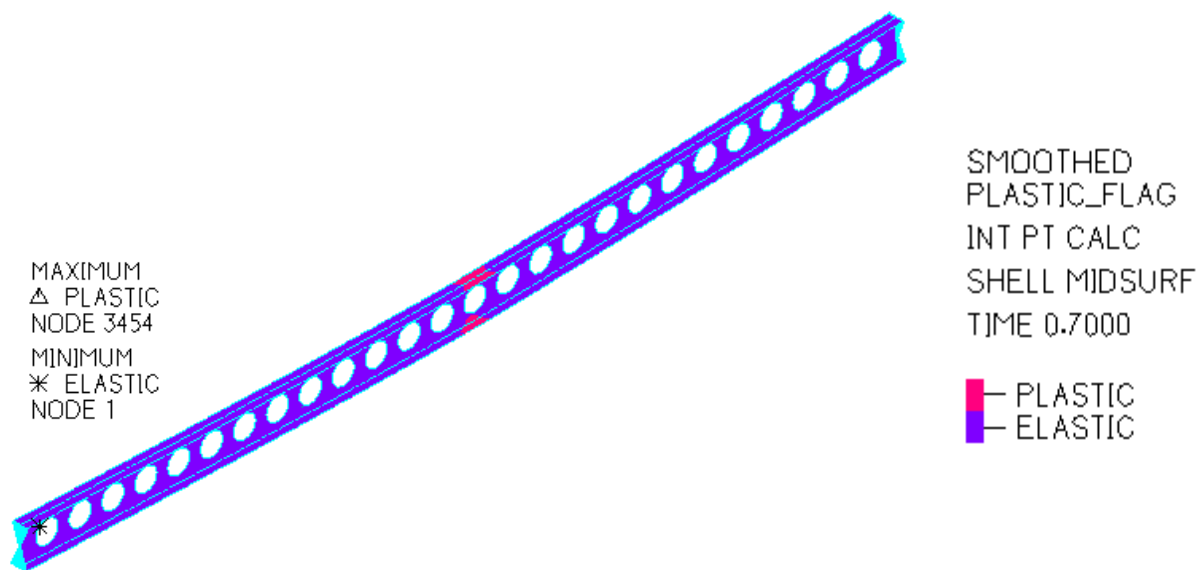


(β)

Σχήμα 4-21: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ για (α) GMNA και (β) GMNIA



(α)



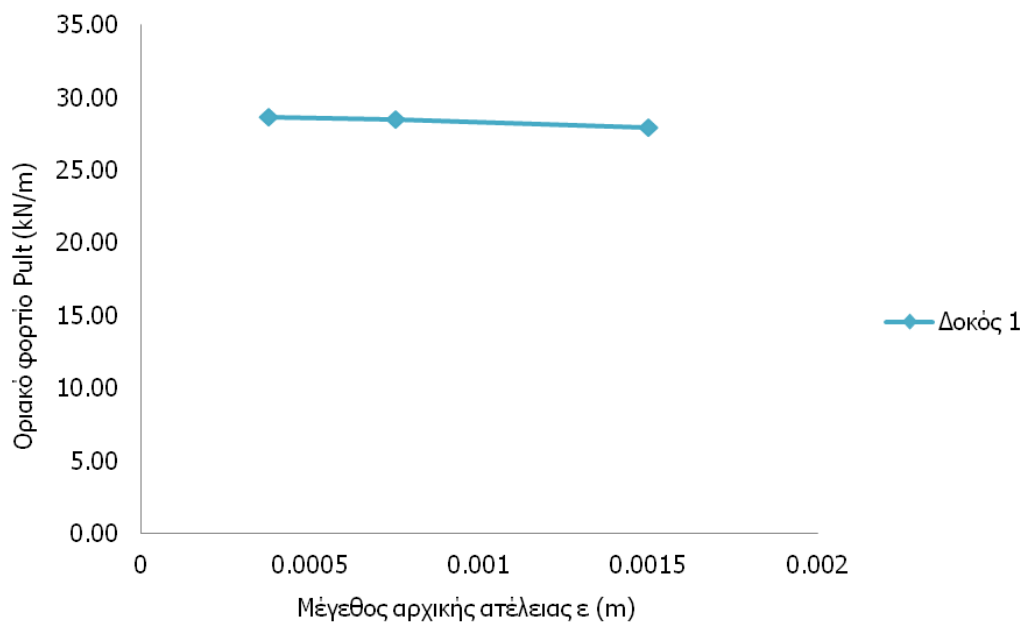
(β)

Σχήμα 4-22: Περιοχή πλαστικοποίησης στο σημείο 3 σε μη γραμμική ανάλυση (α)GMNA και (β)GMNIA

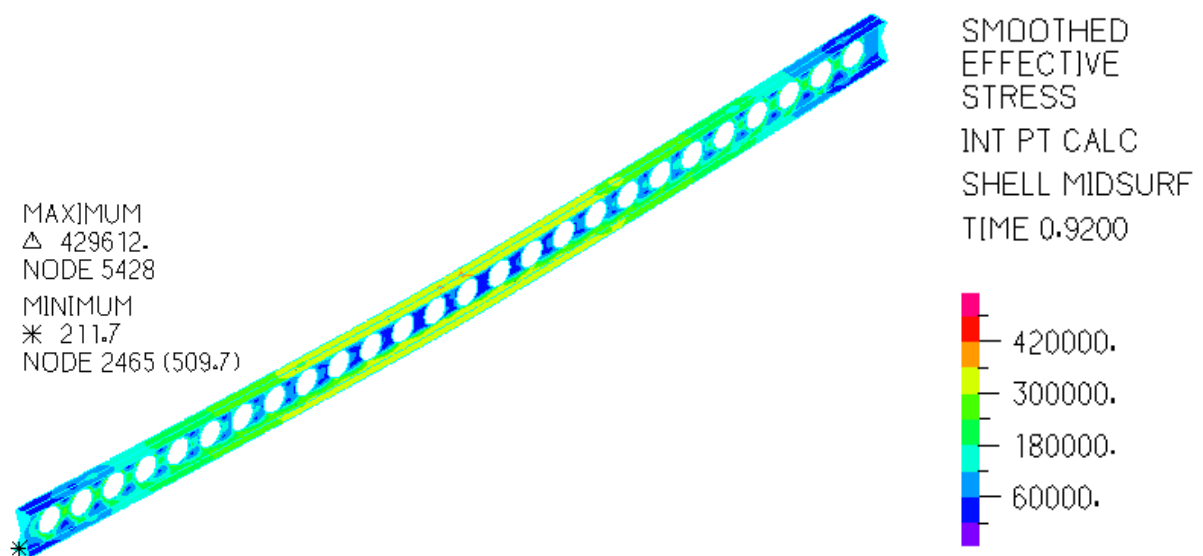
Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζεται η τιμή του οριακού φορτίου συναρτήσει του μεγέθους της αρχικής ατέλειας. Στο σχήμα 4-23 παρουσιάζεται η επίδραση του μεγέθους της αρχικής ατέλειας (ϵ) στην απόκριση της δοκού για τις τρεις χαρακτηριστικές τιμές. Το μέγεθος της ατέλειας δεν επηρεάζει την τιμή του οριακού φορτίου, την κατανομή των τάσεων κατά μήκος της δοκού (Σχήμα 4-24) και την παραμόρφωση της (Σχήμα 4-25). Στο Σχήμα 4-24 έως το Σχήμα 4-26 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Το μέγεθος της αρχικής ατέλειας δεν επηρεάζει την κατανομή των τάσεων. Επιπλέον δεν επηρεάζει την κατανομή των παραμορφώσεων (Σχήμα 4-27 έως Σχήμα 4-29) και την περιοχή πλαστικοποίησης (Σχήμα 4-30 έως Σχήμα 4-32). Εφόσον το μέγεθος της ατέλειας δεν επηρεάζει την απόκριση της δοκού, υιοθετείται ως τύπος ανάλυσης η συνδυασμένη μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας με αρχική ατέλεια, μεγέθους $\epsilon = 0.00075$ m, η οποία προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.

Πίνακας 4-2: Οριακό φορτίο δοκού για κάθε περίπτωση μεγέθους αρχικής ατέλειας

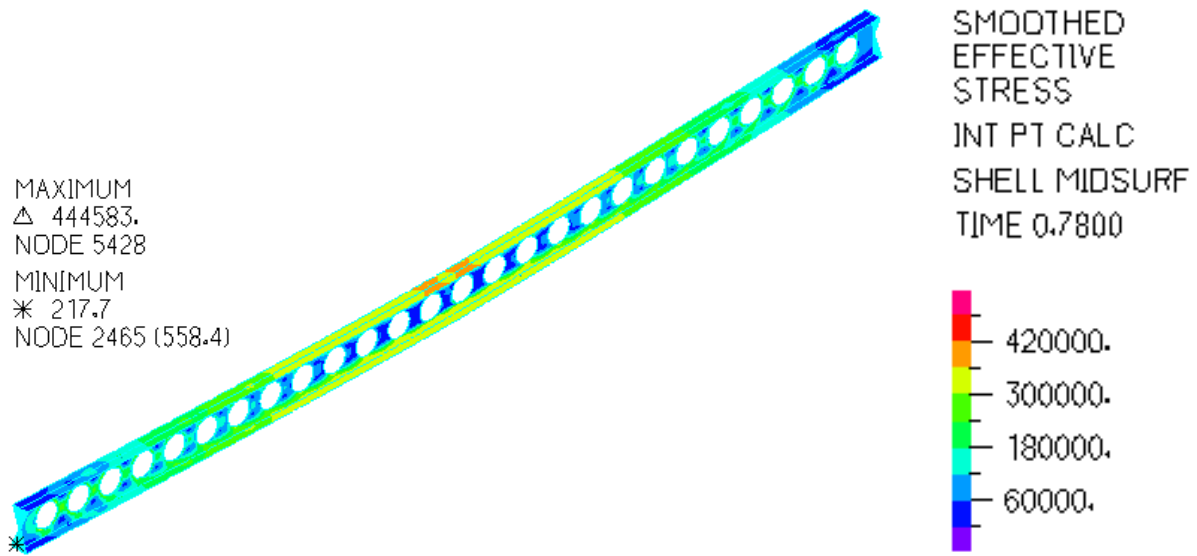
Μέγεθος αρχικής ατέλειας ϵ (m)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
0.000375	28.66
0.00075	28.52
0.0015	27.95



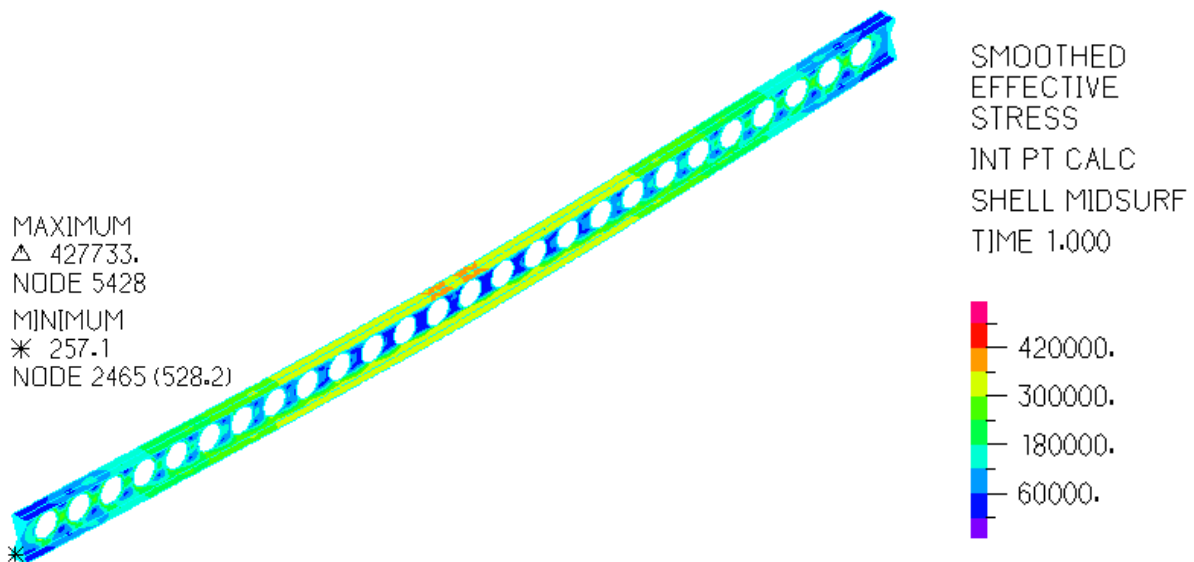
Σχήμα 4-23: Μεταβολή οριακού φορτίου δοκού συναρτήσει του μεγέθους της αρχικής ατέλειας



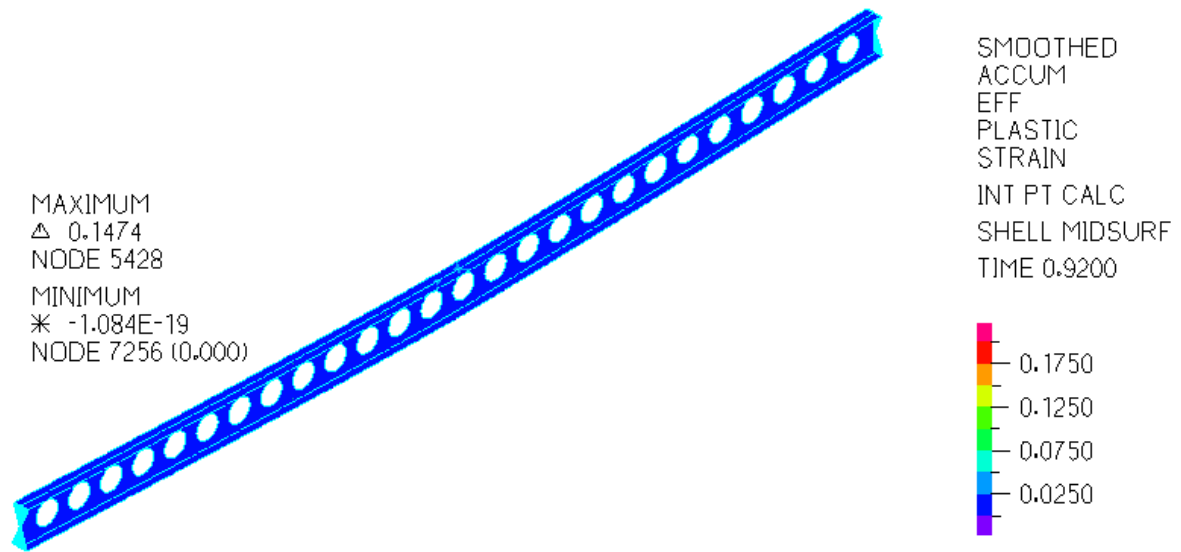
Σχήμα 4-24: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $\epsilon = 0.000375$ m



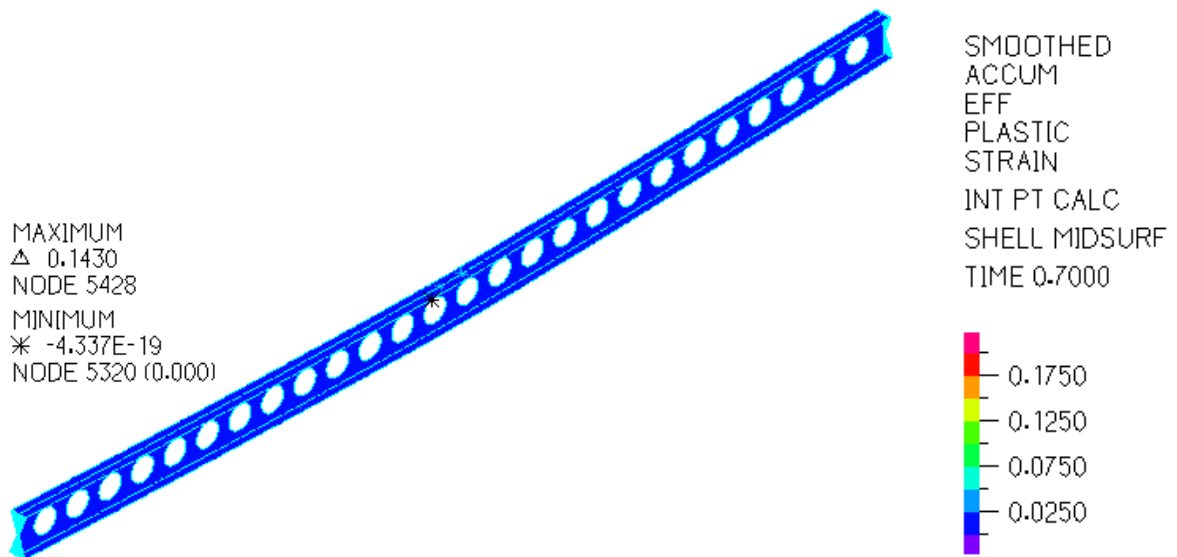
Σχήμα 4-25: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $\epsilon = 0.00075$ m



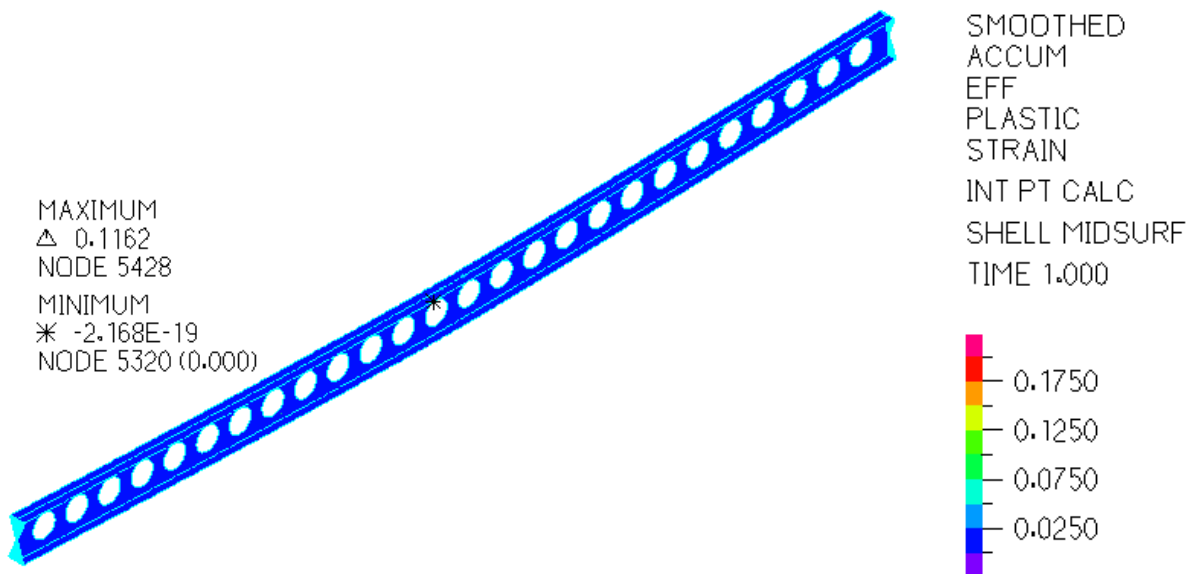
Σχήμα 4-26: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $\epsilon = 0.0015$ m



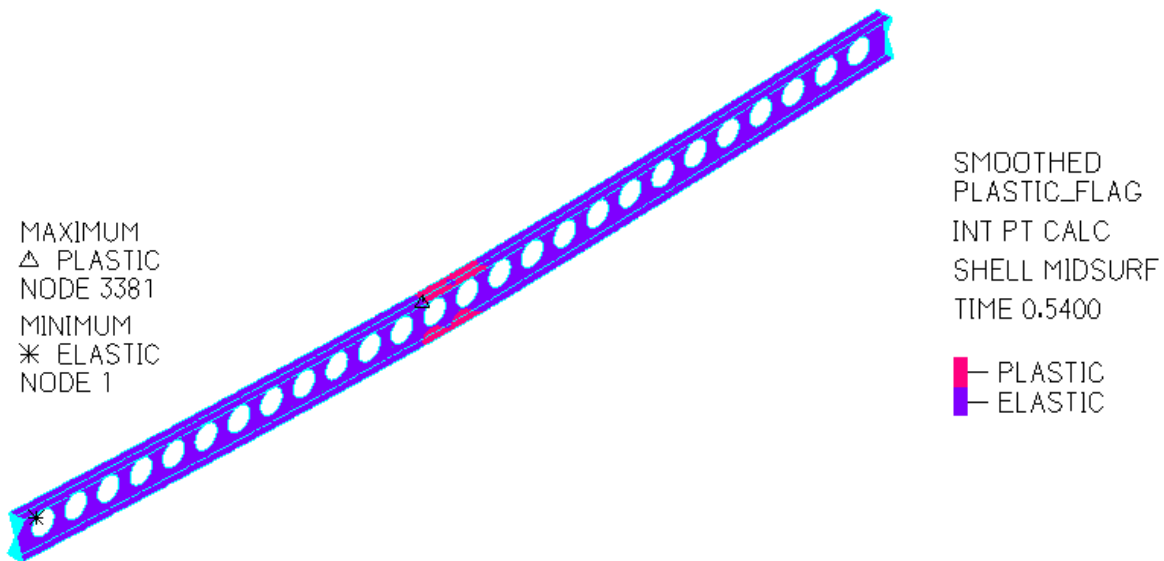
Σχήμα 4-27: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $\epsilon = 0.000375$ m



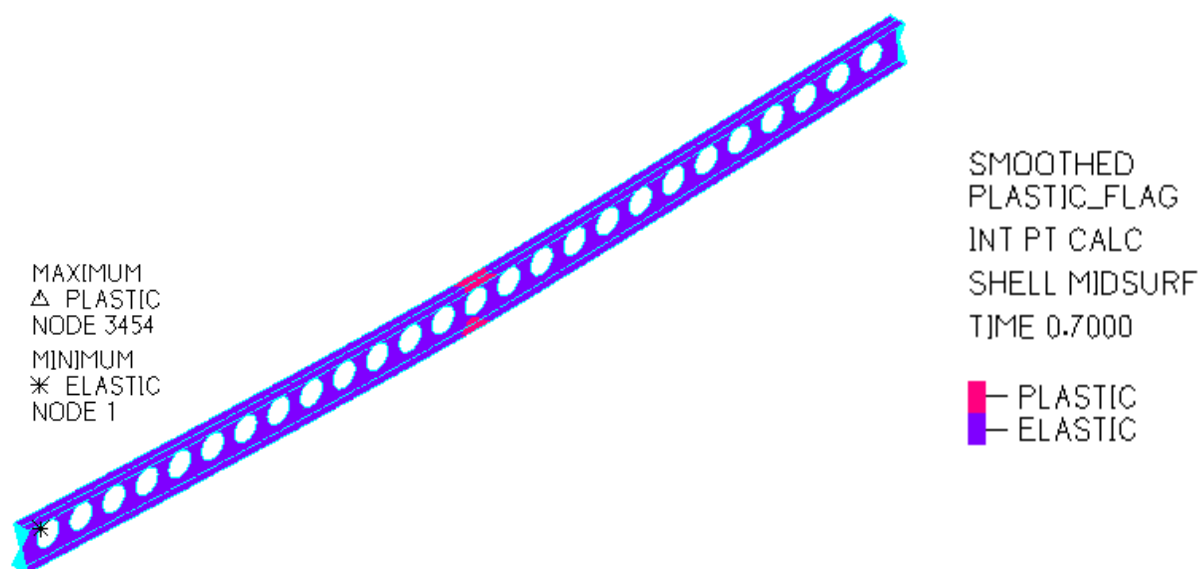
Σχήμα 4-28: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $\epsilon = 0.00075$ m



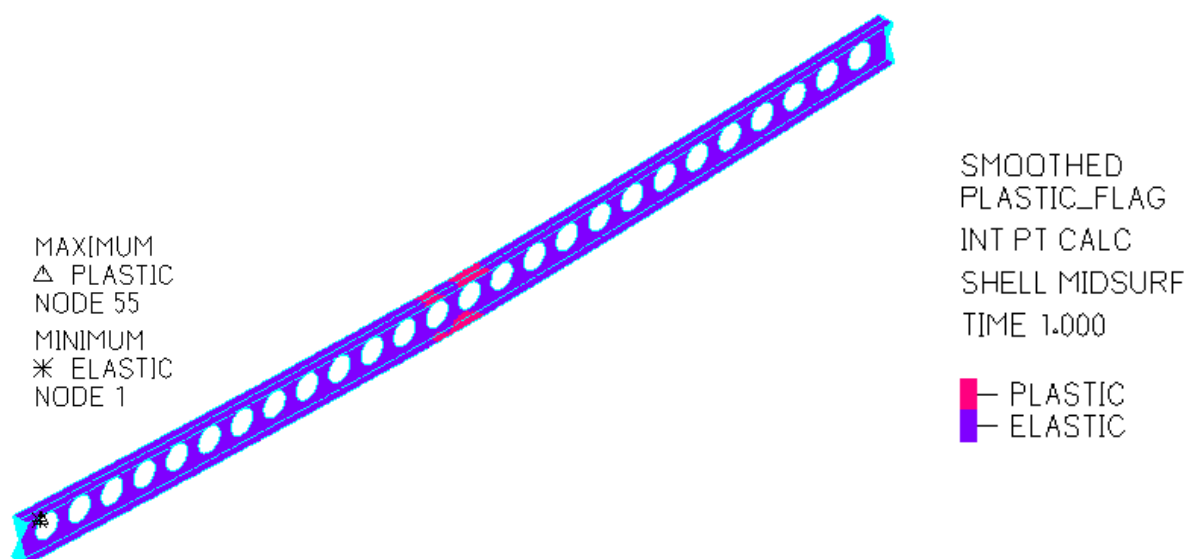
Σχήμα 4-29: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $\varepsilon = 0.0015$ m



Σχήμα 4-30: περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $\varepsilon = 0.000375$ m



Σχήμα 4-31: περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $\epsilon = 0.00075$ m



Σχήμα 4-32: περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $\epsilon = 0.0015$ m

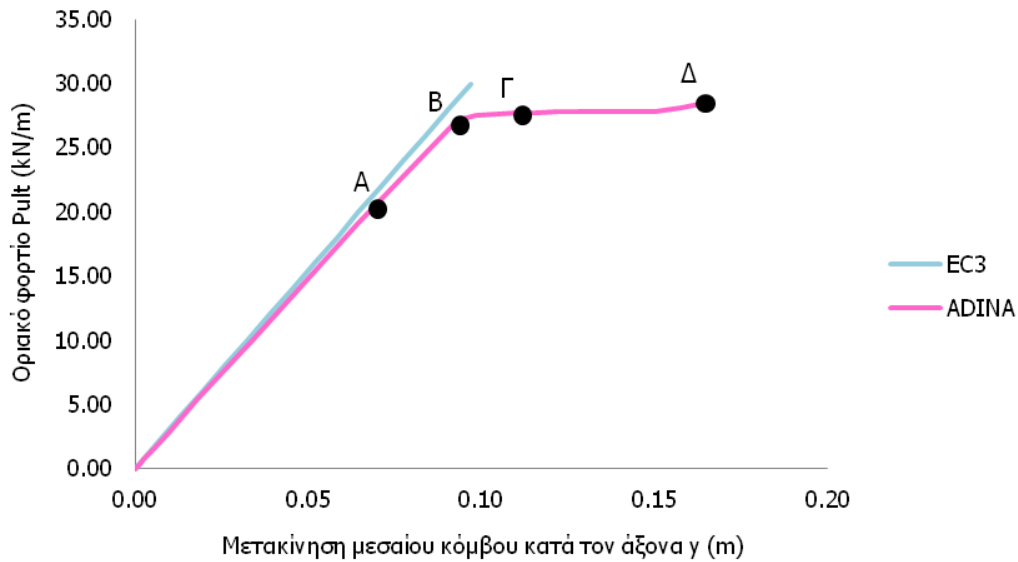
4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και των κανονιστικών διατάξεων σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 για τη δοκό που μελετήθηκε στην Παράγραφο 3.8. Από τον Πίνακα 4-3 και το Σχήμα 4-33 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ταυτίζονται οριακά με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και προσεγγίζουν σωστά την απόκριση της δοκού. Σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13, η δοκός αστοχεί μόλις συμβεί η πρώτη διαρροή, ενώ όπως φαίνεται από το δρόμο ισορροπίας των μη γραμμικών αναλύσεων, η δοκός μετά την πρώτη διαρροή συνεχίζει να παραμορφώνεται με μία μικρή αύξηση του φορτίου και ύστερα αστοχεί. Από τον υπολογισμό του οριακού φορτίου της δοκού (P_{ult}) σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 διαπιστώνεται ότι η κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι η

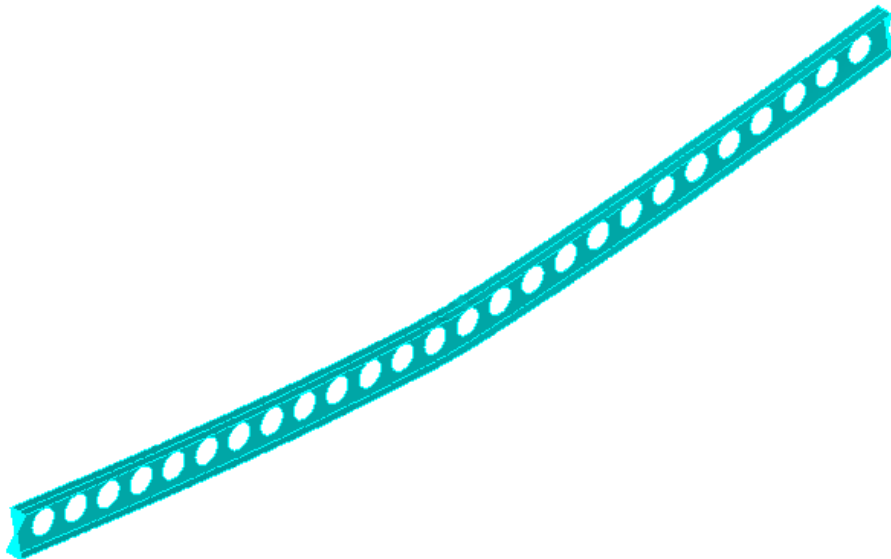
αστοχία από κάμψη της δοκού. Στο Σχήμα 4-34 απεικονίζεται η παραμορφωμένη εικόνα της δοκού στο τελικό βήμα των αριθμητικών αναλύσεων και η αστοχία έχει προέλθει από ελαστοπλαστικό λυγισμό του άνω πέλματος καθώς έχει συμβεί διαρροή από κάμψη.

Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου

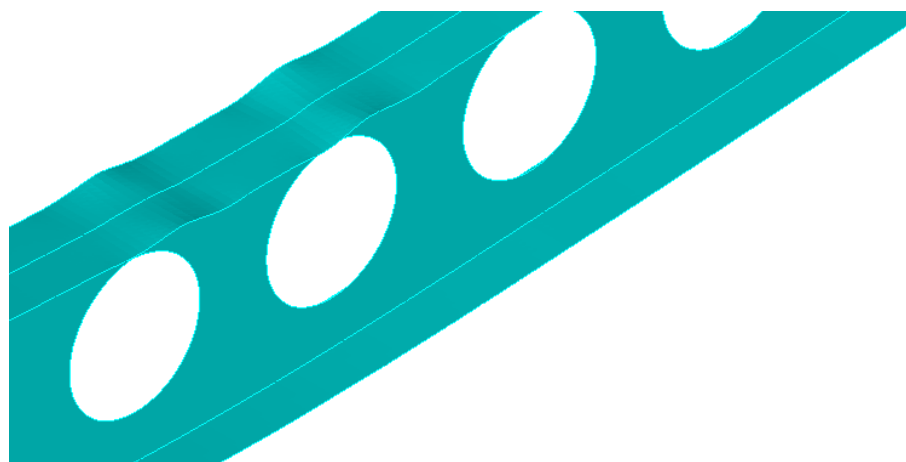
Μέθοδος ελέγχου	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)	Βέλος κάμψης (m)
Προσχέδιο EN1993-1-13	29.98	0.097
Αριθμητικές αναλύσεις ADINA	28.52	0.16



Σχήμα 4-33: Δρόμος Ισορροπίας δοκού για τις δύο μεθόδους ελέγχου



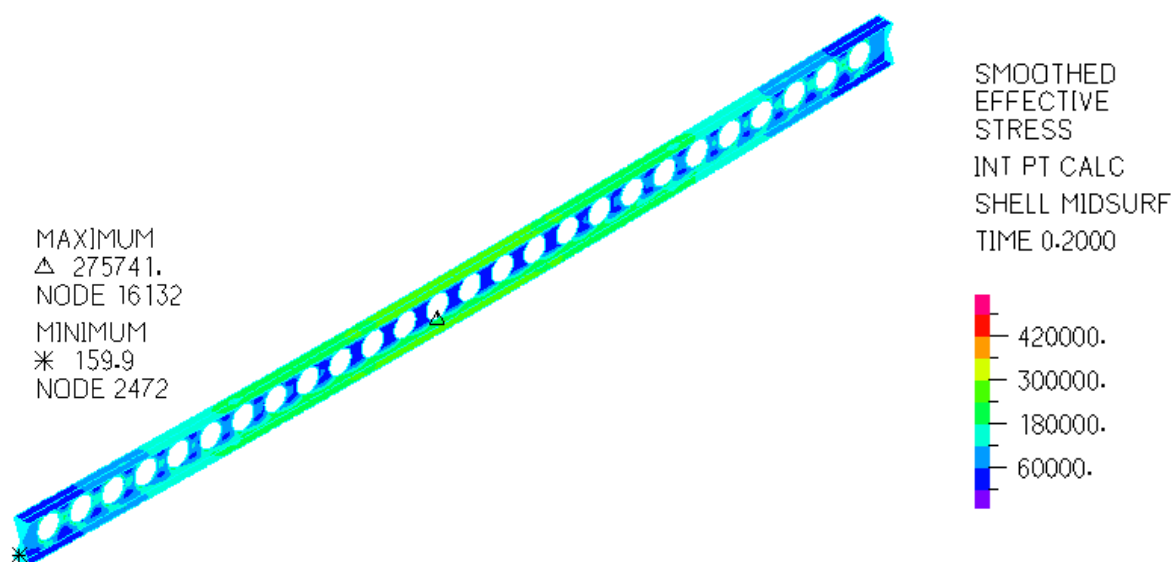
(a)



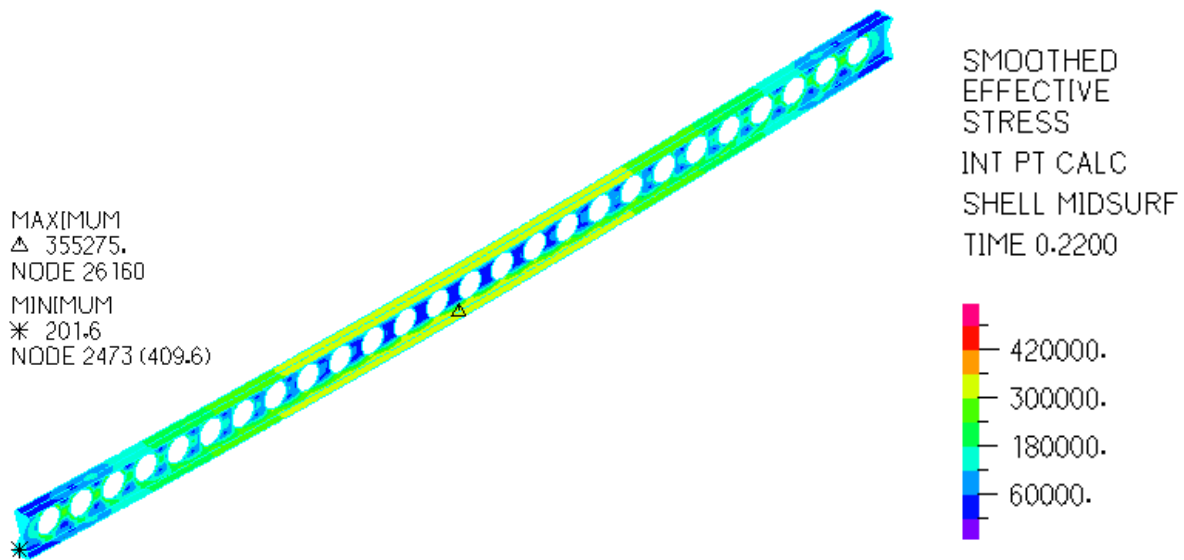
(β)

Σχήμα 4-34: Παραμορφωμένη εικόνα (α) κατά μήκος και (β) στο μέσο της δοκού

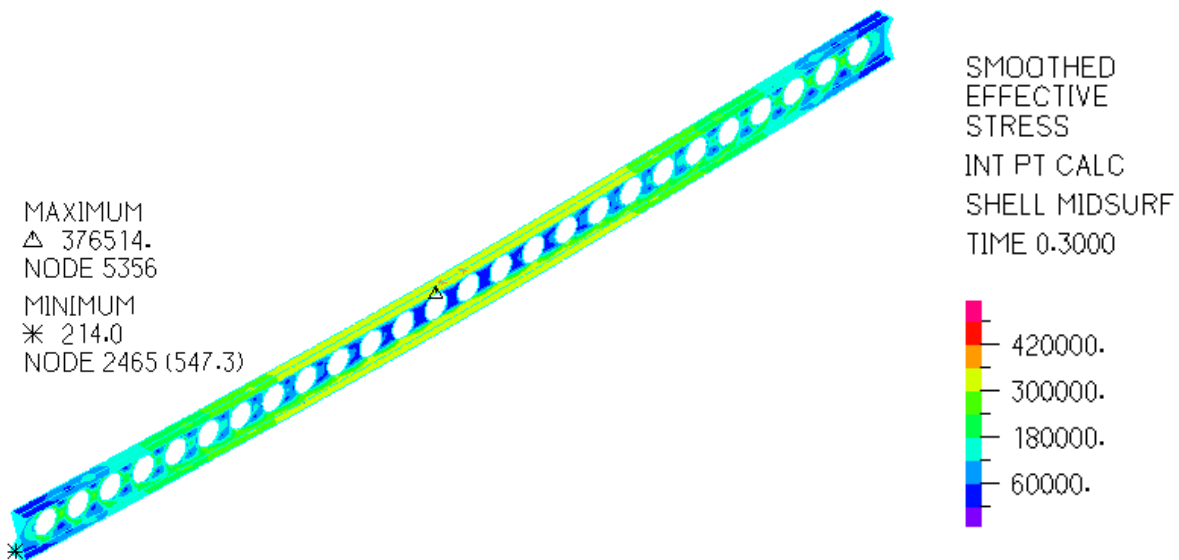
Στο Σχήμα 4-35 έως το Σχήμα 4-38 απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού σε τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας του Σχήματος 4-33. Στο Σημείο Α, το οποίο αντιστοιχεί στον ελαστικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας, η τιμή της μέγιστης τάσης δεν υπερβαίνει το όριο διαρροής. Λίγο πριν συμβεί η 1^η διαρροή της δοκού στο Σημείο Β εντοπίζεται υπέρβαση του ορίου διαρροής στο μέσο της δοκού κάτω από τη διατομή του κεντρικού διάκενου. Ύστερα από την 1^η διαρροή, στο Σημείο Γ παρατηρείται υπέρβαση του ορίου διαρροής σε μεγαλύτερο μέρος στο κέντρο της δοκού γύρω από τη διατομή των διακένων. Στην αστοχία της δοκού, Σημείο Δ, η διαρροή είναι πιο έντονη στο μέσο του ανοίγματος και έχει επεκταθεί και στη διατομή των πελμάτων.



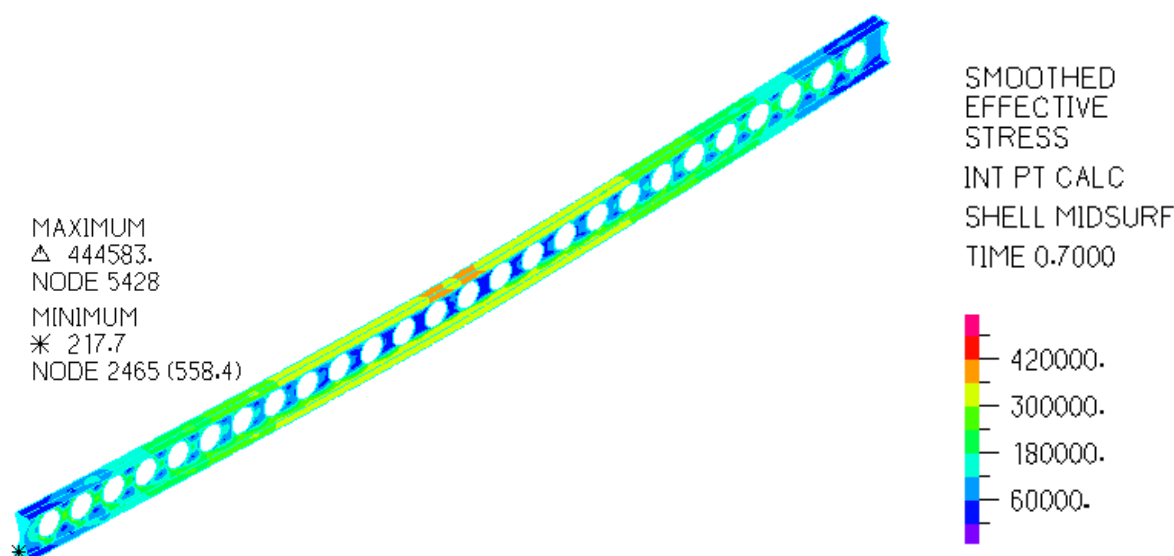
Σχήμα 4-35: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Α



Σχήμα 4-36: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Β



Σχήμα 4-37: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ

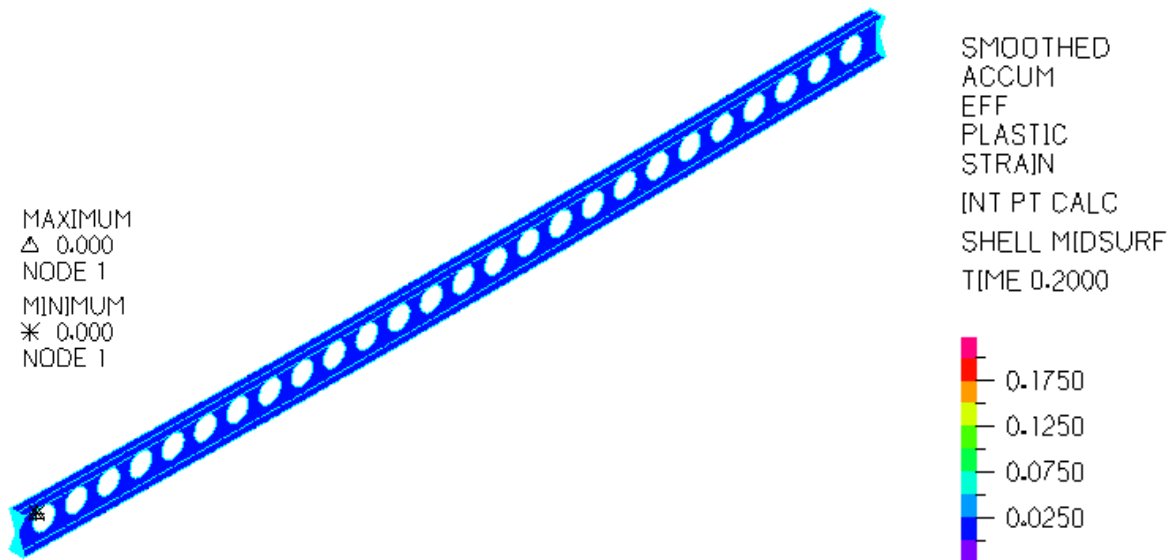


Σχήμα 4-38: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ

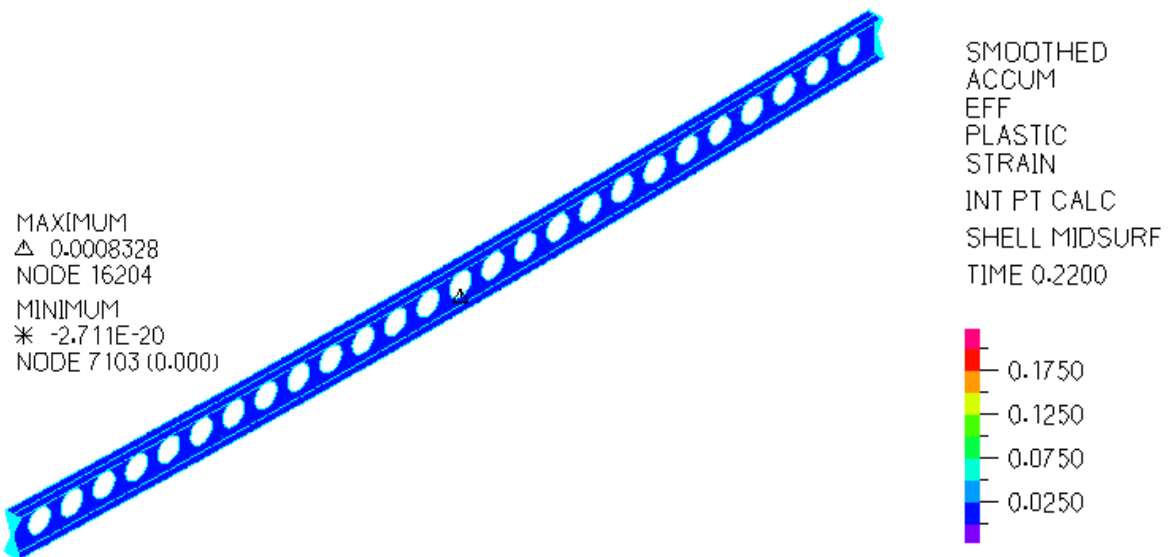
Στο Σχήμα 4-39 έως το Σχήμα 4-42 απεικονίζεται η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία. Η παραμόρφωση κατά μήκος της δοκού αυξάνεται σε μικρό βαθμό μέχρι την 1^η διαρροή και ύστερα παρατηρείται έντονη αύξηση μέχρι την αστοχία, όπου η μέγιστη τιμή της ισούται με $\varepsilon = 14.3\%$ (Σημείο Δ) και εμφανίζεται στο μέσο της δοκού, όπως αναμένεται. Σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 η μέγιστη παραμόρφωση της δοκού δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4-1)$$

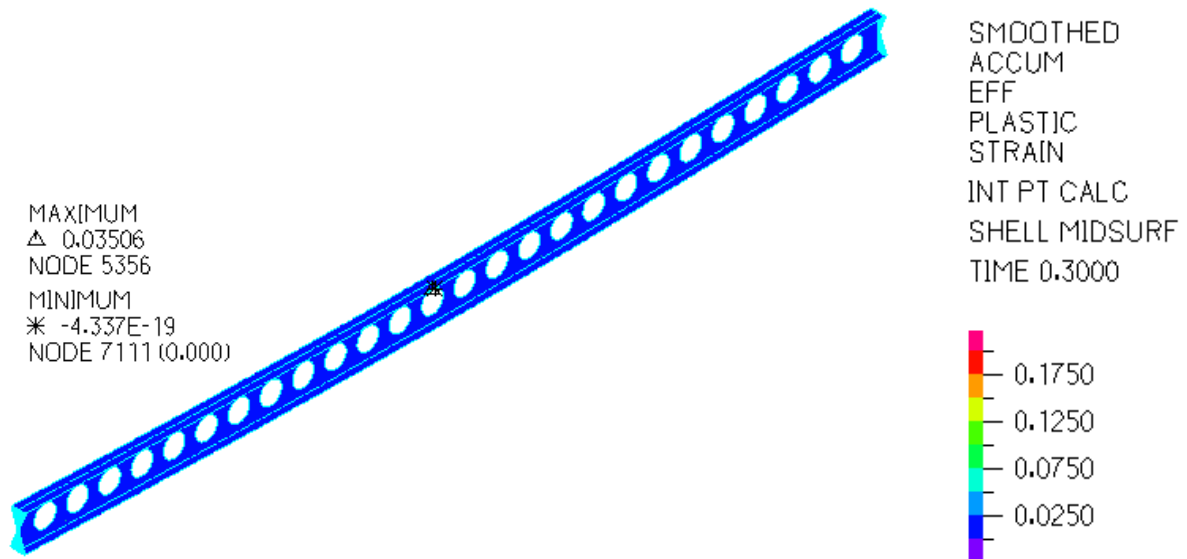
Οπότε, ισούται με $\varepsilon = 0.11\%$. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το προσχέδιο του Ευρωκώδικα αμελεί την κράτυνση του χάλυβα και τη μη γραμμικότητα του υλικού και θεωρεί πως η δοκός αστοχεί μετά την 1^η διαρροή και βρίσκεται διαρκώς στην ελαστική περιοχή, ενώ στην πραγματικότητα η δοκός συνεχίζει να παραμορφώνεται. Η μέγιστη παραμόρφωση σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις μπορεί να συγκριθεί με την παραμόρφωση στο Σημείο Β του δρόμου ισορροπίας, όπου η δοκός βρίσκεται οριακά στον ελαστικό κλάδο και έχει διαρρεύσει τοπικά. Στο Σημείο Β η παραμόρφωση ισούται με $\varepsilon = 0.083\%$ και τα αποτελέσματα ταυτίζονται οριακά.



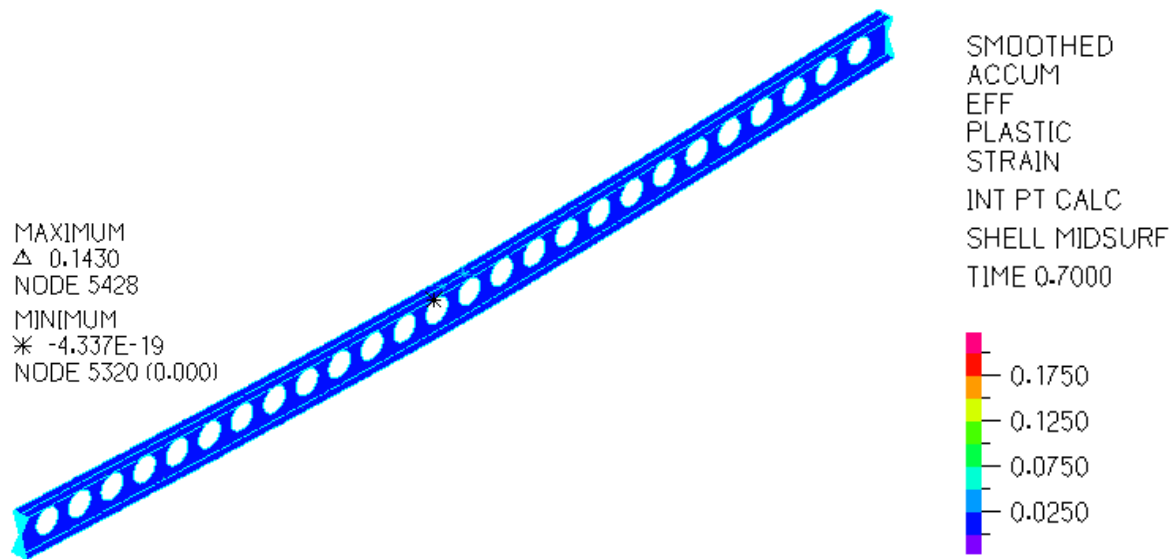
Σχήμα 4-39: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο A



Σχήμα 4-40: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο B

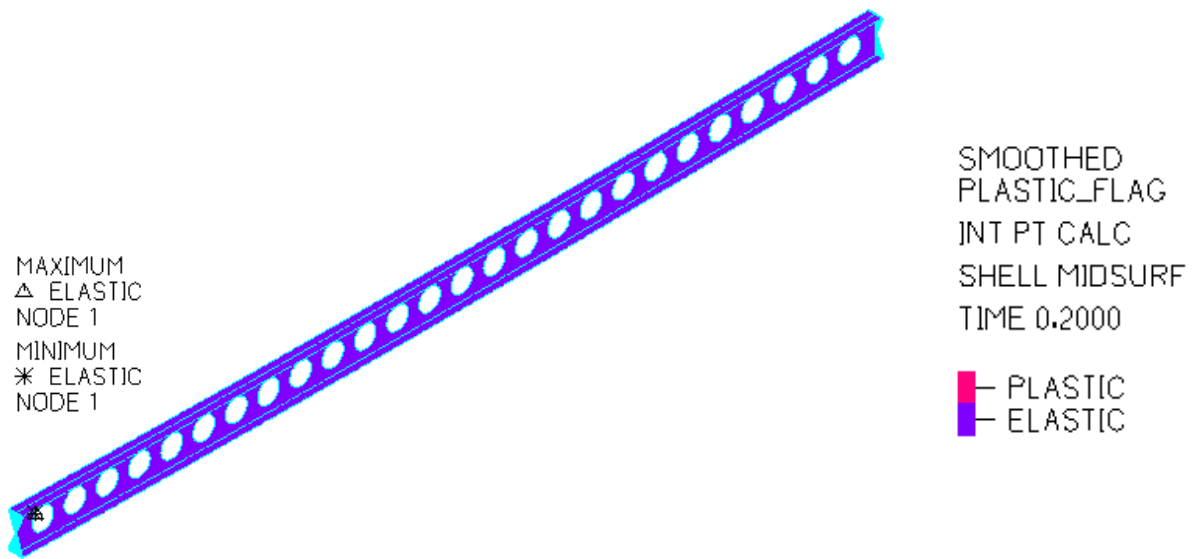


Σχήμα 4-41: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ

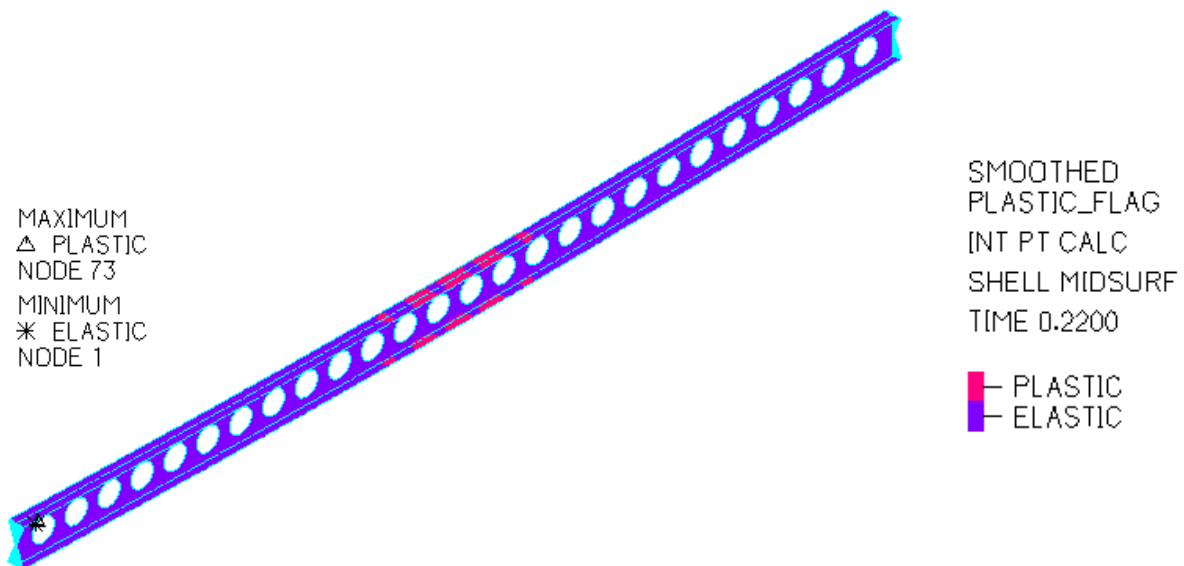


Σχήμα 4-42: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ

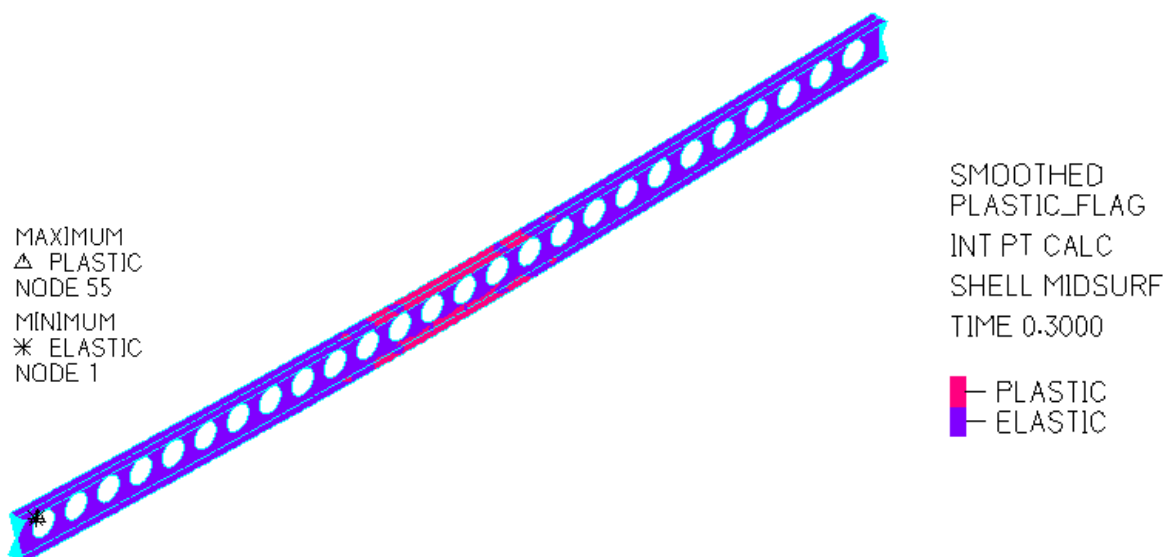
Στο Σχήμα 4-43 έως το Σχήμα 4-46 παρουσιάζεται η πλαστικοποίηση της διατομής κατά μήκος της δοκού. Το προσχέδιο του Ευρωκώδικα θεωρεί πως η δοκός βρίσκεται διαρκώς στην ελαστική περιοχή αλλά παρατηρείται πως στην πραγματικότητα η δοκός έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή λίγο πριν την 1^η διαρροή (Σημείο Β).



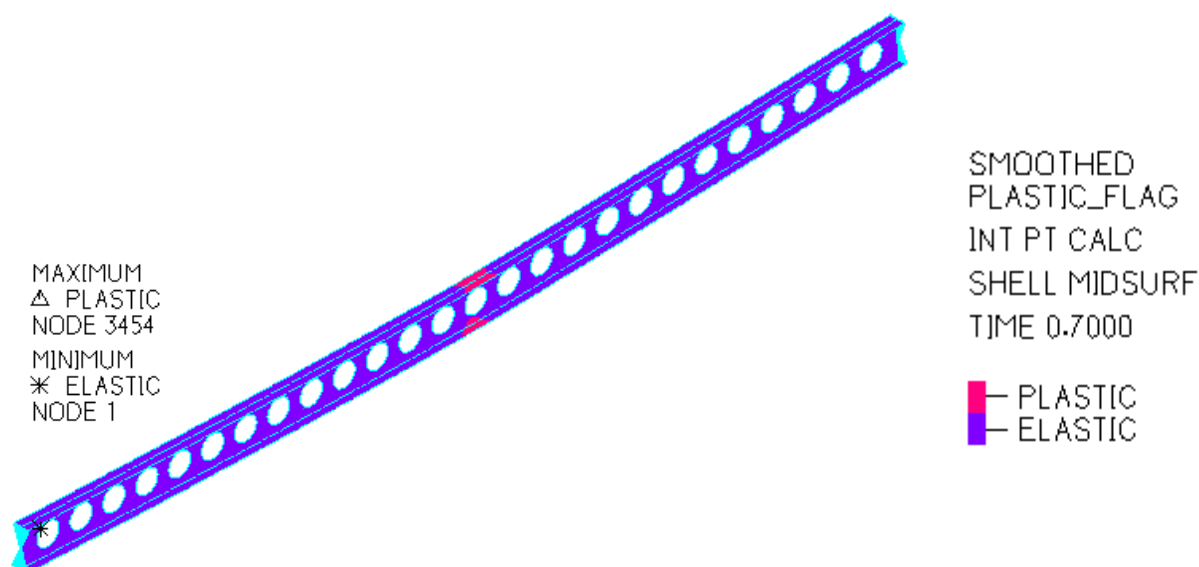
Σχήμα 4-43: Περιοχή πλαστικοποίησης στο Σημείο A



Σχήμα 4-44: Περιοχή πλαστικοποίησης στο Σημείο B



Σχήμα 4-45: Περιοχή πλαστικοποίησης στο Σημείο Γ



Σχήμα 4-46: Περιοχή πλαστικοποίησης στο Σημείο Δ

Η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτυχθεί στη δοκό σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 ισούται με $M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{29.98 \cdot 100^2}{8} = 374.75 kNm$, ενώ σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις

ισούται με $M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{28.52 \cdot 100^2}{8} = 356.5 kNm$. Στην Παράγραφο 3.8 της παρούσας

διπλωματικής εργασίας έγινε κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τις Κανονιστικές διατάξεις και η δοκός είναι Κατηγορίας 2, δηλαδή μπορεί να αναπτύξει την πλαστική ροπή αντοχής της. Η πλαστική ροπή αντοχής της δοκού μπορεί να υπολογιστεί στη συμπαγή διατομή της δοκού και στη διατομή στη θέση του διάκενου και δίνεται από τη σχέση:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4-2)$$

Η πλαστική ροπή αντίστασης της συμπαγούς διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$W_{pl,y} = \frac{A_f \cdot h}{2} + \frac{h^2 \cdot t_w}{4} \quad (4-3)$$

Συνεπώς ισούται με:

$$W_{pl,y} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 11.5 \cdot 419.8}{2} + \frac{419.8^2 \cdot 7.5}{4} = 1102867.075 \text{mm}^3 = 1.103 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$$

Οπότε, η πλαστική ροπή αντοχής της συμπαγούς διατομής ισούται με:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1.103 \cdot 10^{-3} \cdot 355000}{1.0} = 391.565 \text{kNm}$$

Η πλαστική ροπή αντίστασης της διατομής στη θέση του διάκενου δίνεται από τη σχέση:

$$W_{pl,y} = \frac{A_f \cdot h}{2} + 2 \cdot \frac{h_T^2 \cdot t_w}{4} \quad (4-4)$$

Συνεπώς ισούται με:

$$W_{pl,y} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 11.5 \cdot 419.8}{2} + 2 \cdot \frac{97.40^2 \cdot 7.5}{4} = 808007.35 \text{mm}^3 = 8.08 \cdot 10^{-4} \text{m}^3$$

Οπότε, η πλαστική ροπή αντοχής της διατομής στη θέση του διάκενου ισούται με:

$$M_{pl,c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{8.08 \cdot 10^{-4} \cdot 355000}{1.0} = 286.84 \text{kNm}$$

Επίσης, η ελαστική ροπή αντοχής της δοκού μπορεί να υπολογιστεί στη συμπαγή διατομή της δοκού και στη διατομή στη θέση του διάκενου και δίνεται από τη σχέση:

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4-5)$$

Η ελαστική ροπή αντίστασης της συμπαγούς διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$W_{el,y} = \frac{A_f \cdot h}{2} + \frac{h^2 \cdot t_w}{6} \quad (4-6)$$

Συνεπώς, ισούται με:

$$W_{el,y} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 11.5 \cdot 419.8}{2} + \frac{419.8^2 \cdot 7.5}{6} = 99272205 \text{mm}^3 = 9.93 \cdot 10^{-4} \text{m}^3$$

Οπότε, η ελαστική ροπή αντοχής της συμπαγούς διατομής ισούται με:

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{9.93 \cdot 10^{-3} \cdot 355000}{1.0} = 352.42 kNm$$

Η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής στη θέση του διάκενου δίνεται από τη σχέση:

$$W_{el,y} = \frac{A_f \cdot h}{2} + 2 \cdot \frac{h_f^2 \cdot t_w}{6} \quad (4-7)$$

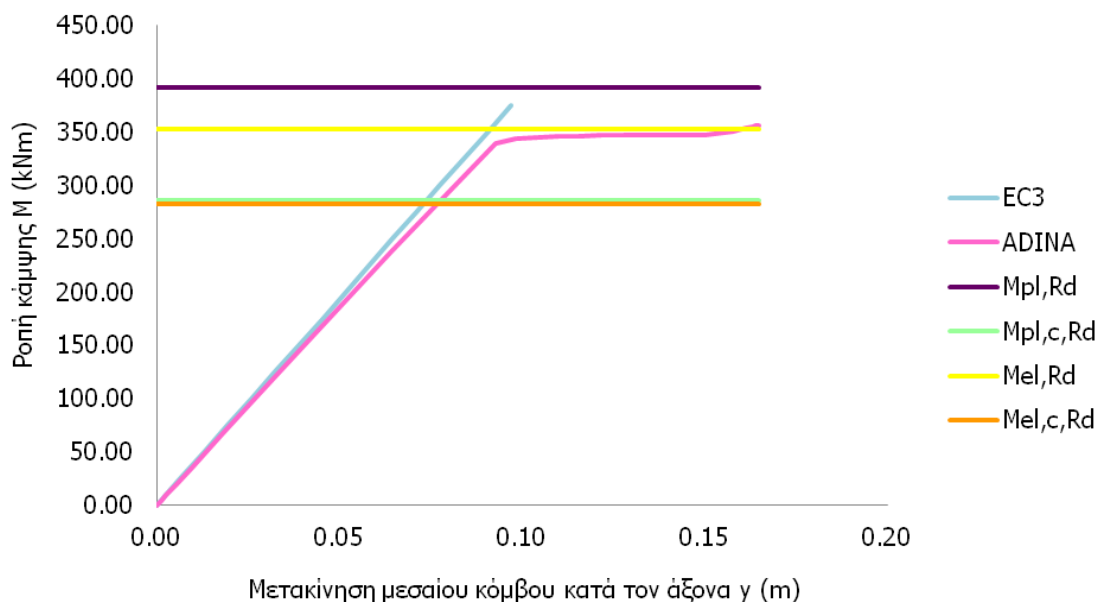
Συνεπώς, ισούται με:

$$W_{el,y} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 11.5 \cdot 419.8}{2} + 2 \cdot \frac{97.40^2 \cdot 7.5}{6} = 7961489 mm^3 = 7.96 \cdot 10^{-4} m^3$$

Οπότε, η ελαστική ροπή αντοχής της διατομής στη θέση του διάκενου ισούται με:

$$M_{el,c,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{7.96 \cdot 10^{-4} \cdot 355000}{1.0} = 282.63 kNm$$

Στο Σχήμα 4-47 απεικονίζεται το διάγραμμα καμπτικών ρομών της δοκού. Η πλαστική ροπή αντοχής της συμπαγούς διατομής υπερβαίνει τη μέγιστη καμπτική ροπή της δοκού που έχει υπολογιστεί και με τις 2 μεθόδους ελέγχου. Αντίθετα, η δοκός αναπτύσσει την πλαστική ροπή αντοχής της διάτρητης διατομής και συνεχίζει να παραμορφώνεται μέχρι την αστοχία. Η ελαστική ροπή αντοχής της συμπαγούς και της διάτρητης διατομής παρατηρείται πως δεν υπερβαίνει τη μέγιστη ροπή κάμψης της δοκού, οπότε η κατάταξη της σε Κατηγορία 2 είναι ορθή. Το προσχέδιο του EN1993-1-13 προτείνει ο υπολογισμός της πλαστικής και ελαστικής ροπής αντοχής να γίνεται στη διατομή στη θέση του διάκενου, οπότε η κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τις Κανονιστικές διατάξεις είναι σωστή.



Σχήμα 4-47: Διάγραμμα καμπτικών ρομών

5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της διαμέτρου των διακένων (h_o) στην απόκριση της δοκού. Η επίδραση της διαμέτρου των διακένων στην απόκριση της δοκού μελετάται για 10 περιπτώσεις τιμών διαμέτρου, οι οποίες κυμαίνονται από $h_o = 225$ mm έως $h_o = 337.50$ mm με βήμα $dh_o = 12.50$ mm. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραμετρικές αναλύσεις συγκρίνονται με τους προτεινόμενους κανόνες σχεδιασμού του προσχέδιου του EN1993-1-13.

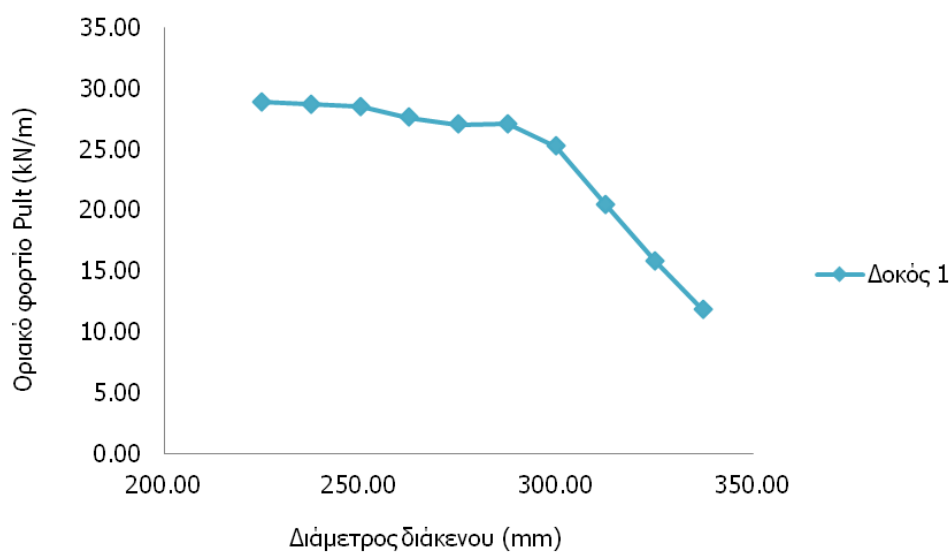
mm.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΚΕΝΩΝ

Αρχικά, στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζεται η τιμή του οριακού φορτίου (P_{ult}) της δοκού για κάθε περίπτωση διαμέτρου διάκενου. Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της διαμέτρου του διάκενου. Το οριακό φορτίο ελαττώνεται προοδευτικά όσο αυξάνεται η διάμετρος του διάκενου λόγω της απώλειας υλικού από τον κορμό. Για τιμές διαμέτρου από $h_o = 225$ mm έως $h_o = 300$ mm η κλίση του διαγράμματος είναι ομαλή και οι τιμές του οριακού φορτίου δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αντίθετα, από την τιμή $h_o = 300$ mm και μετά παρατηρείται σημαντική μείωση του οριακού φορτίου, αφού στις περιπτώσεις αυτές έχει αφαιρεθεί μεγάλο μέρος του κορμού (Σχήμα 5-2).

Πίνακας 5-1: Οριακό φορτίο δοκού για κάθε χαρακτηριστική περίπτωση διαμέτρου διάκενου

Διάμετρος διάκενου h_o (mm)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
225	28.89
237.5	28.73
250	28.52
262.50	27.61
275	27.05
287.50	27.10
300	25.26
312.50	20.48
325	15.84
337.50	11.80



Σχήμα 5-1: Μεταβολή οριακού φορτίου δοκού συναρτήσει της διαμέτρου του διάκενου



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)



(η)



(θ)



(ι)

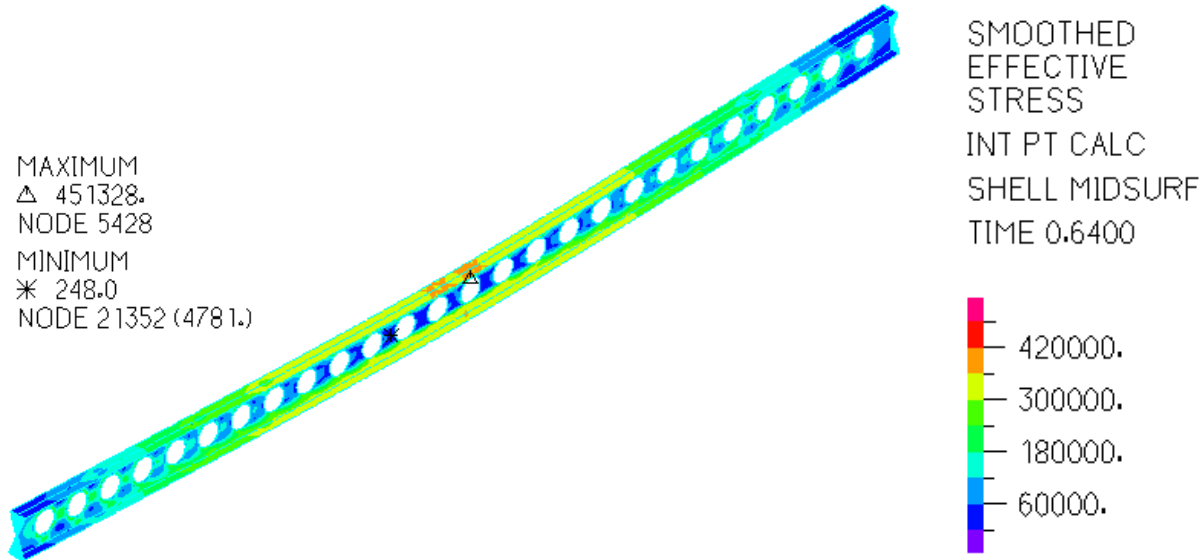


(κ)

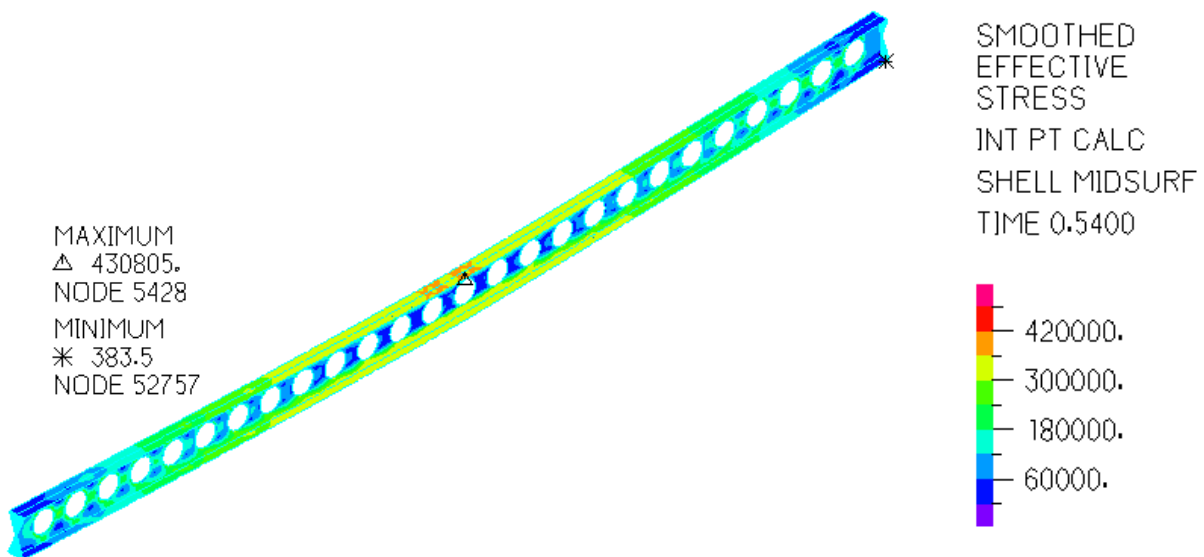
Σχήμα 5-2: Όψη δοκού για διάμετρο διάκενου (α) $h_o = 225$ mm, (β) $h_o = 237.50$ mm, (γ) $h_o = 250$ mm, (δ) $h_o = 262.50$ mm, (ε) $h_o = 275$ mm, (ζ) $h_o = 287.50$ mm, (η) $h_o = 300$ mm, (θ) $h_o = 312.50$ mm, (ι) $h_o = 325$ mm και (κ) $h_o = 337.50$ mm

Στο Σχήμα 5-3 έως το Σχήμα 5-12 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Η τιμή της τάσεως von Mises μεγιστοποιείται στο μέσο της δοκού και ελαττώνεται προοδευτικά μέχρι τα άκρα της και υπερβαίνει το όριο διαρροής της δοκού ($f_y = 355$ MPa) σε όλες τις περιπτώσεις. Η υπέρβαση αυτή οφείλεται στην κράτυνση του χάλυβα που

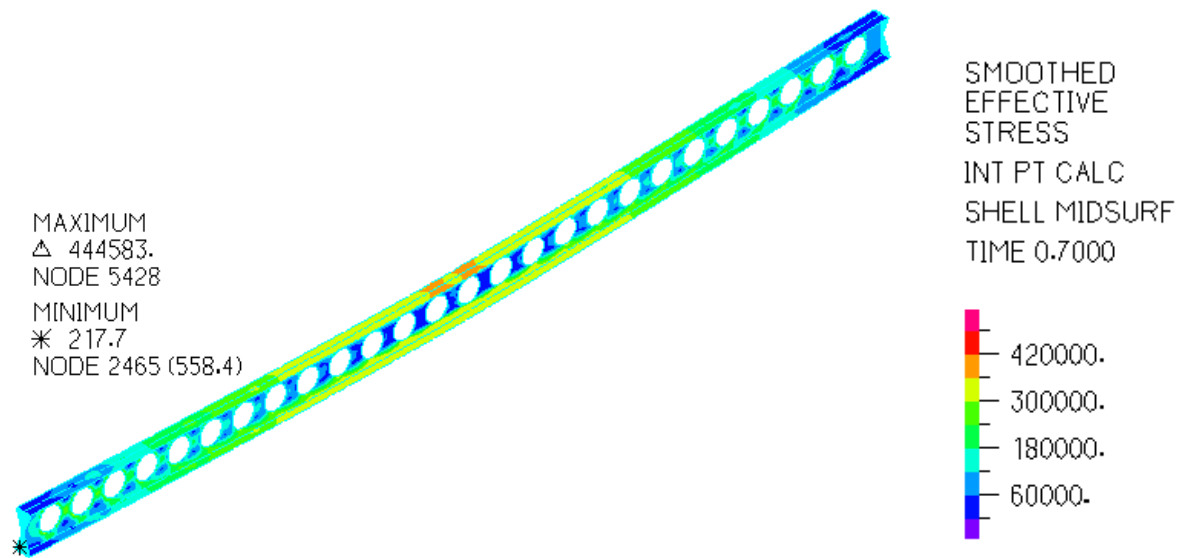
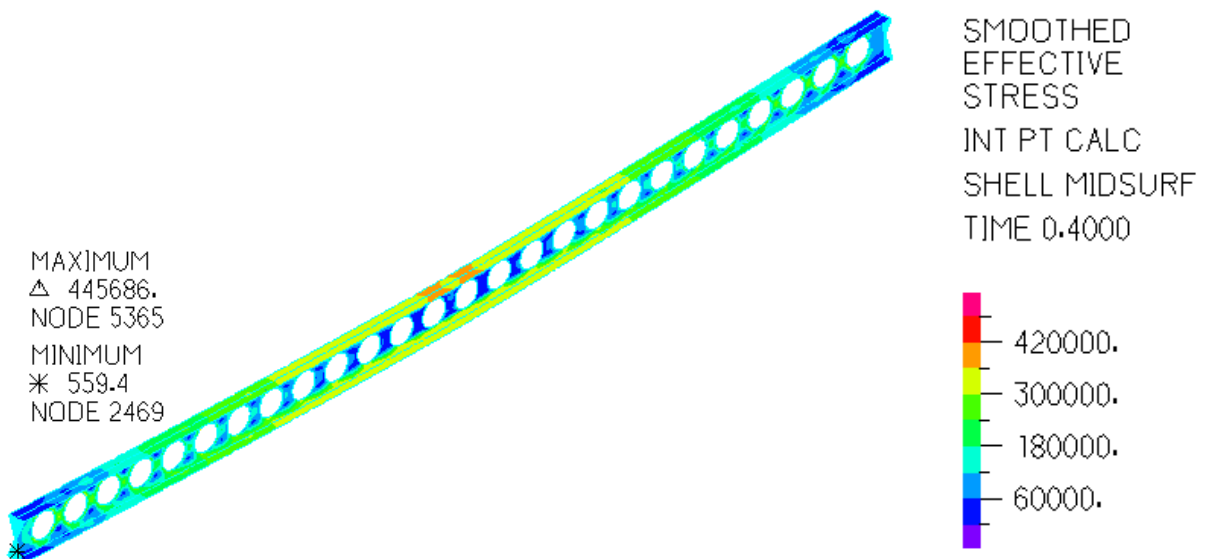
λαμβάνεται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις. Η τιμή των τάσεων είναι σταθερή για τις χαρακτηριστικές περιπτώσεις διαμέτρου διάκενου $h_0 = 225$ mm έως $h_0 = 287.5$ mm, στις οποίες η τιμή του οριακού φορτίου δεν διαφέρει σημαντικά. Η αύξηση της διαμέτρου του διάκενου από την τιμή $h_0 = 300$ mm και ύστερα προκαλεί ανομοιομορφία στην κατανομή των τάσεων και πλέον η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στο άκρο της δοκού. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η μέγιστη τάση δεν υπερβαίνει έντονα το όριο διαρροής καθώς λόγω της σημαντικής απώλειας υλικού η δοκός αστοχεί πιο γρήγορα.

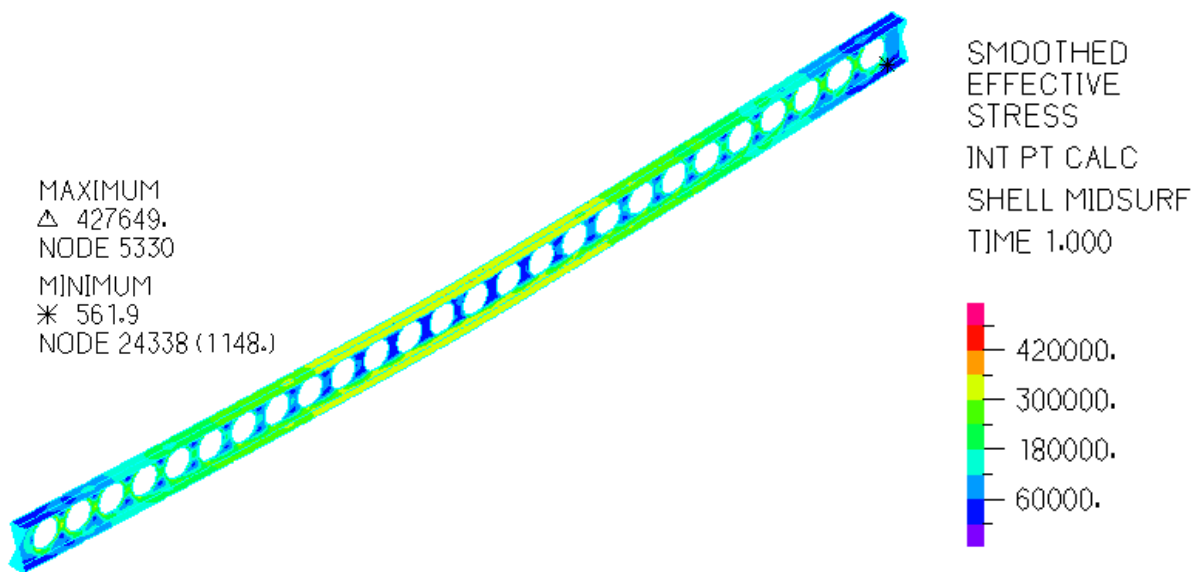


Σχήμα 5-3: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 225$ mm

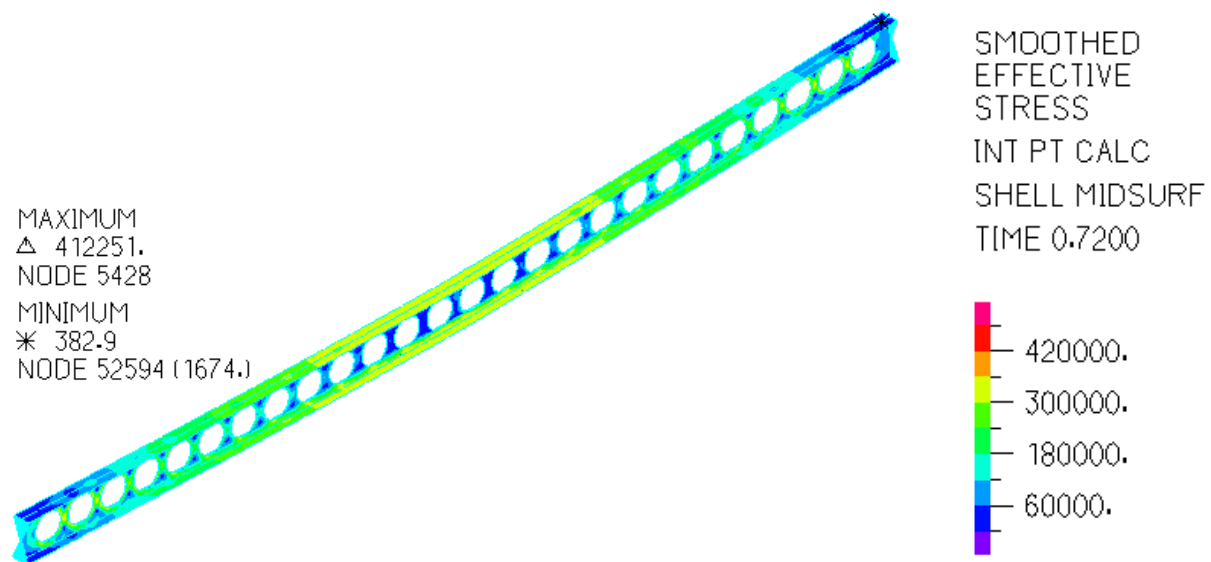


Σχήμα 5-4: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 237.50$ mm

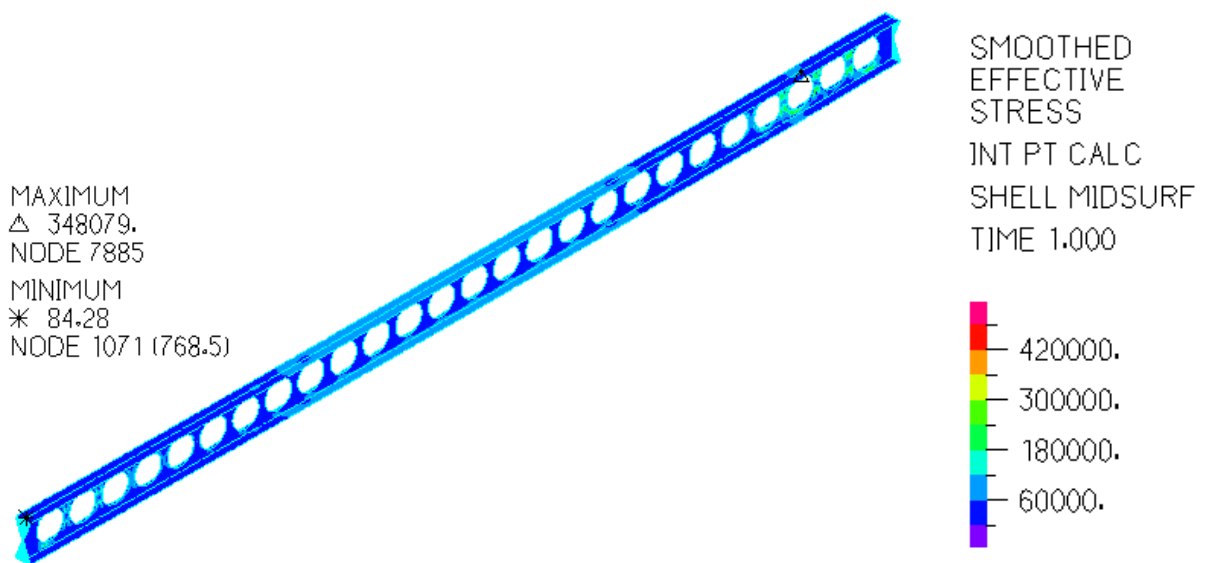
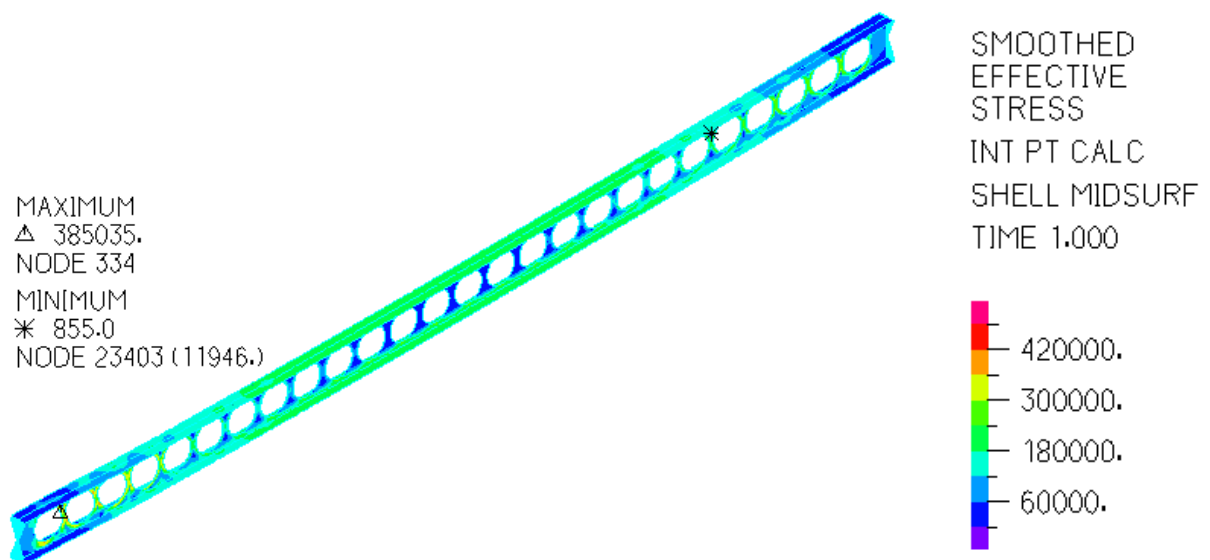
Σχήμα 5-5: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 250$ mmΣχήμα 5-6: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 262.50$ mm

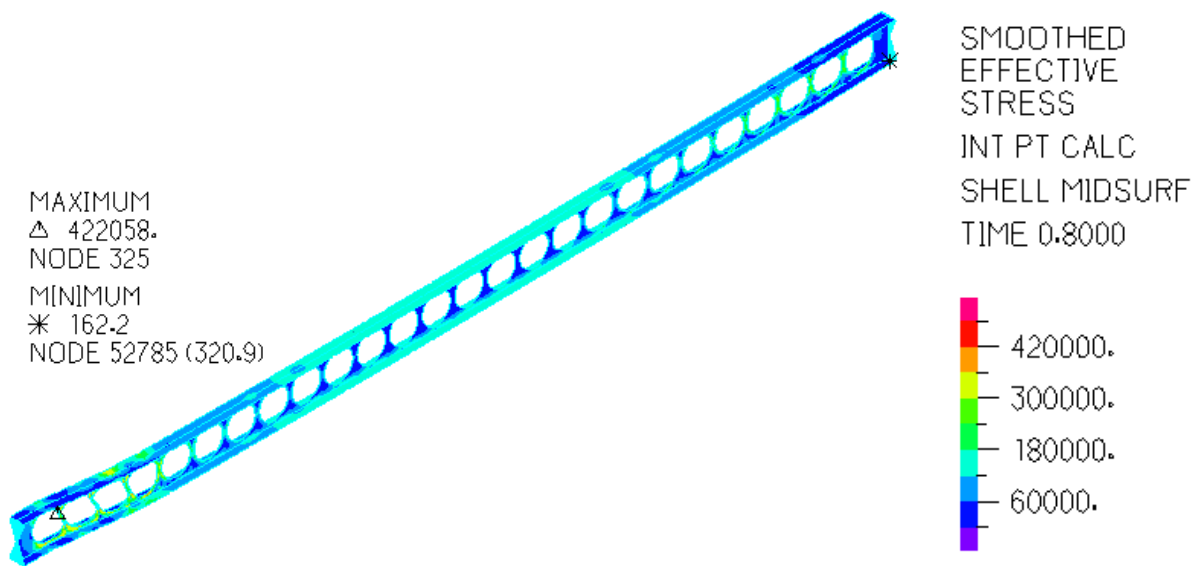


Σχήμα 5-7: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 275$ mm

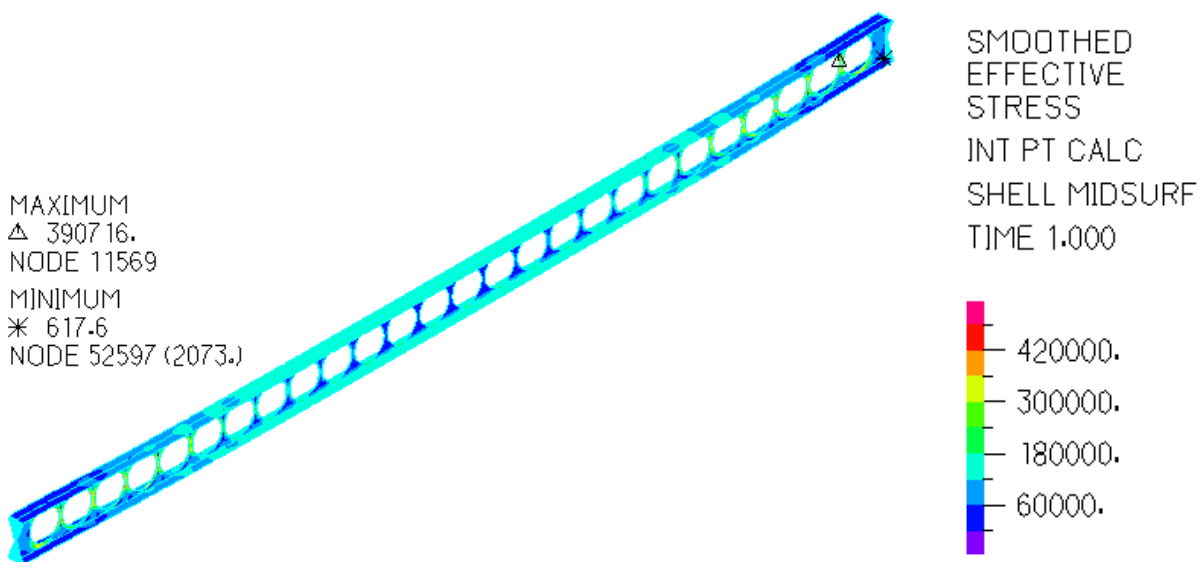


Σχήμα 5-8: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 287.50$ mm

Σχήμα 5-9: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 300$ mmΣχήμα 5-10: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 312.50$ mm

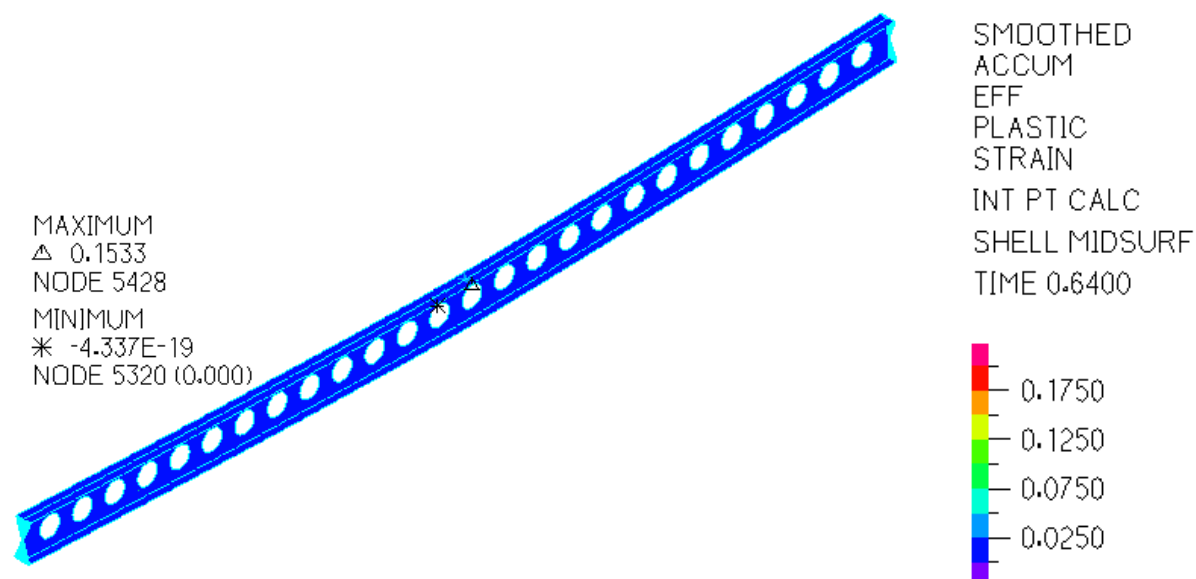
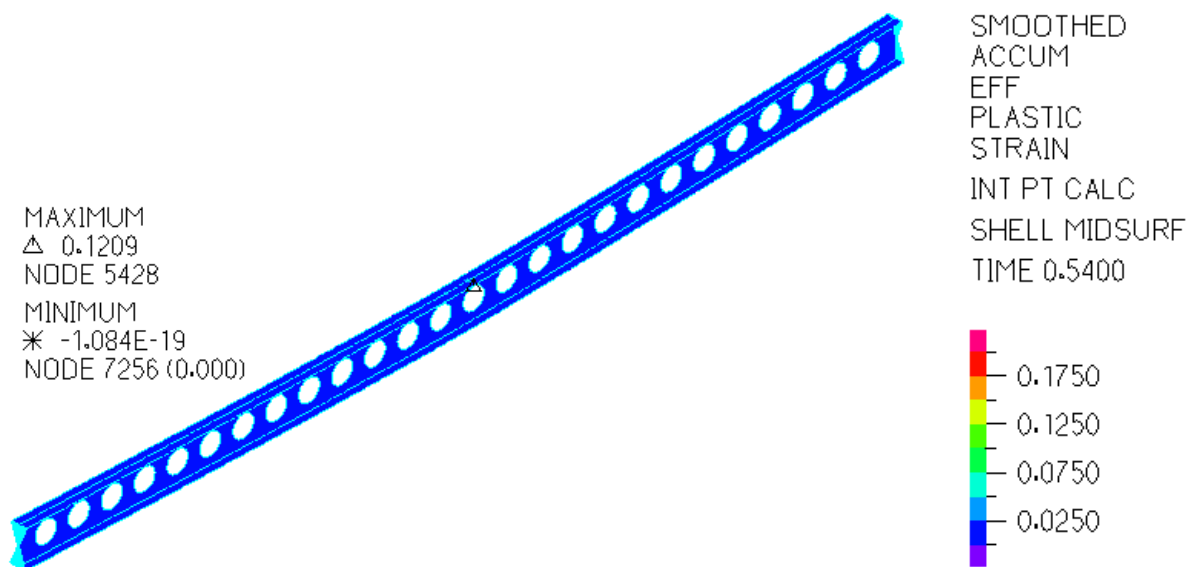


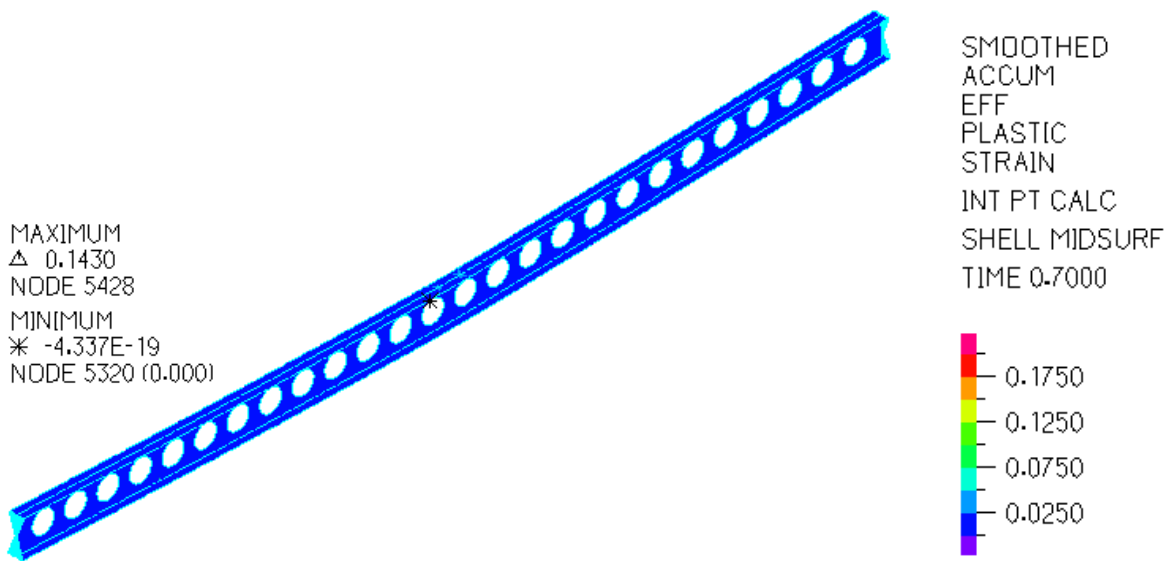
Σχήμα 5-11: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 325$ mm



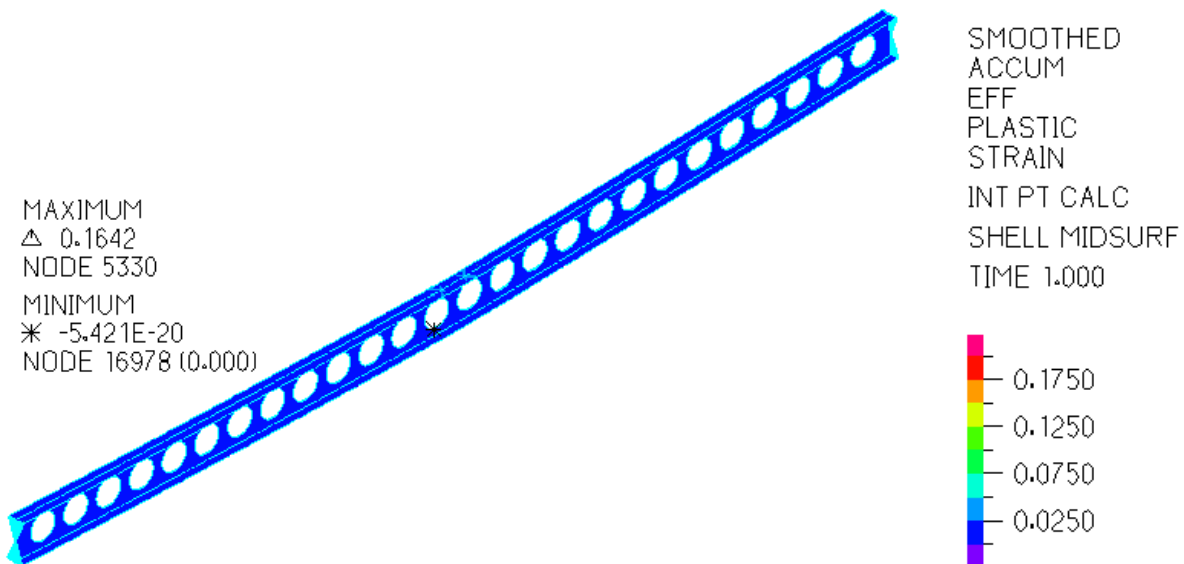
Σχήμα 5-12: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $h_0 = 337.50$ mm

Στο Σχήμα 5-13 έως το Σχήμα 5-22 παρουσιάζεται η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για όλες τις χαρακτηριστικές τιμές διαμέτρου διάκενου. Η παραμόρφωση της δοκού για τιμές διαμέτρου διάκενου από $h_0 = 225$ mm έως $h_0 = 287.5$ mm μεγιστοποιείται στο μέσο της δοκού και οριακά ταυτίζεται γι' αυτές τις περιπτώσεις. Από την τιμή $h_0 = 300$ mm και ύστερα η μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται στο άκρο της δοκού, όπου παρατηρείται και αυξημένη συγκέντρωση τάσεων. Η τιμή της παραμόρφωσης μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνεται το μέγεθος του διάκενου.

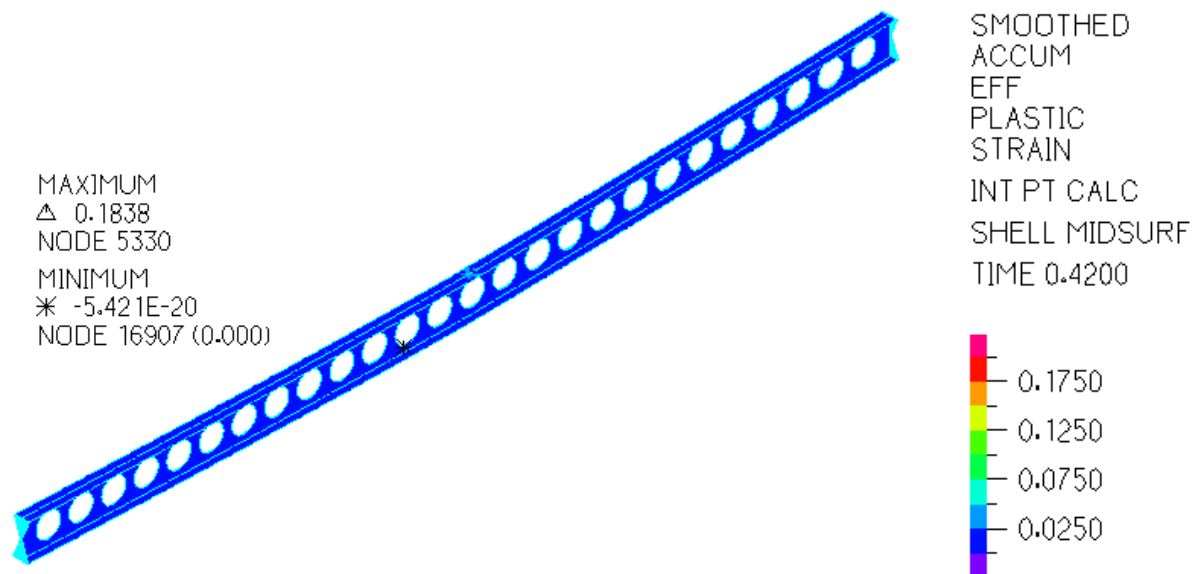
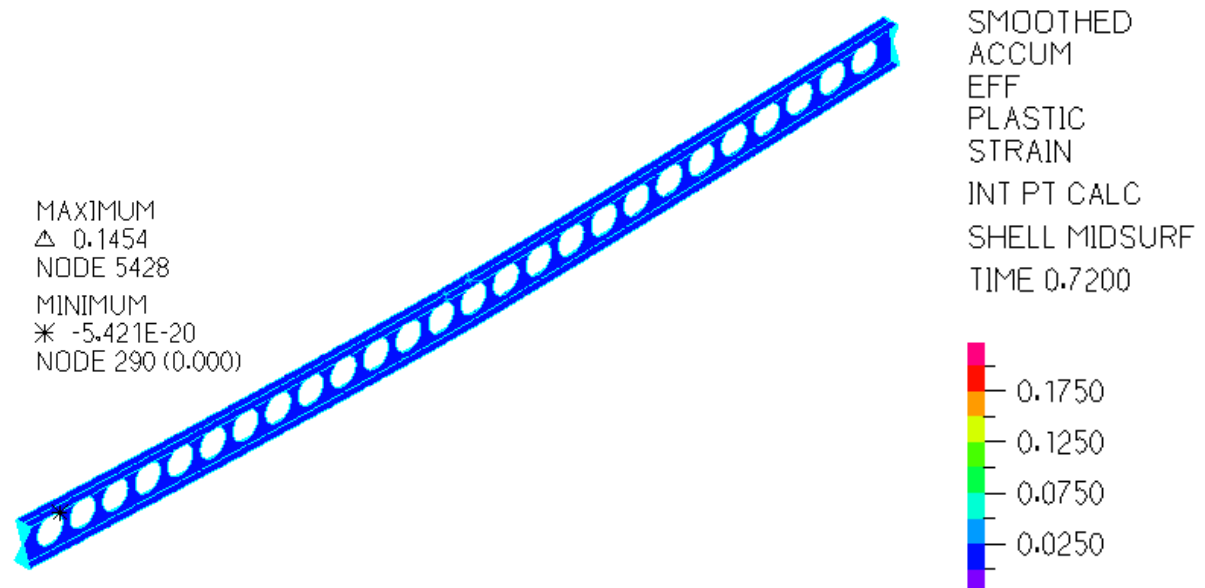
Σχήμα 5-13: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 225$ mmΣχήμα 5-14: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 237.50$ mm

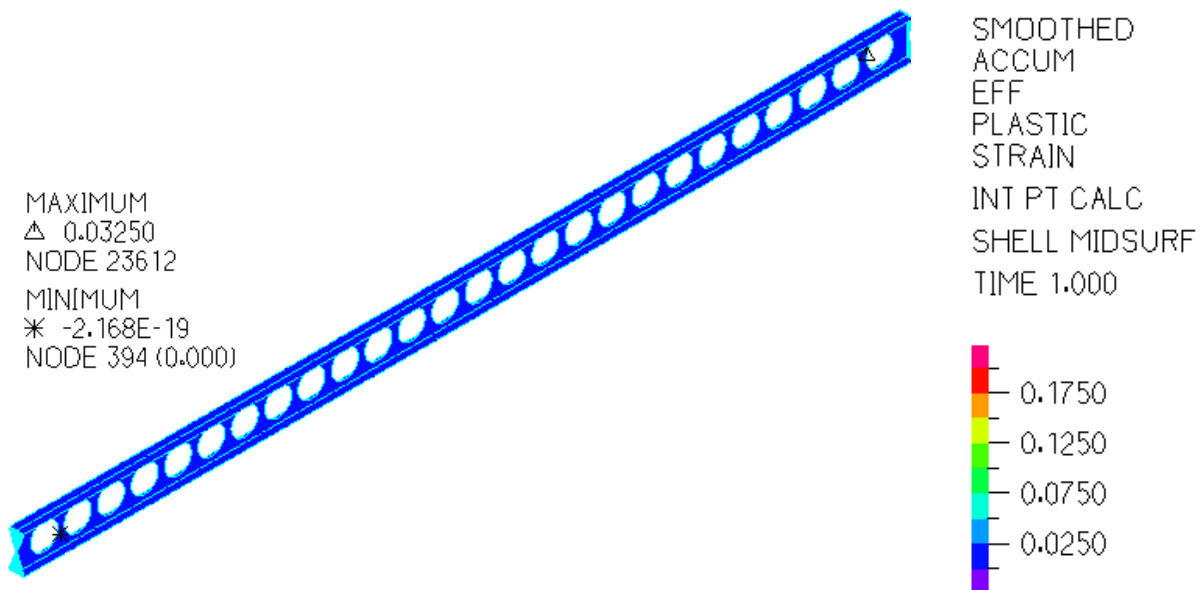


Σχήμα 5-15: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 250$ mm

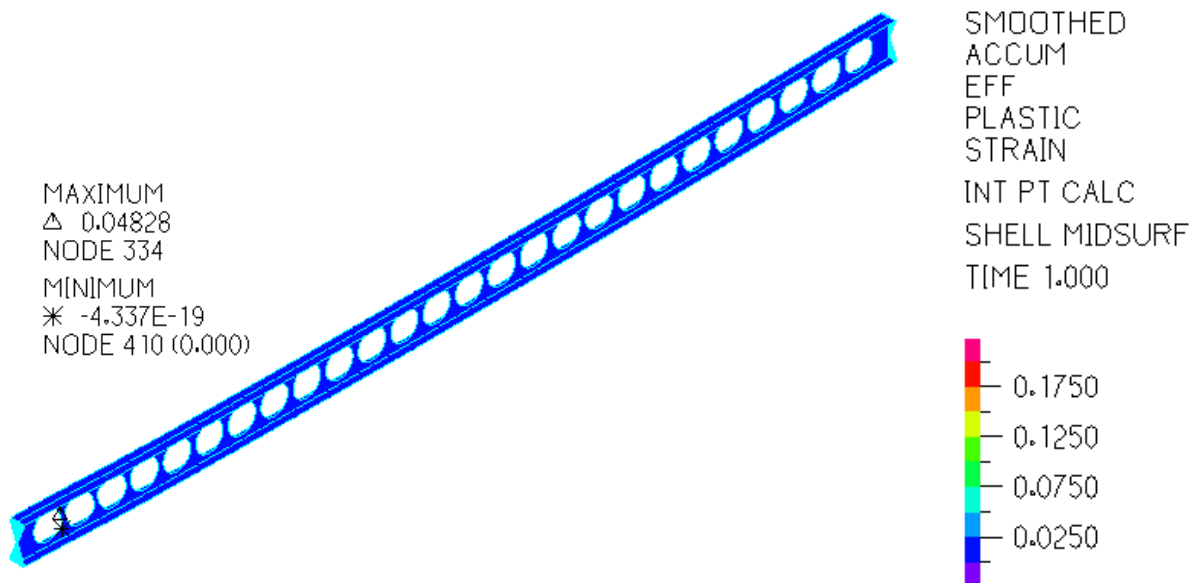


Σχήμα 5-16: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 262.50$ mm

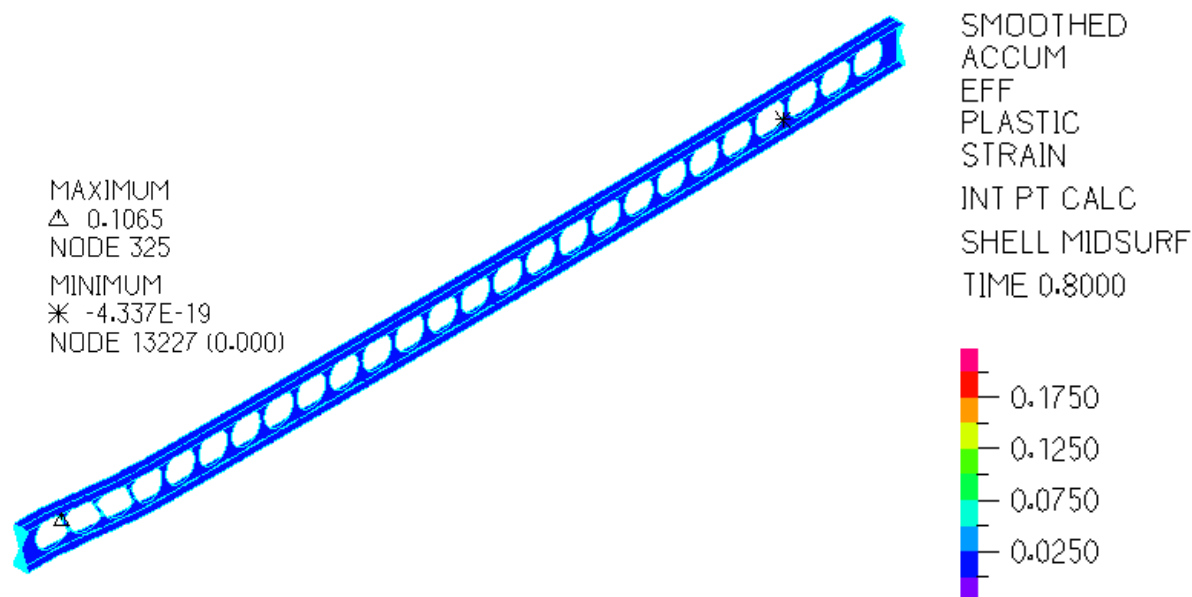
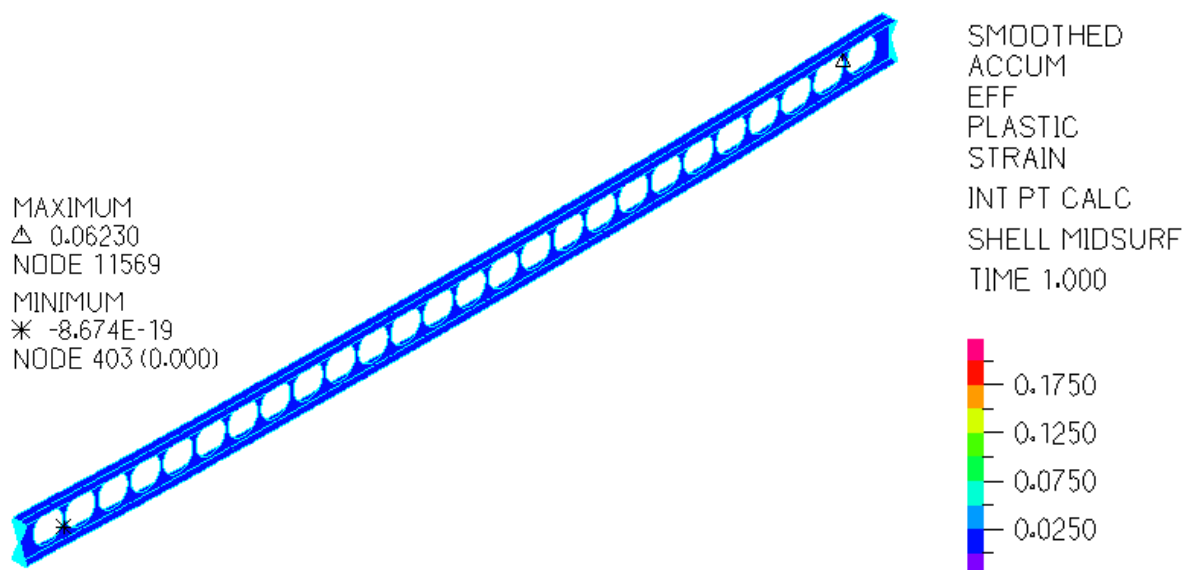
Σχήμα 5-17: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 275$ mmΣχήμα 5-18: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 287.50$ mm



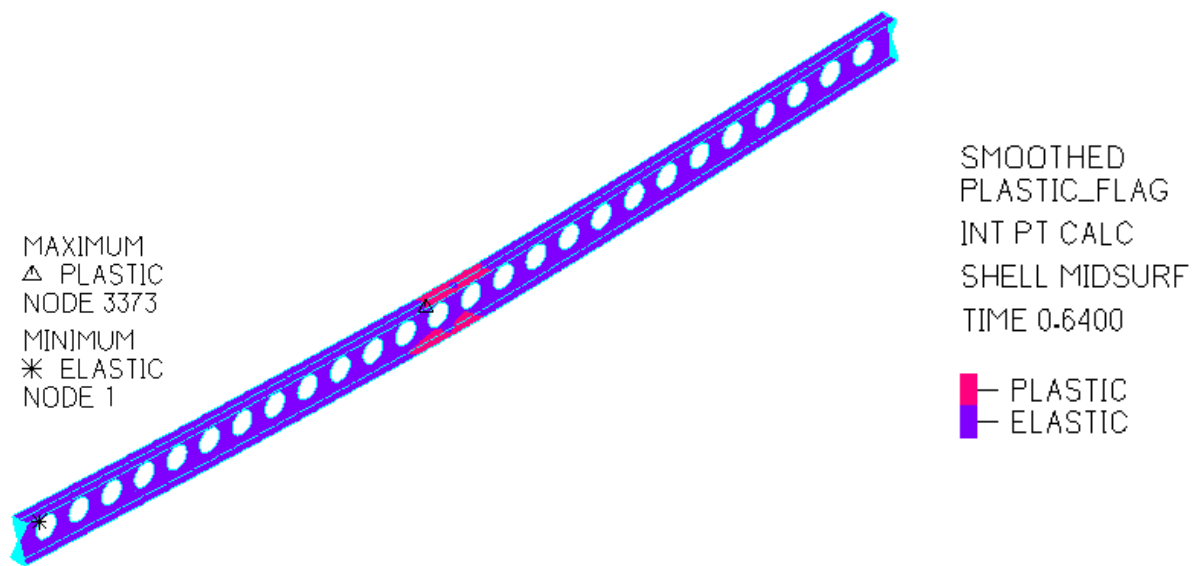
Σχήμα 5-19: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 300$ mm



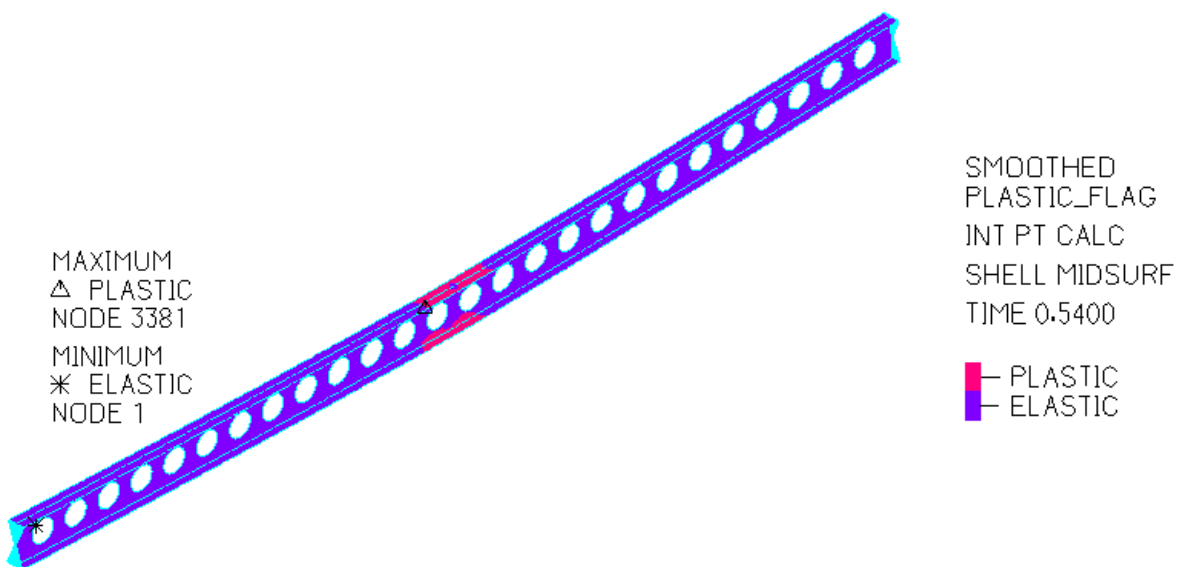
Σχήμα 5-20: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 312.50$ mm

Σχήμα 5-21: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 325$ mmΣχήμα 5-22: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $h_o = 337.50$ mm

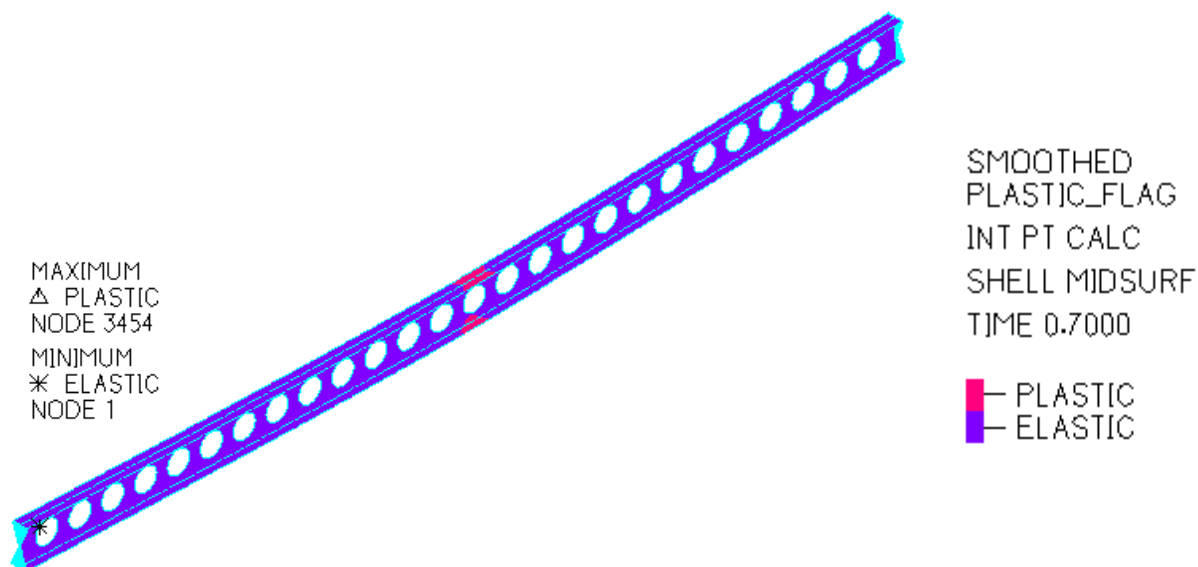
Στο Σχήμα 5-23 έως το Σχήμα 5-32 παρουσιάζεται η περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για όλες τις χαρακτηριστικές τιμές διαμέτρου διάκενου. Η περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού για μέγεθος διάκενου $h_o = 225$ mm έως $h_o = 287.5$ mm εντοπίζεται στο μέσο της δοκού όπου έχει παρατηρηθεί η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Αντίθετα, από την τιμή $h_o = 300$ mm και έπειτα η περιοχή πλαστικοποίησης δεν εντοπίζεται πλέον στο μέσο αλλά στα άκρα της δοκού, αφού εκεί έχει παρατηρηθεί μέγιστη συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Η περιοχή πλαστικοποίησης για μεγάλα μεγέθη διαμέτρου δεν είναι πολύ εκτεταμένη καθώς η δοκός αστοχεί γρήγορα λόγω της σημαντικής απώλειας υλικού από τον κορμό της, που μειώνει την αντοχή της.



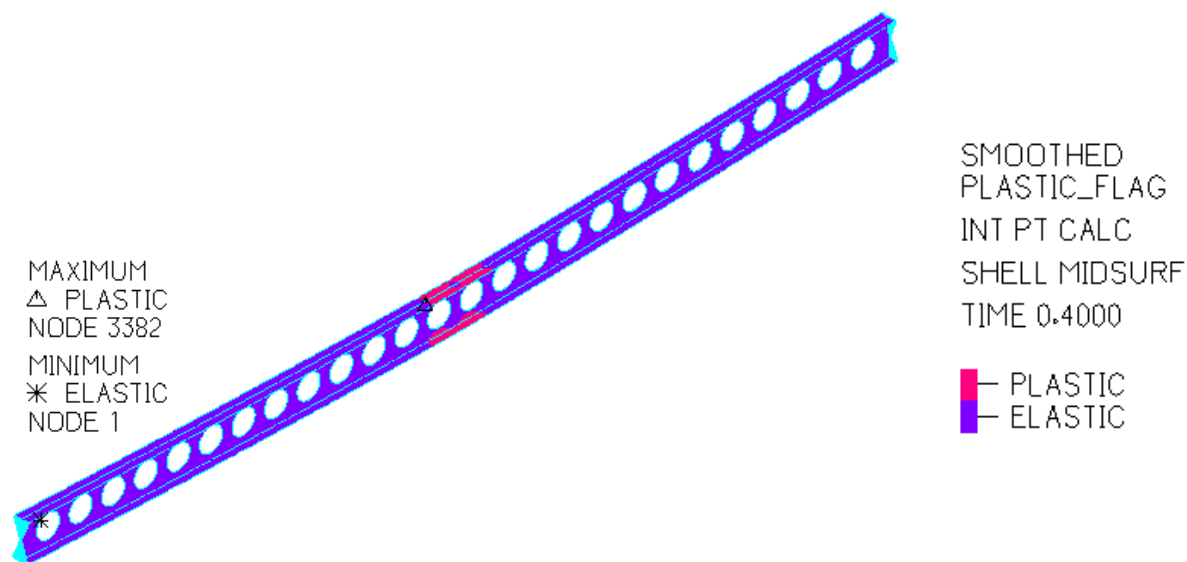
Σχήμα 5-23: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 225$ mm



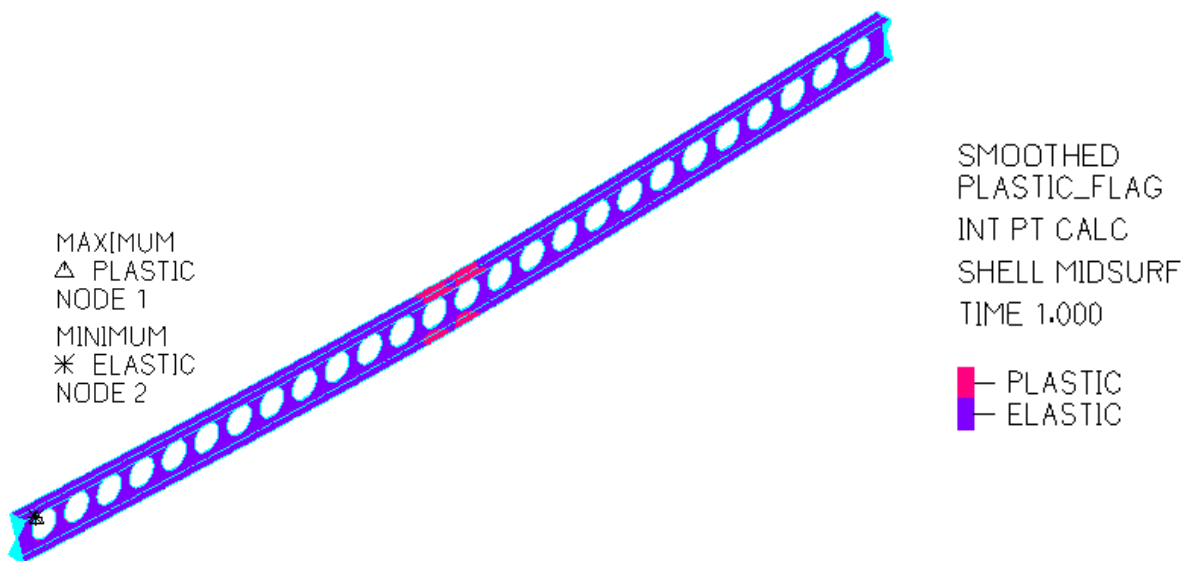
Σχήμα 5-24: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 237.50$ mm



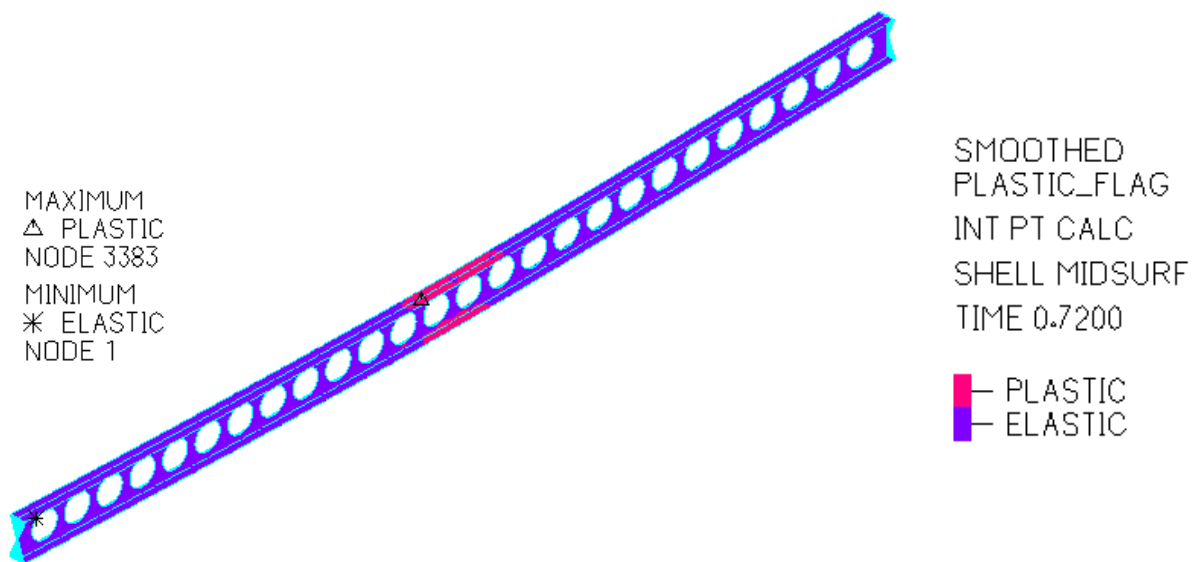
Σχήμα 5-25: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 250$ mm



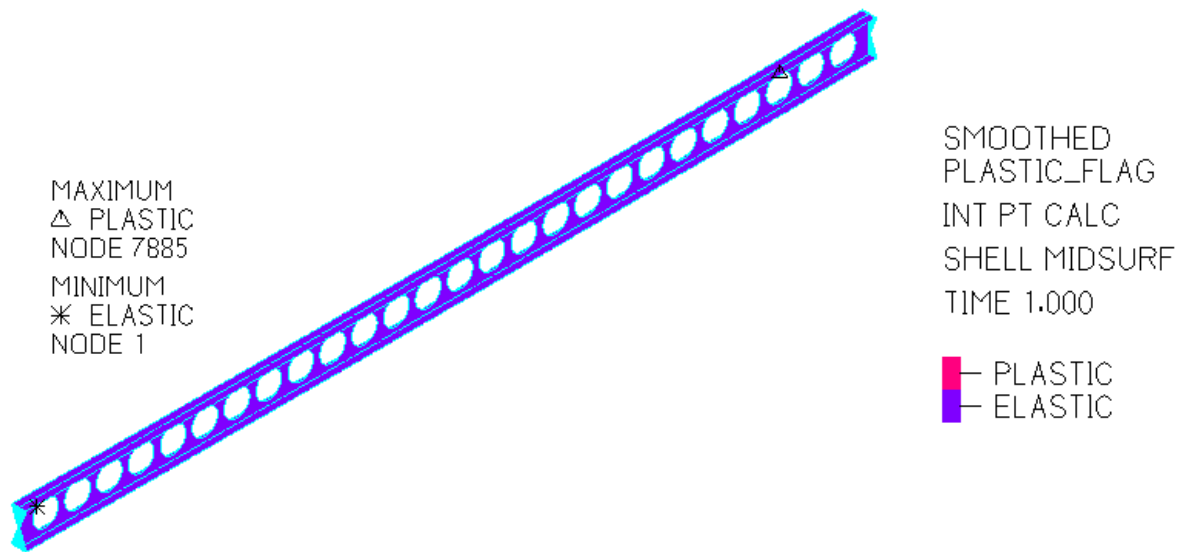
Σχήμα 5-26: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 262.50$ mm



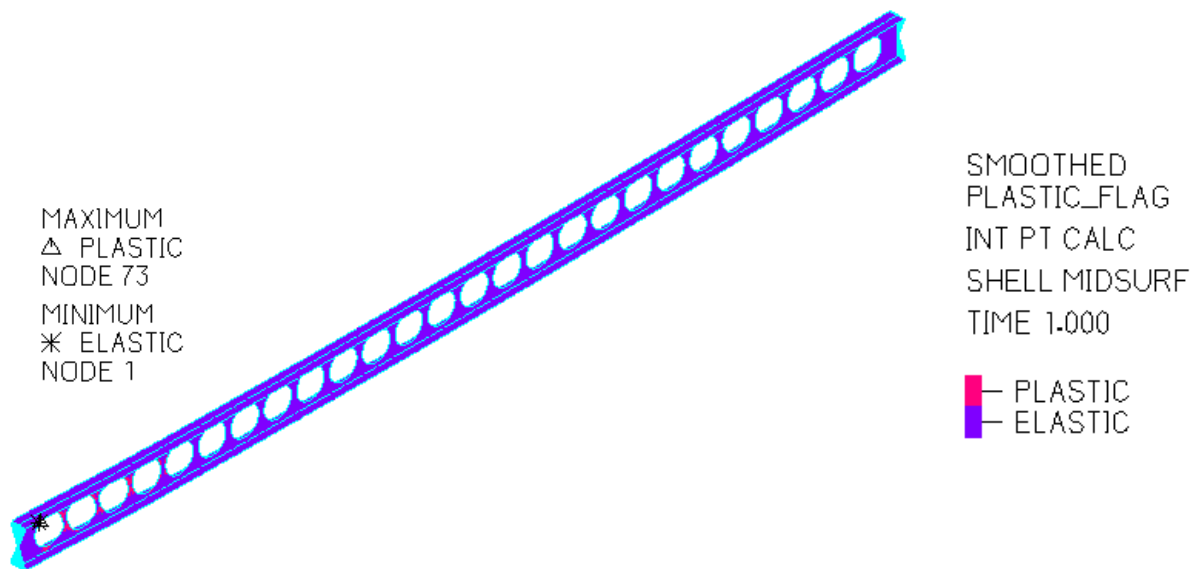
Σχήμα 5-27: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 275$ mm



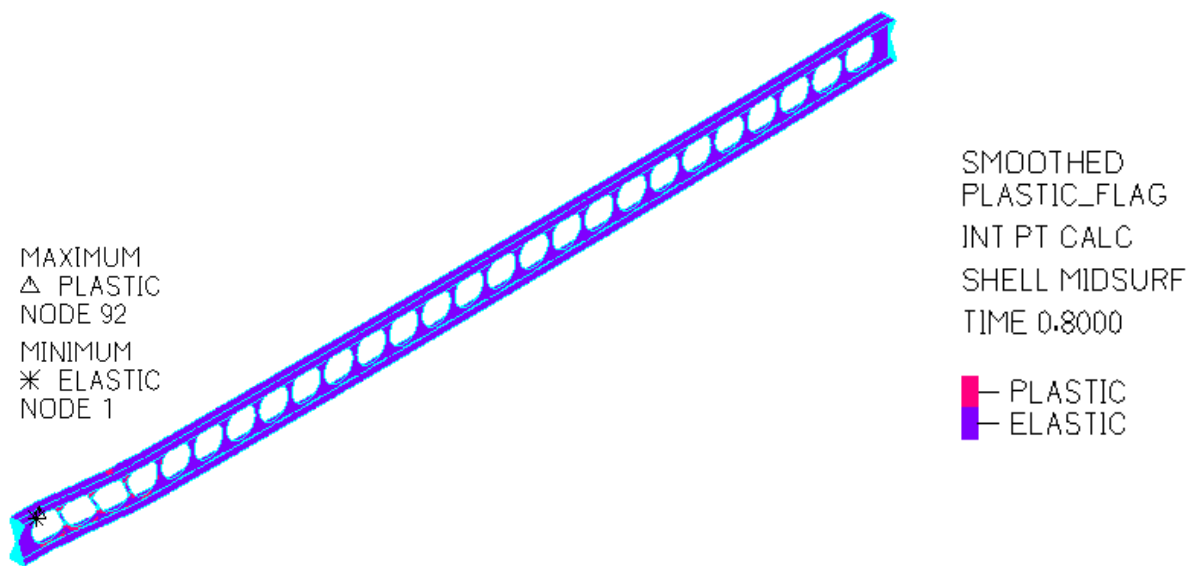
Σχήμα 5-28: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 287.50$ mm



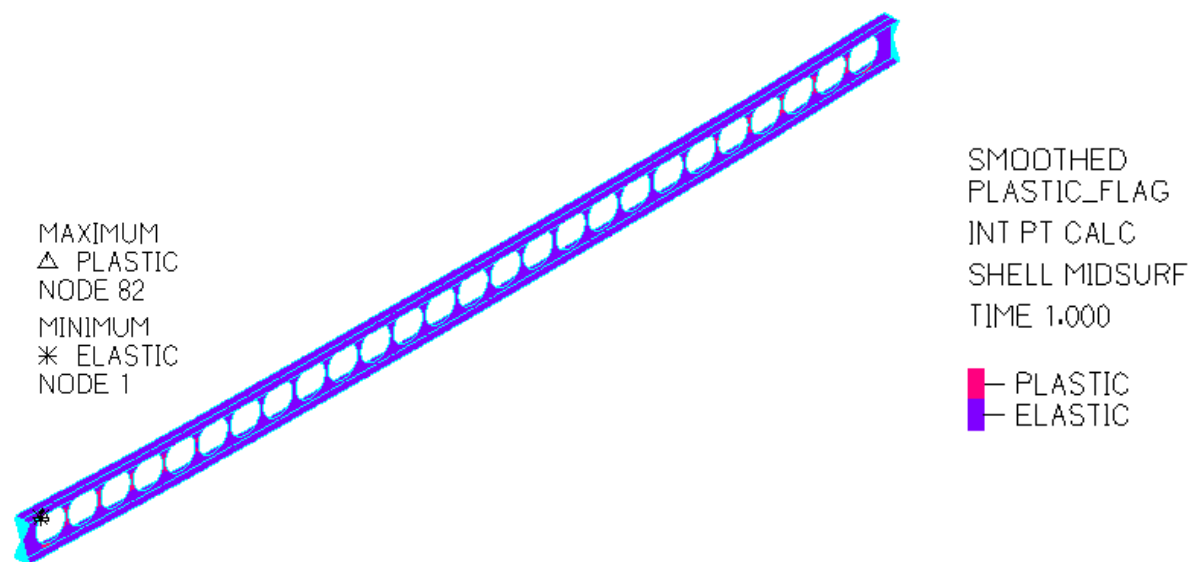
Σχήμα 5-29: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 300$ mm



Σχήμα 5-30: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 312.50$ mm



Σχήμα 5-31: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 325$ mm



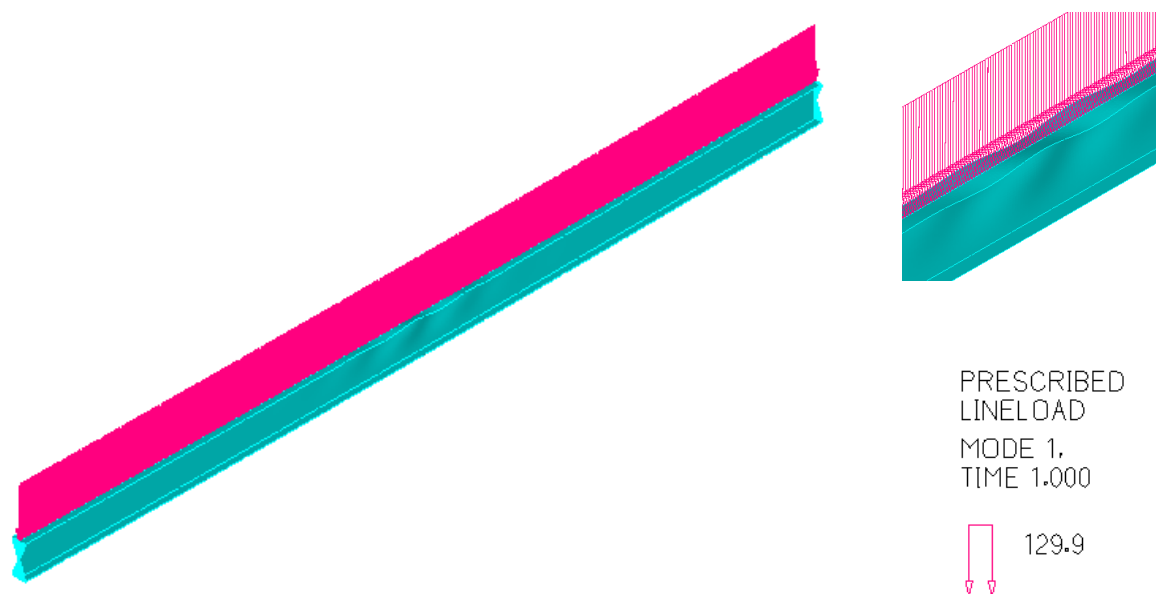
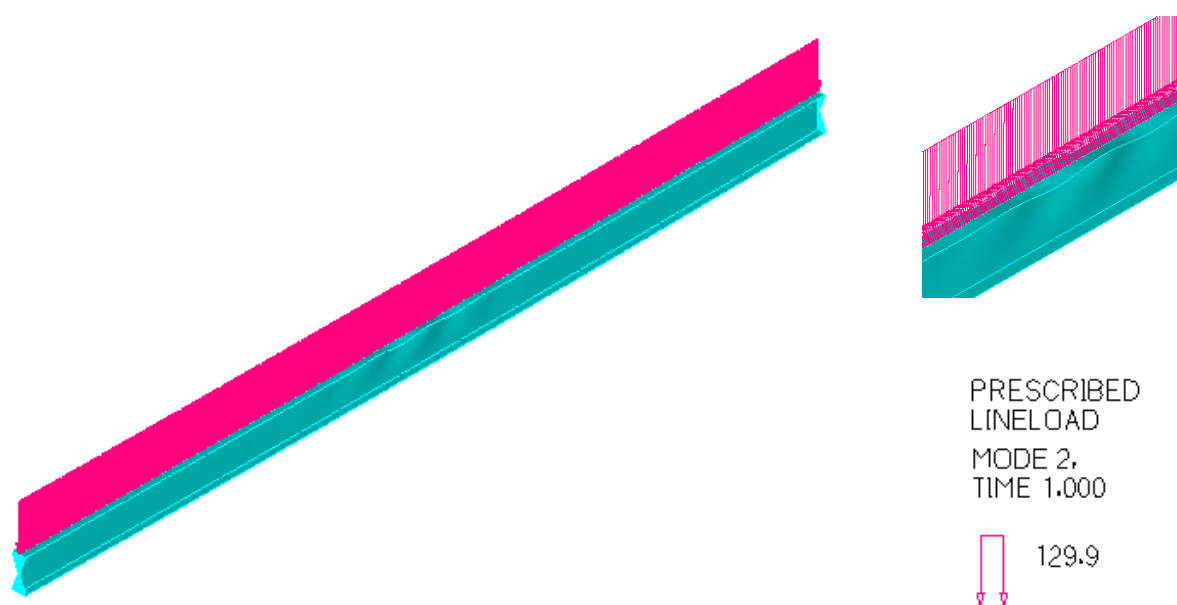
Σχήμα 5-32: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $h_o = 337.50$ mm

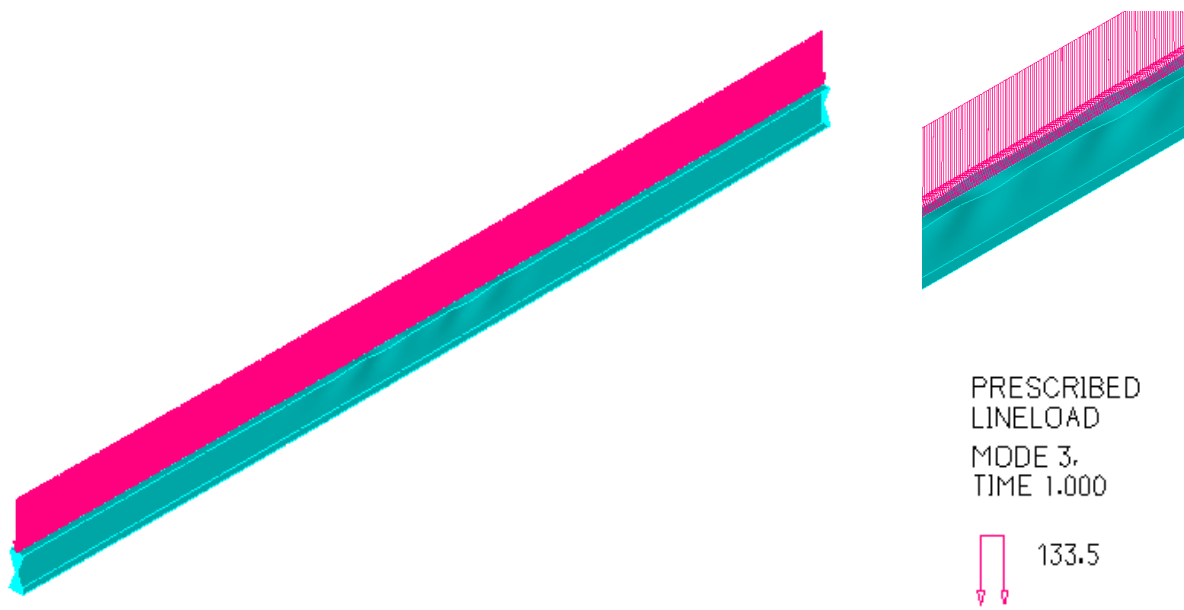
5.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΔΟΚΟΥ

Ακολουθως, έγινε προσομοίωση της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού στο πρόγραμμα ADINA, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 3.8 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται οι τιμές του φορτίου λυγισμού της συμπαγούς δοκού (P_{cr}) για τις πρώτες 6 ιδιομορφές και στο Σχήμα 5-33 έως το Σχήμα 5-38 απεικονίζονται οι πρώτες 6 ιδιομορφές λυγισμού, οι οποίες είναι ανά 2 αντισυμμετρικές. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr} = 129.90$ kN/m και η κρίσιμη μορφή αστοχίας σύμφωνα με την 1^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού είναι ο τοπικός λυγισμός κορμού και πέλματος στο μέσο της δοκού. Με την αύξηση της ιδιομορφής λυγισμού παρατηρείται και αύξηση της του μήκους στην περιοχή εμφάνισης τοπικού λυγισμού.

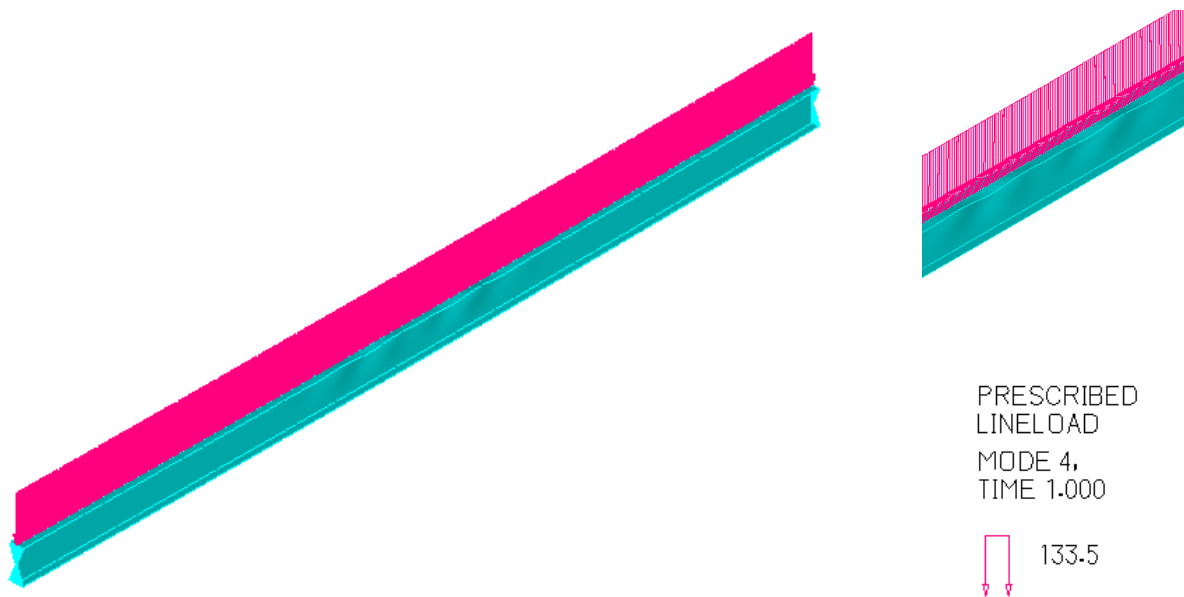
Πίνακας 5-2: Φορτίο λυγισμού συμπαγούς δοκού για τις πρώτες ιδιομορφές

Ιδιομορφή λυγισμού	Φορτίο λυγισμού P_{cr} (kN/m)
1 ^η	129.90
2 ^η	129.90
3 ^η	133.50
4 ^η	133.50
5 ^η	137.20
6 ^η	137.20

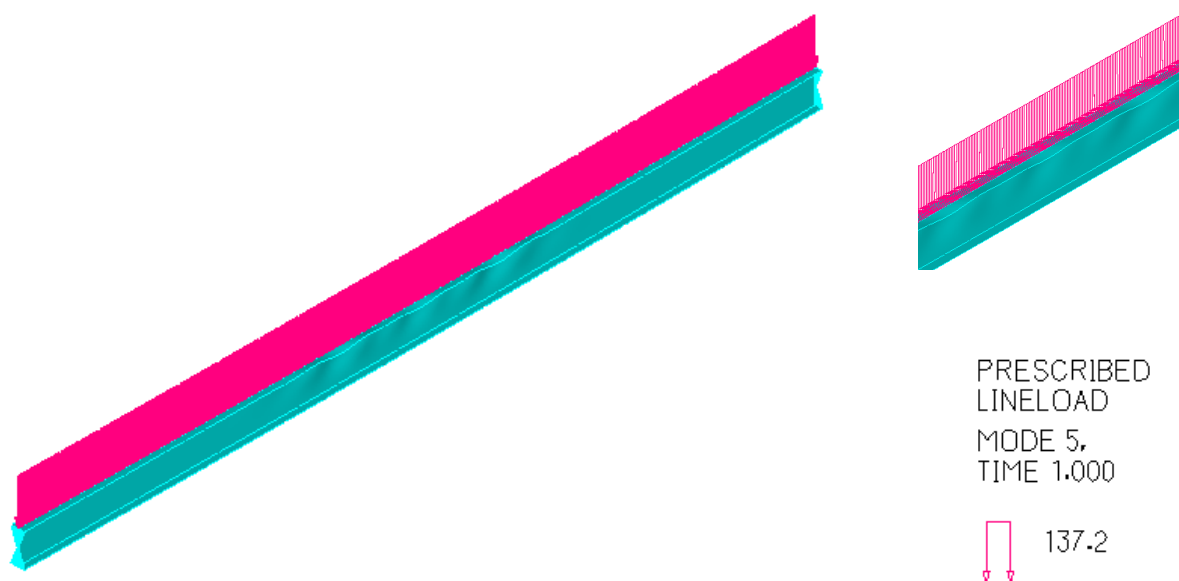
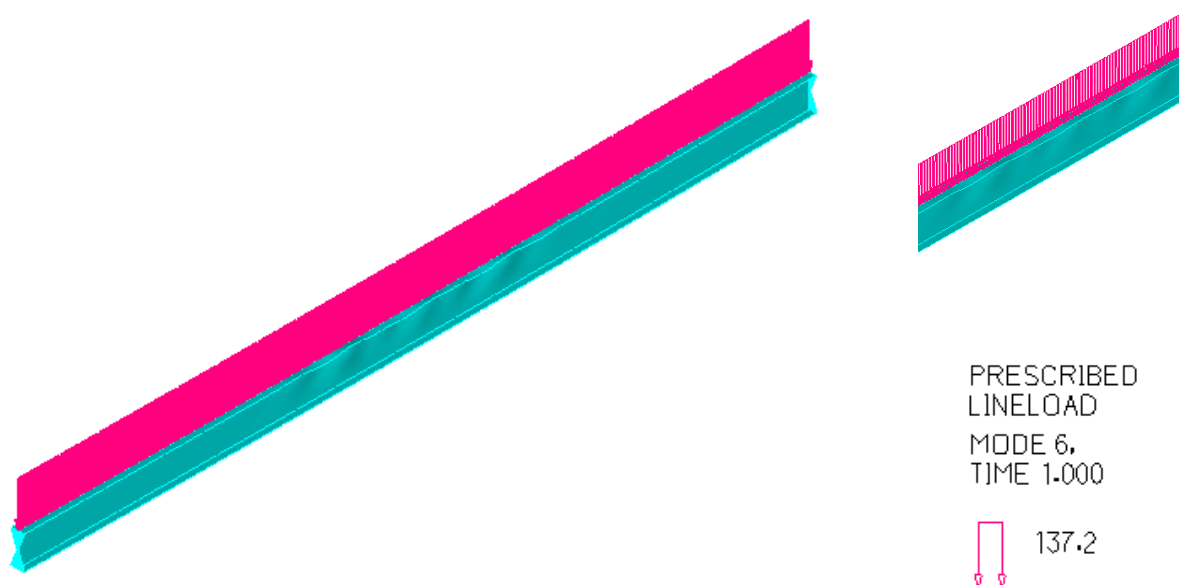
Σχήμα 5-33: 1^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμούΣχήμα 5-34: 2^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



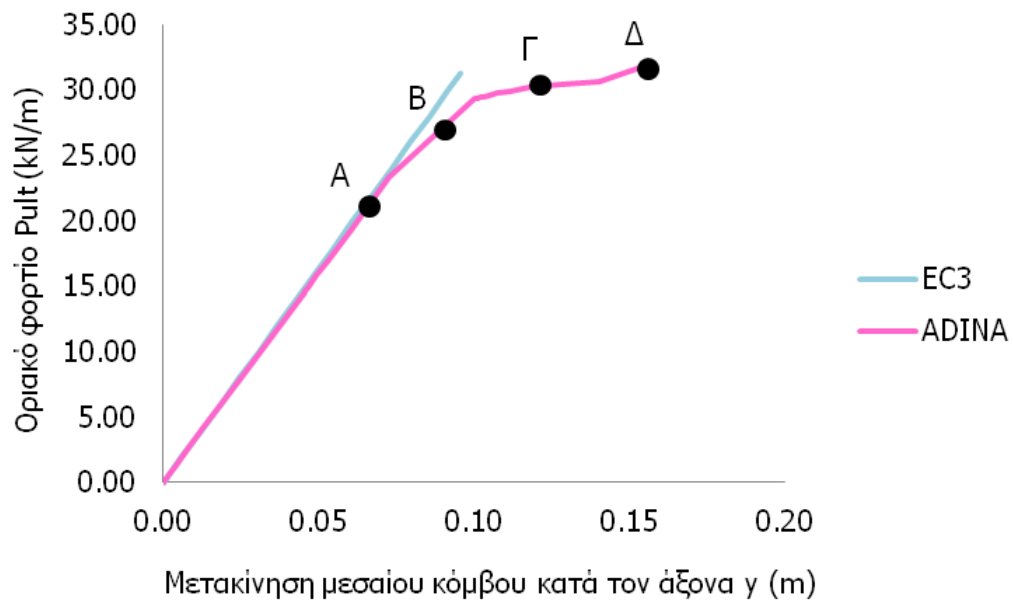
Σχήμα 5-35: 3^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού



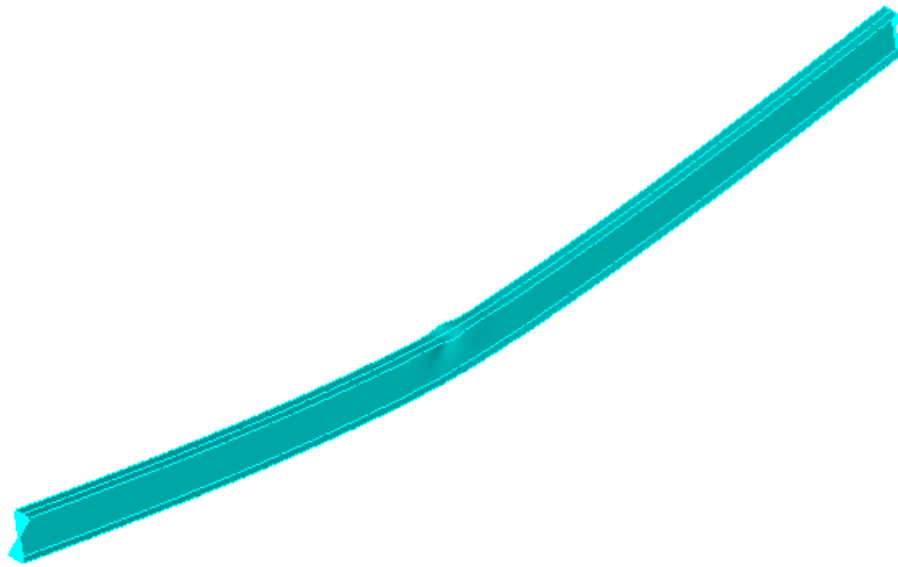
Σχήμα 5-36: 4^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Σχήμα 5-37: 5^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμούΣχήμα 5-38: 6^η Ιδιομορφή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

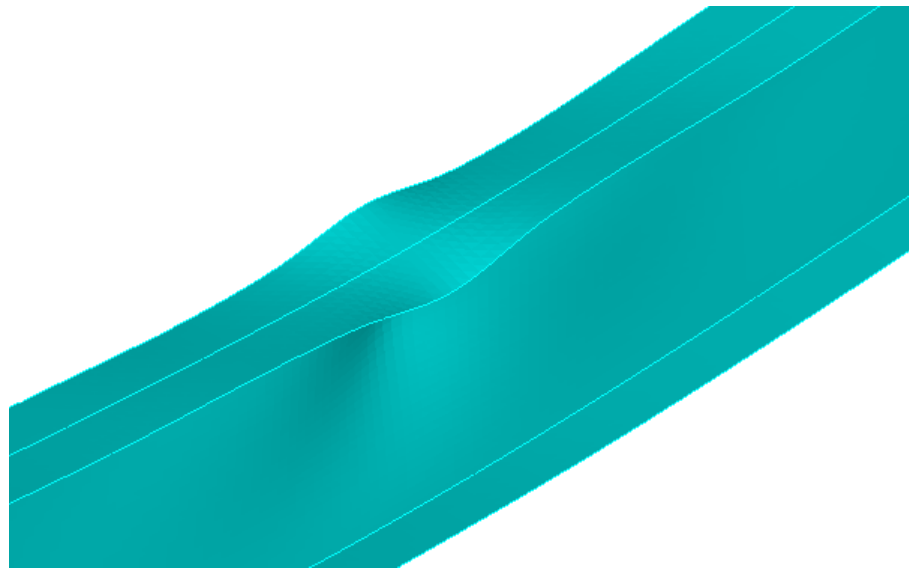
Το οριακό φορτίο της συμπαγούς δοκού σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνδυασμένης μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας ισούται με $P_{ult} = 31.83$ kN/m, ενώ σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 ισούται με $P_{ult} = 31.32$ kN/m. Στο Σχήμα 5-39 παρουσιάζεται η μετακίνηση (y) στο μέσο της δοκού συναρτήσει του οριακού φορτίου (P_{ult}) και στο Σχήμα 5-40 απεικονίζεται η παραμορφωμένη εικόνα της συμπαγούς δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης, όπου παρατηρείται πως η δοκός αστοχεί από ελαστοπλαστικό λυγισμό στο άνω πέλμα λόγω διαρροής από κάμψη.



Σχήμα 5-39: Δρόμος ισορροπίας συμπαγούς δοκού



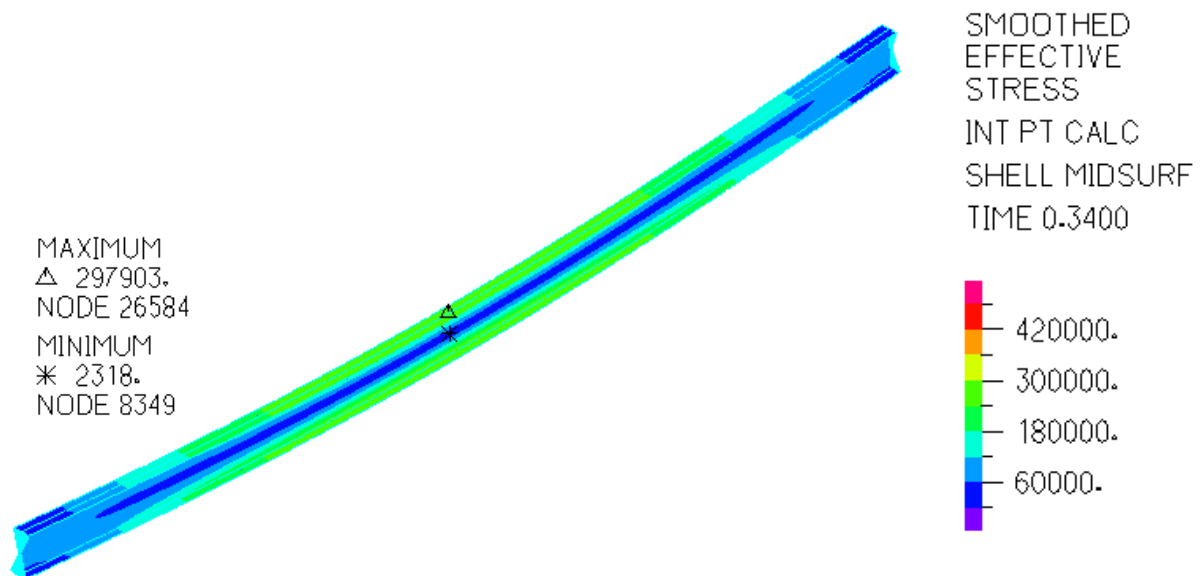
(a)



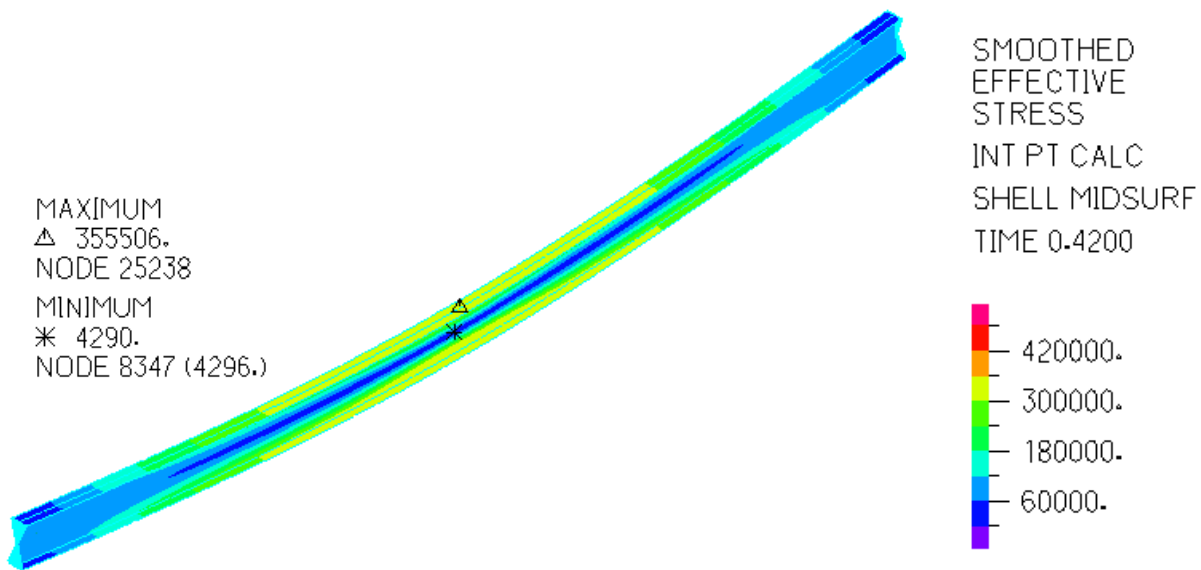
(β)

Σχήμα 5-40: Παραμορφωμένη εικόνα (α) κατά μήκος και (β) στο μέσο της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης

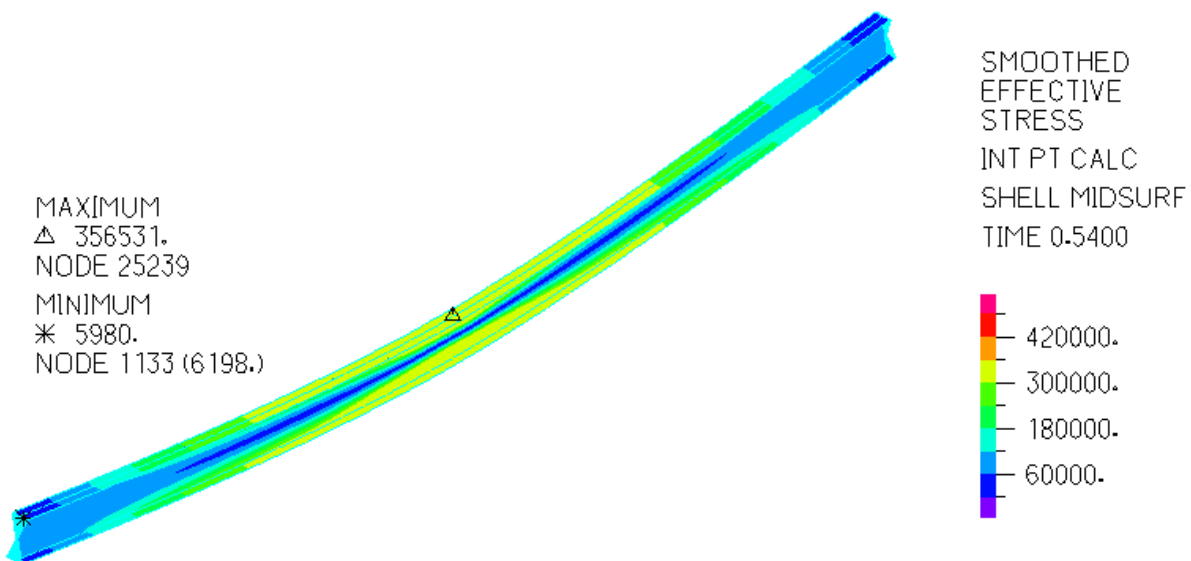
Στο Σχήμα 5-41 έως το Σχήμα 5-44 απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού σε τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας του Σχήματος 5-39. Στο Σημείο Α, το οποίο αντιστοιχεί στον ελαστικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας, η τιμή της μέγιστης τάσης δεν υπερβαίνει το όριο διαρροής. Λίγο πριν συμβεί η 1^η διαρροή της δοκού, στο Σημείο Β, εντοπίζεται υπέρβαση του ορίου διαρροής ($f_y = 355 \text{ MPa}$) στο άνω πέλμα της μεσαίας διατομής. Ύστερα από την 1^η διαρροή, στο Σημείο Γ, παρατηρείται υπέρβαση του ορίου διαρροής σε μεγαλύτερο μέρος στο μέσο της δοκού. Τη στιγμή της αστοχίας της συμπαγούς δοκού, Σημείο Δ, η διαρροή είναι πιο έντονη στο μέσο του ανοίγματος και έχει επεκταθεί στα πέλματα.



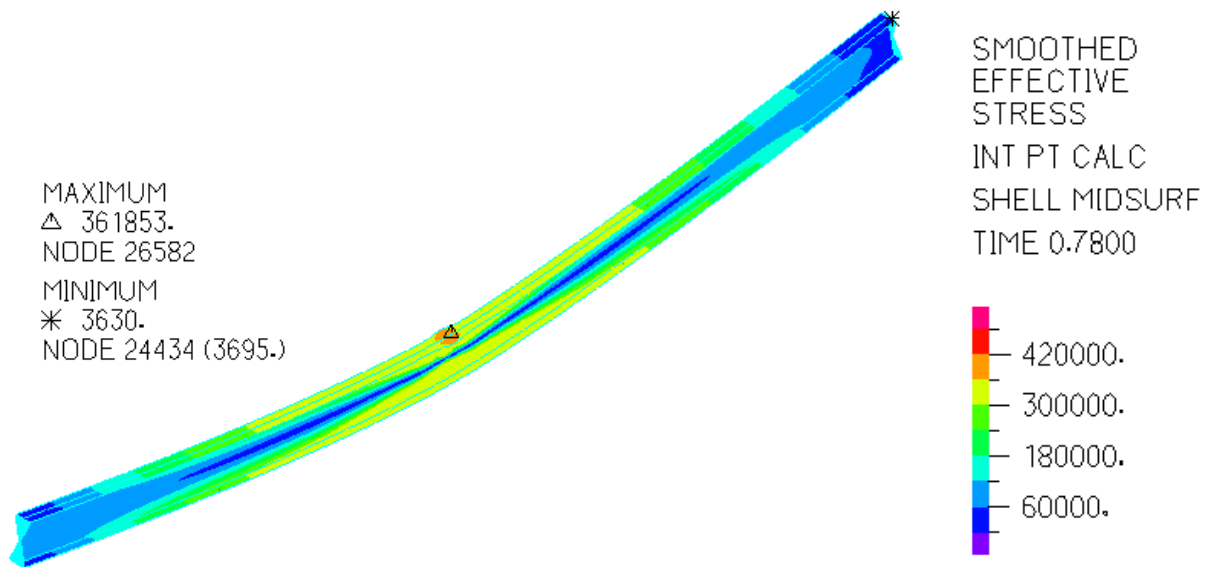
Σχήμα 5-41: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Α



Σχήμα 5-42: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Β

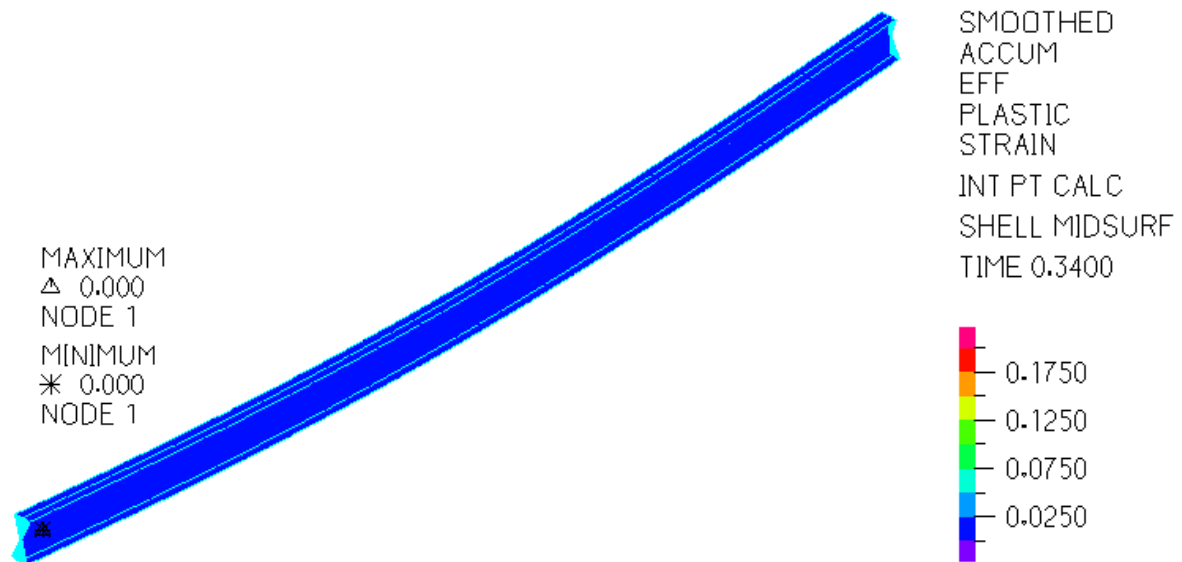


Σχήμα 5-43: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ

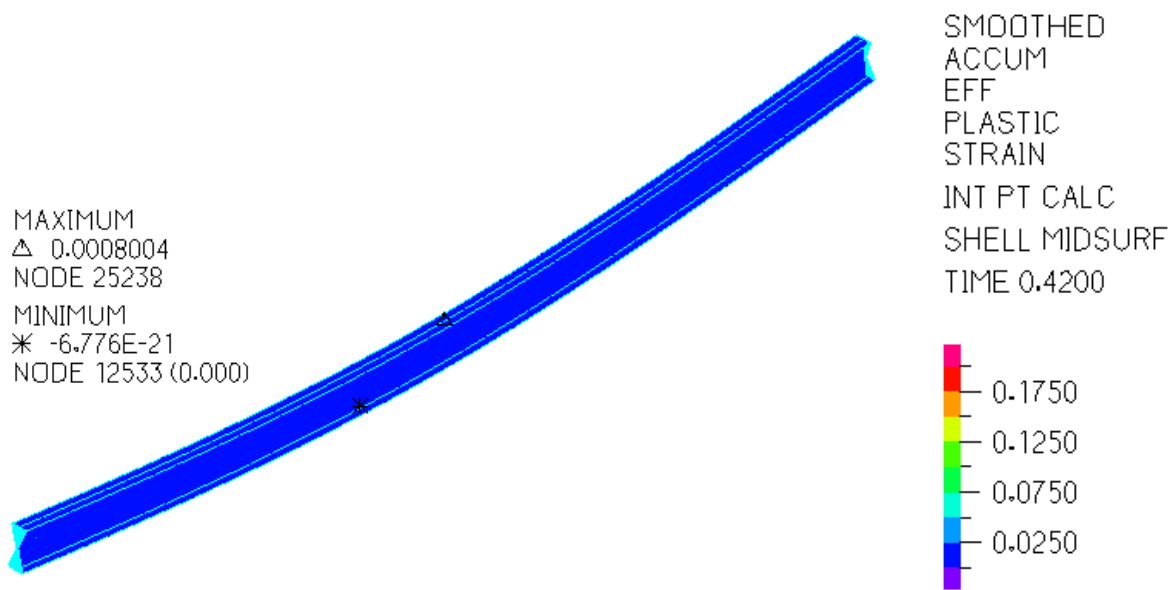


Σχήμα 5-44: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ

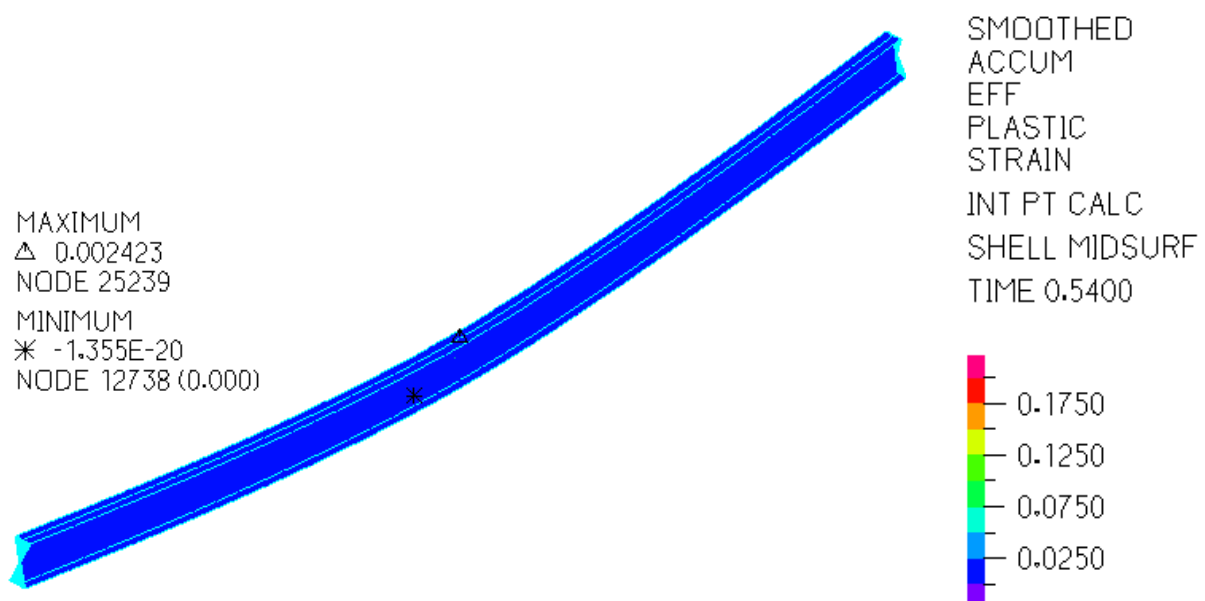
Στο Σχήμα 5-45 έως το Σχήμα 5-48 απεικονίζεται η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία. Η παραμόρφωση κατά μήκος της δοκού αυξάνεται σε μικρό βαθμό μέχρι την 1^η διαρροή και ύστερα παρατηρείται προοδευτική αύξηση μέχρι την αστοχία, όπου η μέγιστη τιμή της ισούται με $\epsilon = 1.149\%$ (Σημείο Δ) και εμφανίζεται στο μέσο της δοκού, όπως αναμένεται λόγω υψηλής συγκέντρωσης τάσεων.



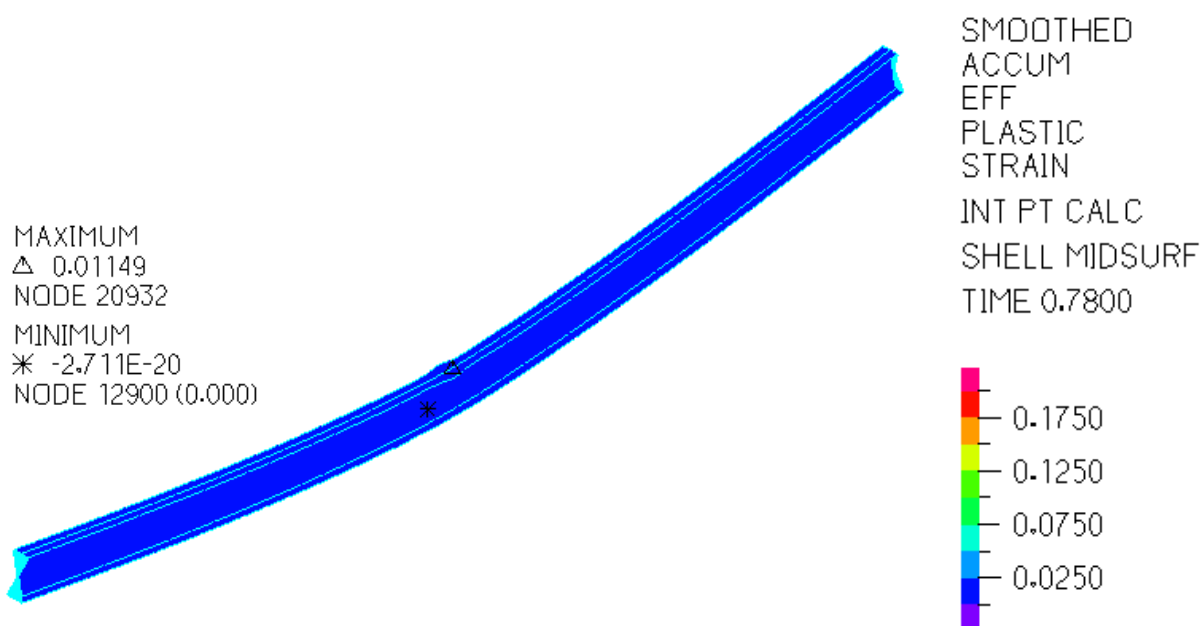
Σχήμα 5-45: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Α



Σχήμα 5-46: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Β

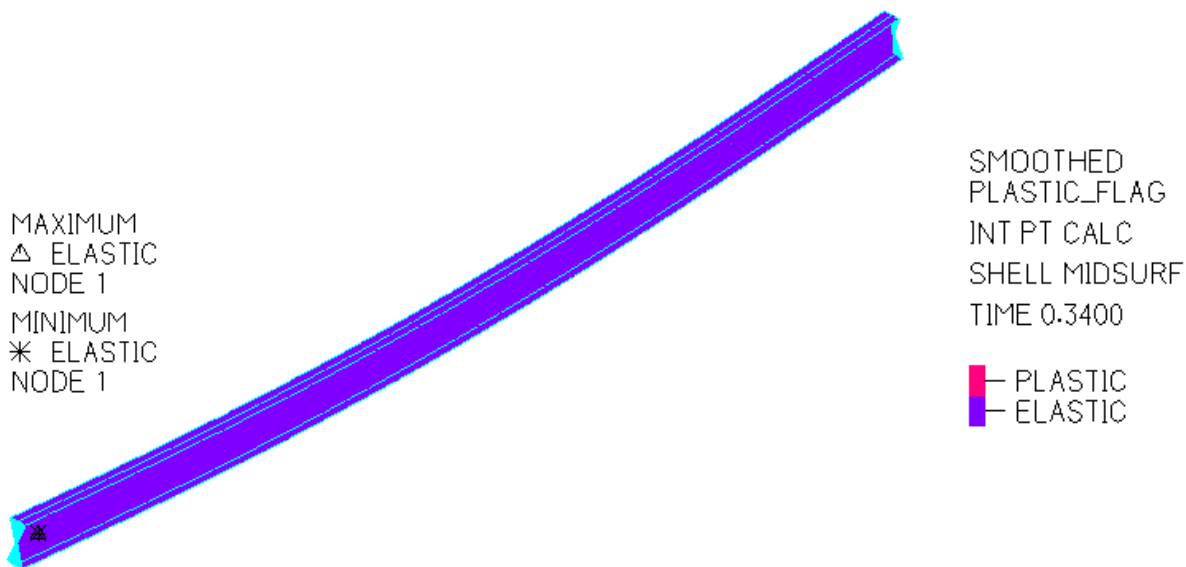


Σχήμα 5-47: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ

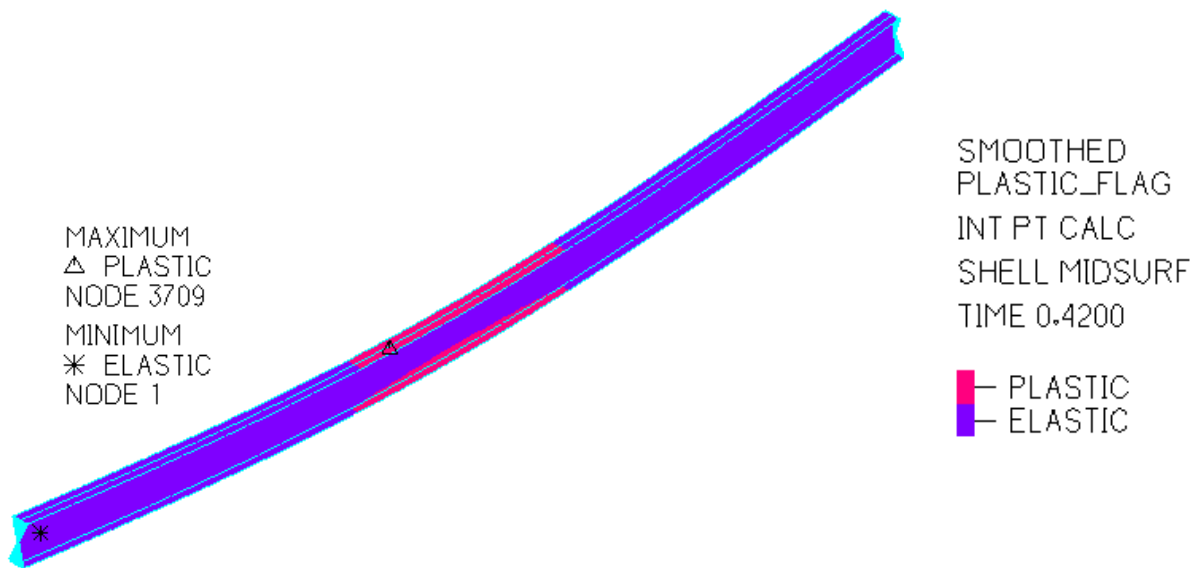


Σχήμα 5-48: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ

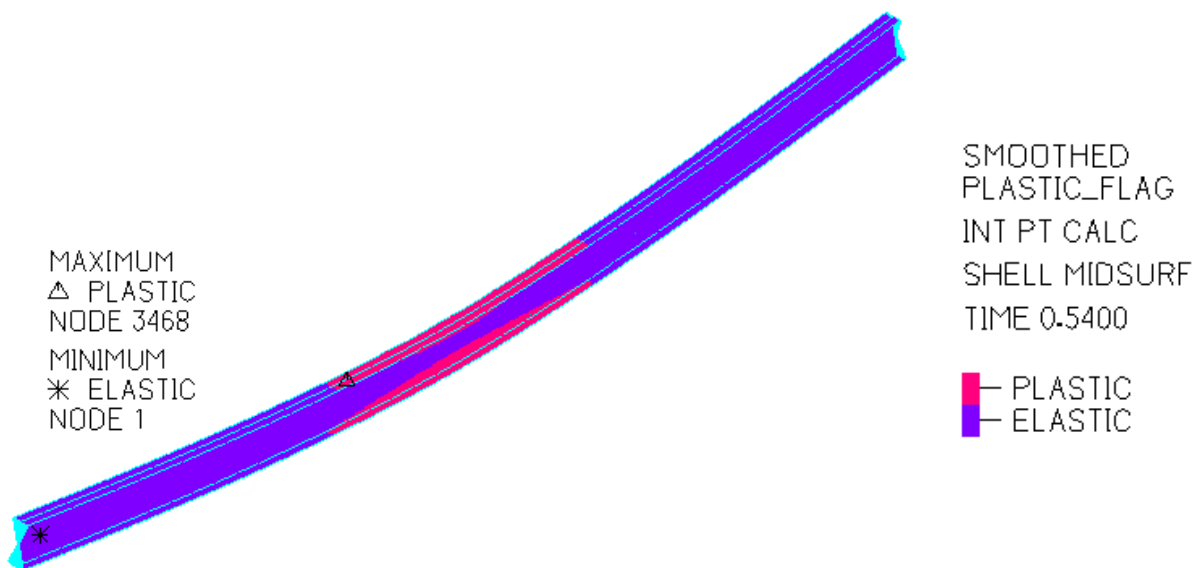
Στο Σχήμα 5-49 έως το Σχήμα 5-52 παρουσιάζεται η περιοχή πλαστικοποίησης της διατομής κατά μήκος της δοκού. Η δοκός εισέρχεται στην πλαστική περιοχή λίγο πριν την 1^η διαρροή (Σημείο Β) και παραμένει εκεί μέχρι την αστοχία (Σχήμα Δ). Η περιοχή πλαστικοποίησης εντοπίζεται στο μέσο της δοκού, στη διατομή των πελμάτων και στη διατομή του κορμού που κοντά στα πέλματα.



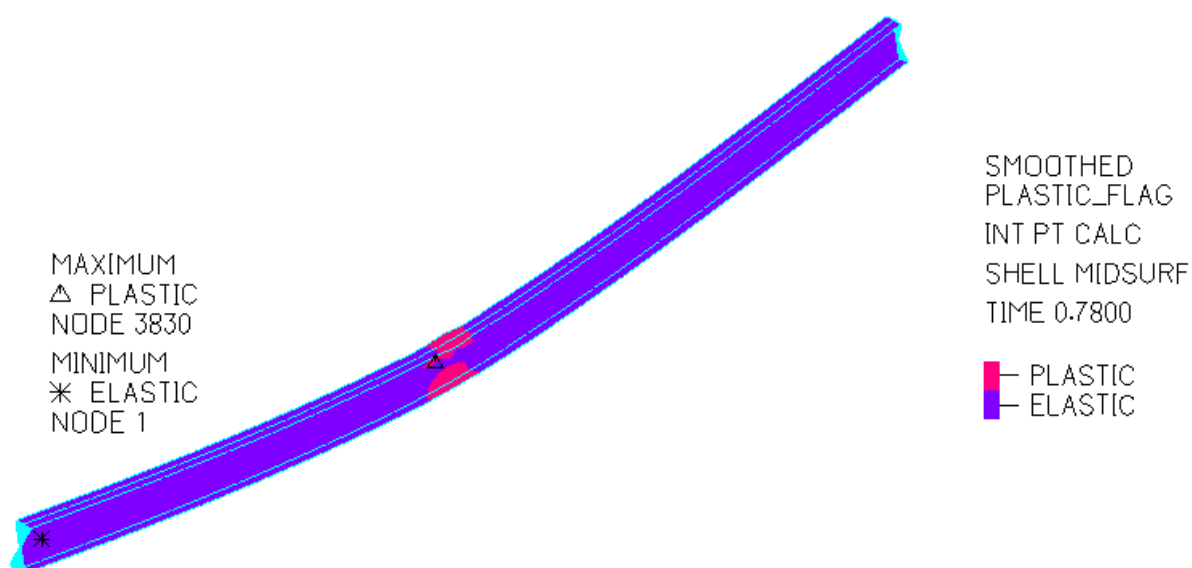
Σχήμα 5-49: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο Σημείο Α



Σχήμα 5-50: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο Σημείο Β



Σχήμα 5-51: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο Σημείο Γ

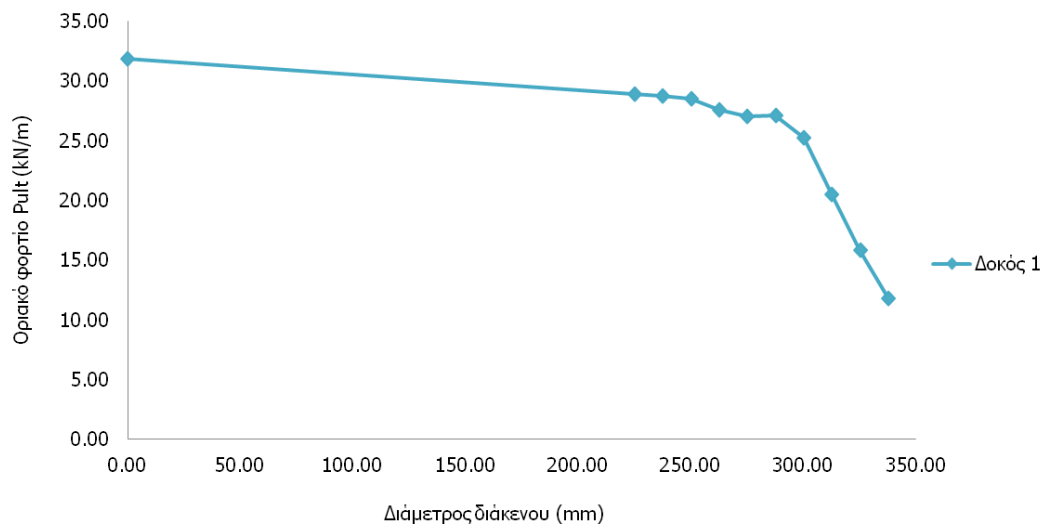


Σχήμα 5-52: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο Σημείο Δ

Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζεται το οριακό φορτίο (P_{ult}) της δοκού για όλες τις χαρακτηριστικές περιπτώσεις διαμέτρου διάκενου και για την περίπτωση της συμπαγούς δοκού. Στο Σχήμα 5-53 απεικονίζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της διαμέτρου του διάκενου και συμπεριλαμβανόμενης της περίπτωσης της συμπαγούς δοκού. Το οριακό φορτίο είναι μέγιστο για τη συμπαγή δοκό και μειώνεται σταδιακά μέχρι το μέγεθος διάκενου $h_o = 287.5$ mm. Στη συνέχεια, η τιμή του οριακού φορτίου ελαττώνεται απότομα και η αντοχή της δοκού μειώνεται αισθητά.

Πίνακας 5-3: Οριακό φορτίο για τη συμπαγή δοκό και για κάθε χαρακτηριστική περίπτωση διαμέτρου διάκενου

Διάμετρος διάκενου h_o (mm)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
0	31.83
225	28.89
237.5	28.73
250	28.52
262.50	27.61
275	27.05
287.50	27.10
300	25.26
312.50	20.48
325	15.84
337.50	11.80



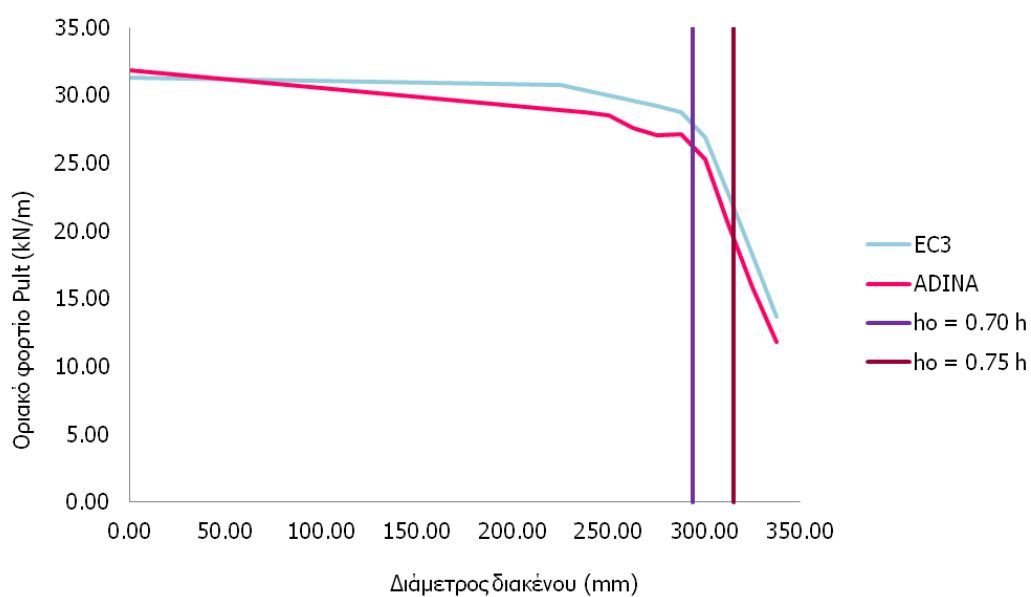
Σχήμα 5-53: Μεταβολή οριακού φορτίου

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

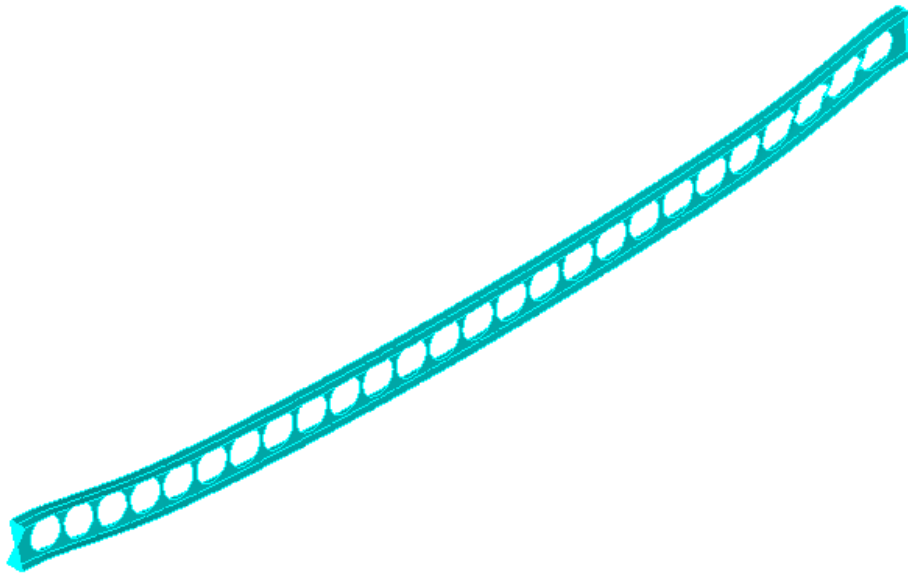
Ύστερα από τις αριθμητικές αναλύσεις έγινε έλεγχος της συμπαγούς δοκού και των δοκών για κάθε χαρακτηριστική περίπτωση διαμέτρου διάκενου σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζεται η Κατηγορία κατάταξης της διατομής και το οριακό φορτίο για όλες τις περιπτώσεις. Η συμπαγής δοκός κατατάσσεται ως Κατηγορία 1, ενώ για διάμετρο διακένου από $h_o = 225$ mm έως $h_o = 275$ mm η δοκός είναι Κατηγορίας 2. Με την αύξηση της διαμέτρου αυξάνεται και η Κατηγορία κατάταξης της διατομής και για $h_o = 287.50$ mm και έπειτα η διατομή είναι Κατηγορίας 3. Το οριακό φορτίο των δοκών σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 ταυτίζεται οριακά με το αντίστοιχο οριακό φορτίο των αριθμητικών αναλύσεων (Σχήμα 5-54). Με την αύξηση της διαμέτρου από $h_o = 300$ mm και ύστερα το οριακό φορτίο ελαττώνεται απότομα και η δοκός με $h_o = 337.50$ mm αστοχεί από λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού αφού ο έλεγχος δεν ικανοποιείται. Στο Σχήμα 5-55 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη εικόνα της δοκού με διάμετρο $h_o = 337.50$ mm και παρατηρείται λυγισμός στο δυσμενέστερο συμπαγές τμήμα του κορμού (δίπλα στην στήριξη), όπου η τέμνουσα δύναμη είναι μέγιστη. Το προσχέδιο του EN1993-1-13 προτείνει η διάμετρος κυκλικών διακένων κορμού να μην υπερβαίνει το 0.75 του συνολικού ύψους της δοκού, όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 3.3.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις έντονη μείωση της απόκρισης της δοκού παρατηρείται για $h_o \geq 0.7 \cdot h$, όπου h είναι το συνολικό ύψος της δοκού.

Πίνακας 5-4: Κατηγορία διατομής και οριακό φορτίο δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13

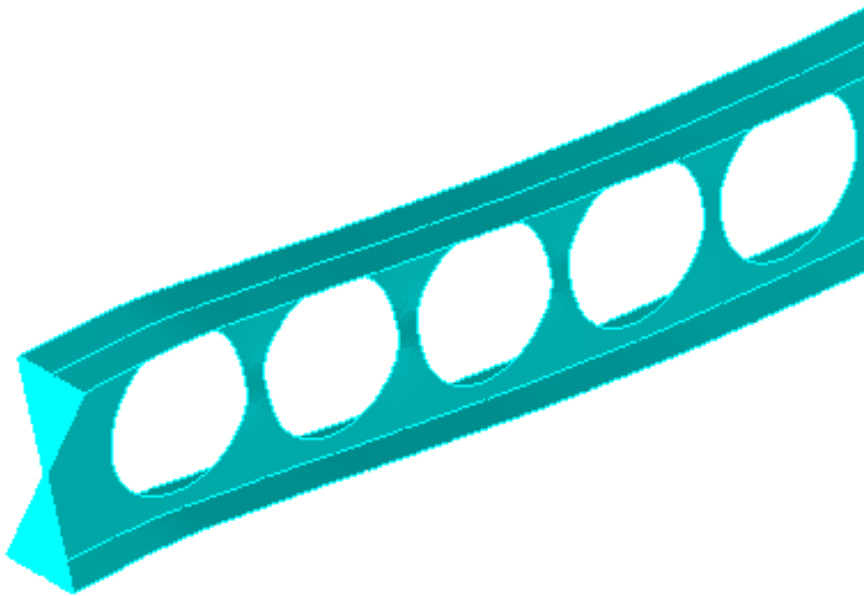
Διάμετρος διακένου h_o (mm)	Κατηγορία διατομής	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
0	1	31.32
225	2	30.74
237.50	2	30.36
250	2	29.98
262.50	2	29.59
275	2	29.19
287.50	3	28.79
300	3	26.93
312.50	3	22.75
325	3	18.24
337.5	3	13.64



Σχήμα 5-54: Μεταβολή οριακού φορτίου συναρτήσει της διαμέτρου του διακένου σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις και το προσχέδιο του EN1993-1-13



(α)



(β)

Σχήμα 5-55: Παραμορφωμένη εικόνα (α) κατά μήκος και (β) στο δυσμενέστερο συμπαγές τμήμα του κορμού της δοκού για $h_o = 337.50$ mm

6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

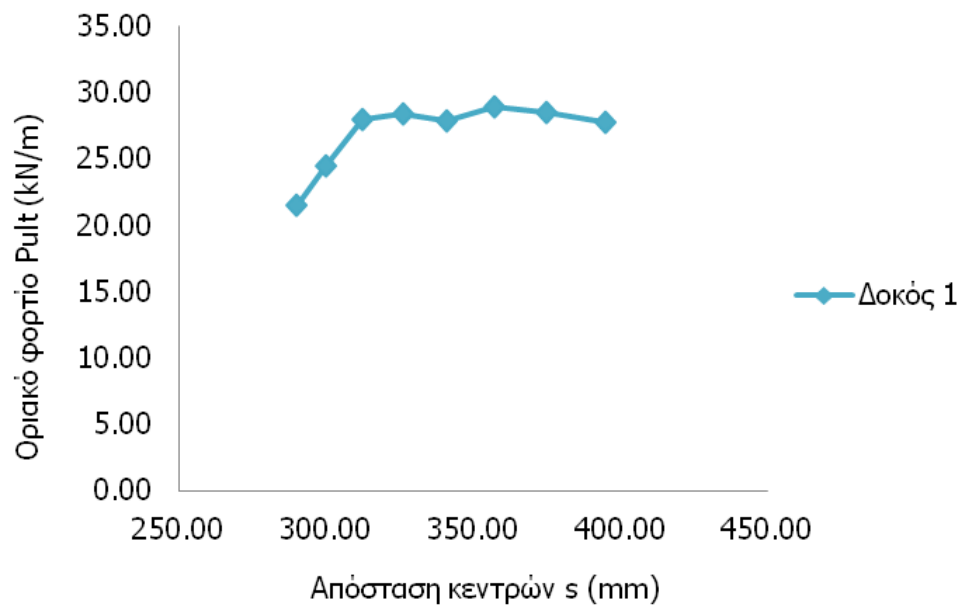
Η επίδραση της απόστασης των κέντρων γειτονικών διακένων (s) στην απόκριση της δοκού μελετάται για 8 περιπτώσεις. Η επιλογή του μεγέθους των αποστάσεων s γίνεται με σκοπό ο λόγος $\alpha = \frac{s}{h_o}$ να παραμένει σταθερός για τις αντίστοιχες παραμετρικές αναλύσεις με μεταβλητή τη διάμετρο των διακένων, ώστε ακολούθως να διερευνηθεί ποια μεταβλητή διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στην απόκριση της δοκού με διάκενα κορμού.

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΠΙΡΡΙΟΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΚΕΝΤΡΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ

Αρχικά, στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται οι αποστάσεις s που επιλέχθηκαν, ο αριθμός των διακένων και το οριακό φορτίο σε κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 6-1 παρουσιάζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της απόστασης των κέντρων γειτονικών διακένων. Το οριακό φορτίο μειώνεται προοδευτικά όσο μειώνεται η απόσταση s λόγω της απώλειας υλικού από τον κορμό της δοκού. Για τις τιμές $s = 290$ mm και $s = 300$ mm η αντοχή της δοκού μειώνεται απότομα, αφού έχει ελαττωθεί σε υψηλό ποσοστό το συμπαγές τμήμα του κορμού (Σχήμα 6-2).

Πίνακας 6-1: Οριακό φορτίο και αριθμός διακένων δοκού για κάθε περίπτωση αποστάσεως

Απόσταση διακένων s (mm)	Αριθμός διακένων n_o	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
290	33	21.44
300	33	24.47
312.50	31	27.96
326	30	28.37
341	29	27.87
357.25	28	28.92
375	26	28.52
394.75	25	27.78



Σχήμα 6-1: Μεταβολή οριακού φορτίου δοκού συναρτήσει της απόστασης των κέντρων γειτονικών διακένων



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)



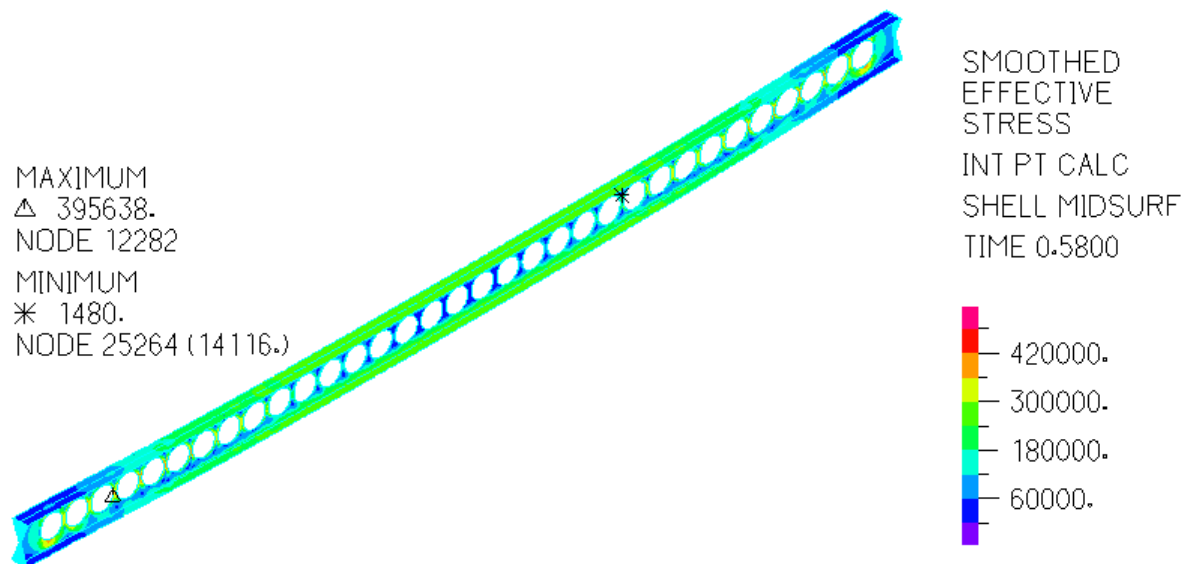
(η)



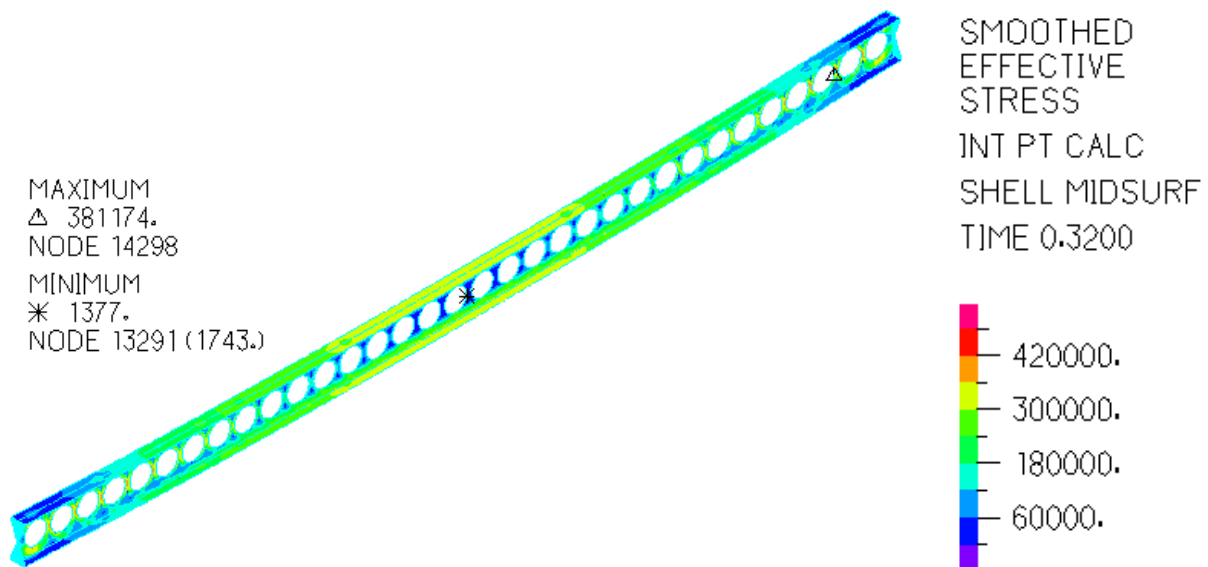
(θ)

Σχήμα 6-2 Όψη δοκού για απόσταση κέντρων γειτονικών διακένων (α) $s = 290$ mm, (β) $s = 300$ mm, (γ) $s = 312.50$ mm, (δ) $s = 326$ mm, (ε) $s = 341$ mm, (ζ) $s = 357.25$ mm, (η) $s = 375$ mm και (θ) $s = 394.75$ mm

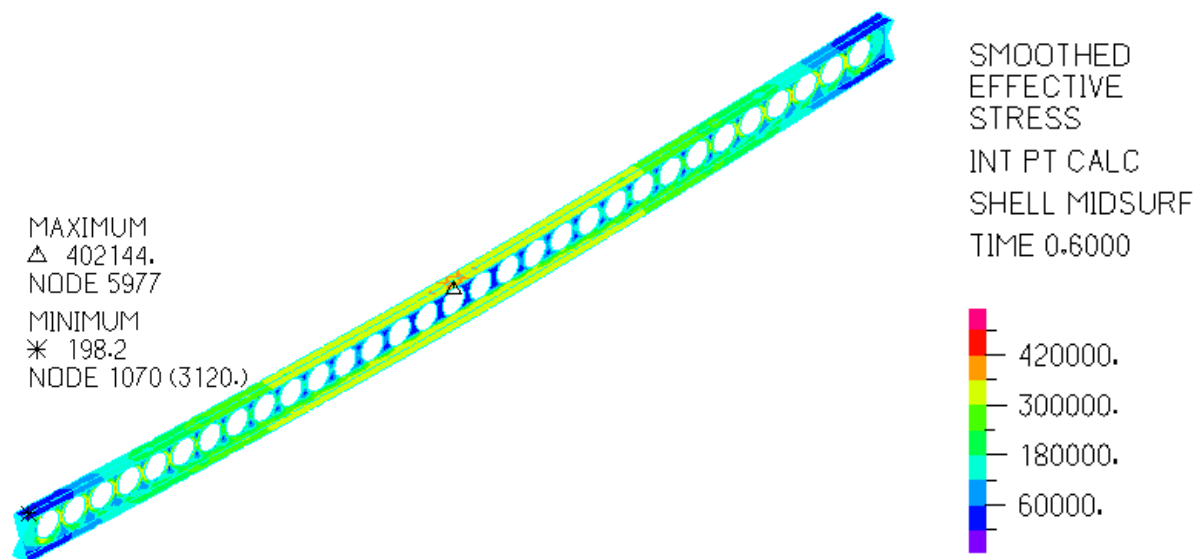
Στο Σχήμα 6-3 έως το Σχήμα 6-10 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Η τιμή της μέγιστης τάσης υπερβαίνει το όριο διαρροής της δοκού ($f_y = 355$ MPa) σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η υπέρβαση αυτή οφείλεται στην κράτυνση του χάλυβα που λαμβάνεται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις. Η τιμή της τάσεως von Mises μεγιστοποιείται στο μέσο της δοκού και ελαττώνεται σταδιακά μέχρι τα άκρα της όταν η απόσταση s και το συμπαγές τμήμα του κορμού μεταξύ των διακένων αυξάνεται. Στις περιπτώσεις $s = 290$ mm και $s = 300$ mm η μέγιστη τάση von Mises εντοπίζεται στο άκρο της δοκού και η τιμή της είναι μειωμένη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, καθώς λόγω της σημαντικής απώλειας υλικού η δοκός αστοχεί πιο γρήγορα.



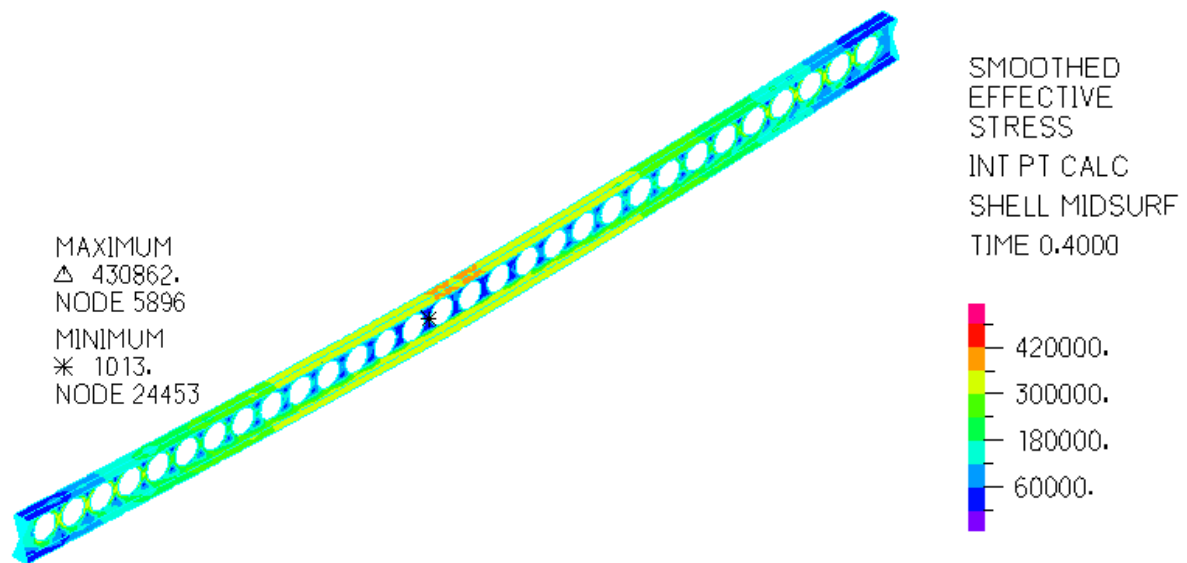
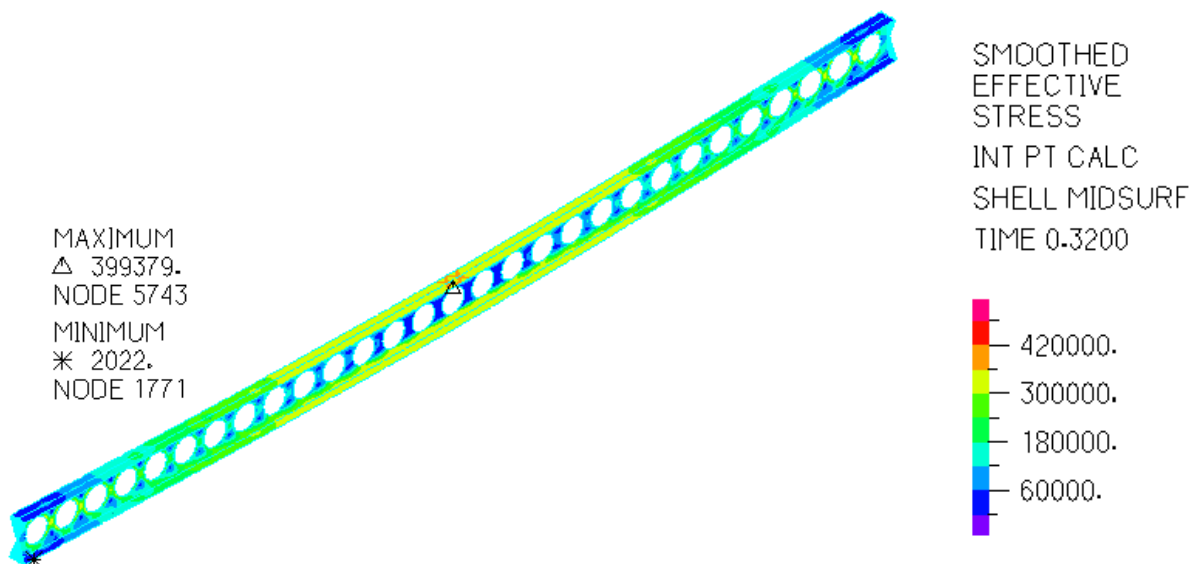
Σχήμα 6-3: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 290$ mm

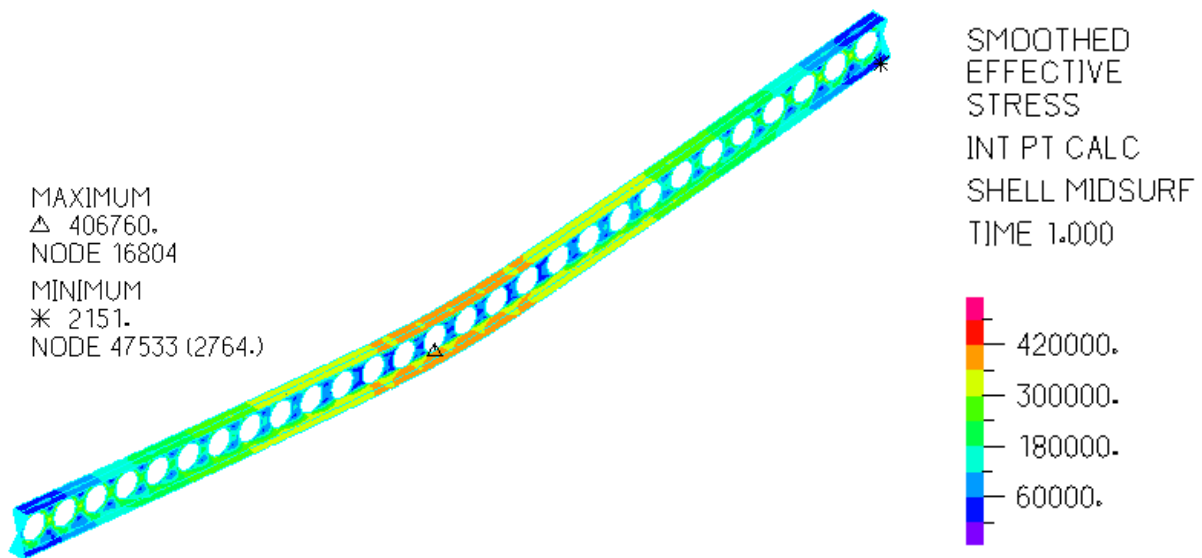


Σχήμα 6-4: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 300$ mm

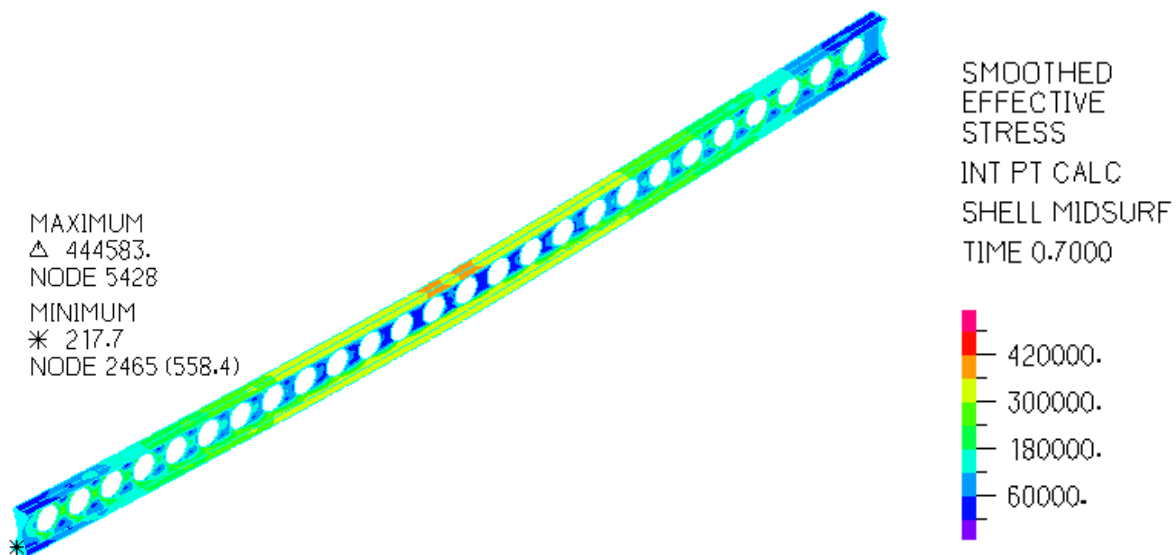


Σχήμα 6-5: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 312.50$ mm

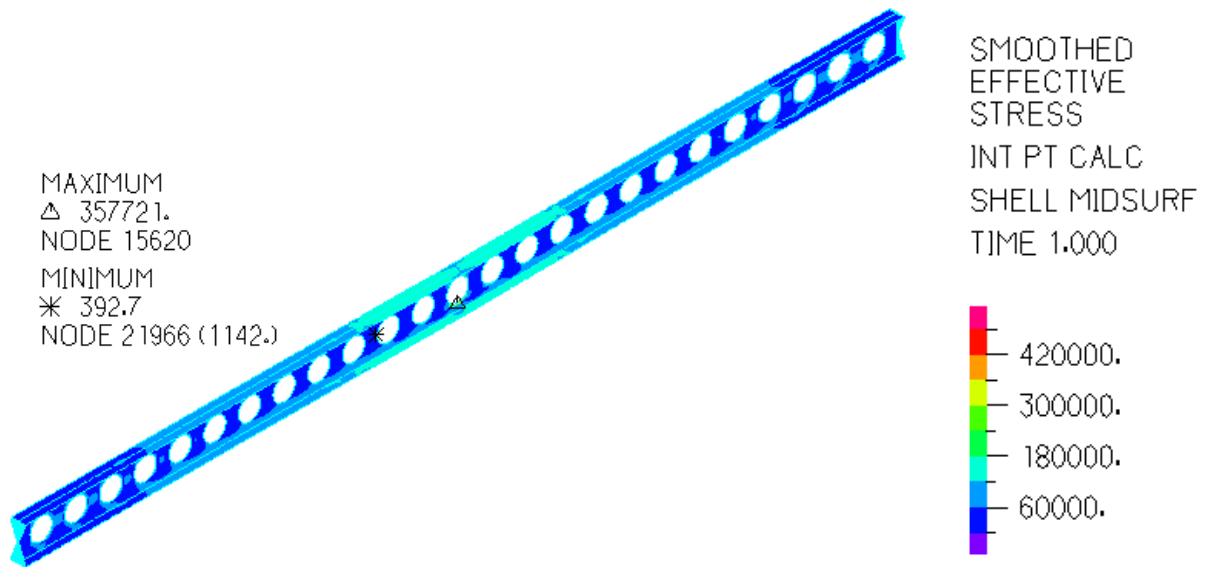
Σχήμα 6-6: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 326$ mmΣχήμα 6-7: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 341$ mm



Σχήμα 6-8: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 357.25$ mm

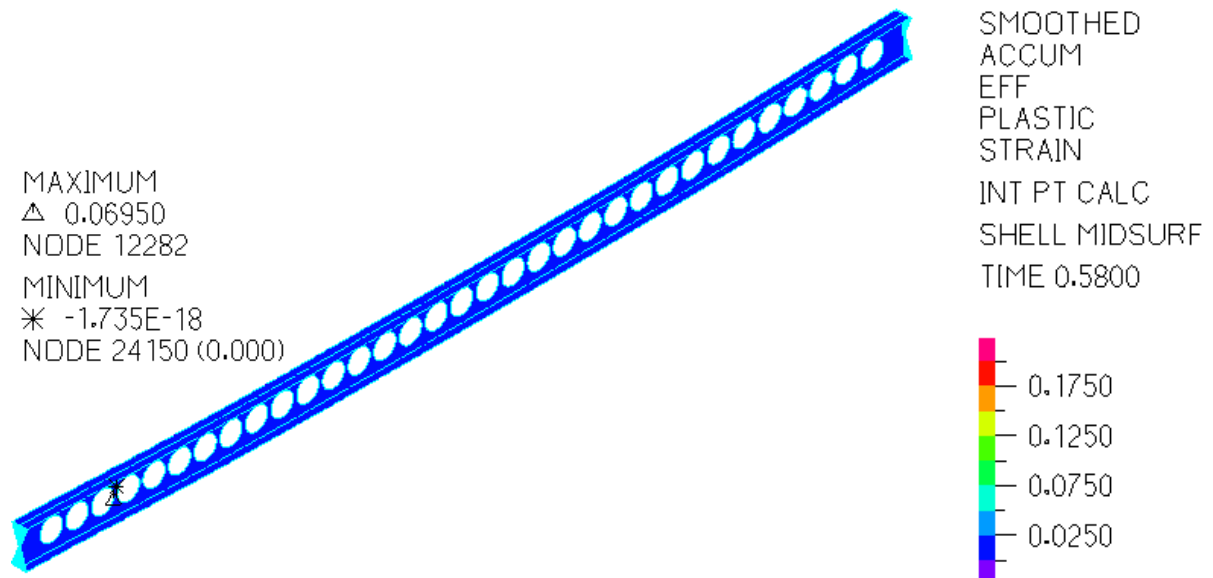


Σχήμα 6-9: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 375$ mm

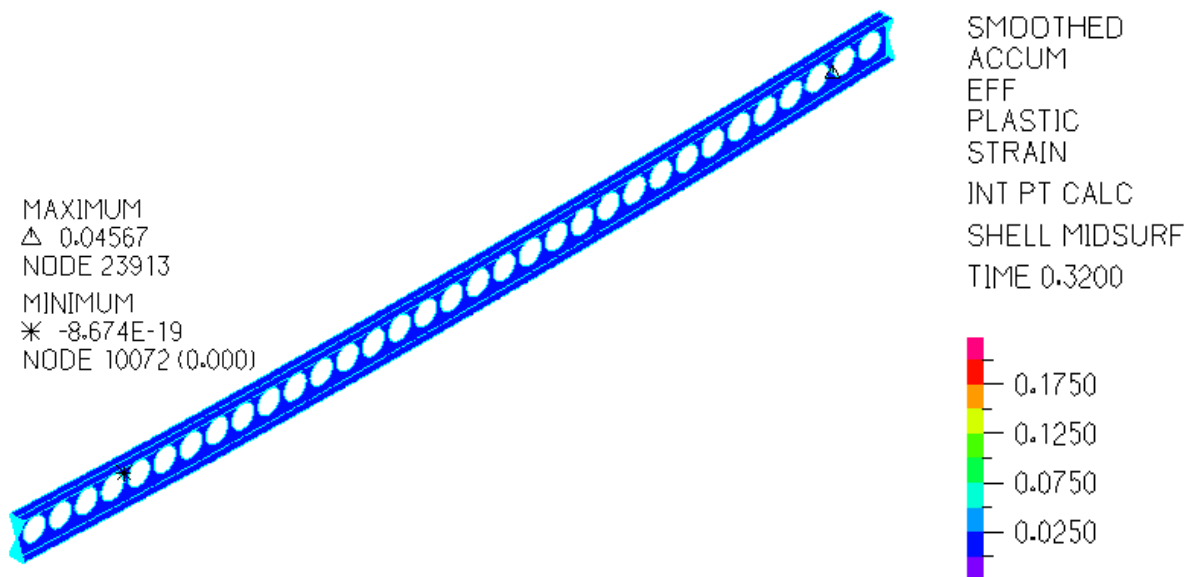


Σχήμα 6-10: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $s = 394.75$ mm

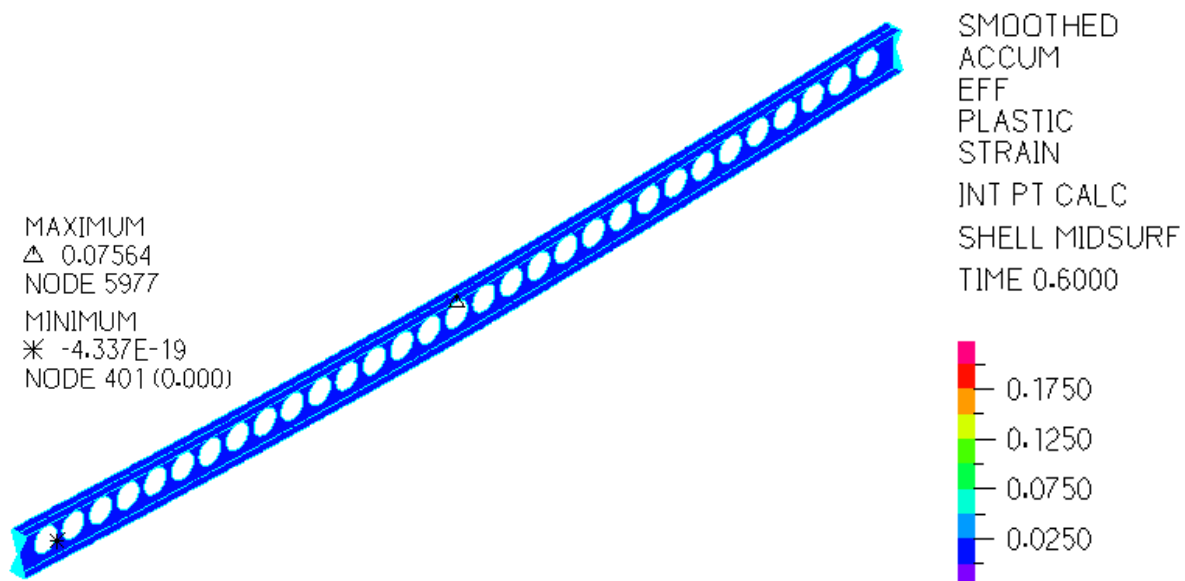
Στο Σχήμα 6-11 έως το Σχήμα 6-18 παρουσιάζεται η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Η μέγιστη παραμόρφωση της δοκού για μέγεθος αποστάσεως $s = 290$ mm και $s = 300$ mm εντοπίζεται στο άκρο της και δεν εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές, καθώς η σημαντική απώλεια υλικού διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην αστοχία και οδηγεί σε διατμητικό λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η μέγιστη τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης εντοπίζεται στο κέντρο της δοκού και η υψηλότερη τιμή παραμόρφωσης που παρατηρείται ισούται με $\epsilon = 19.98\%$ για $s = 394.75$ mm.



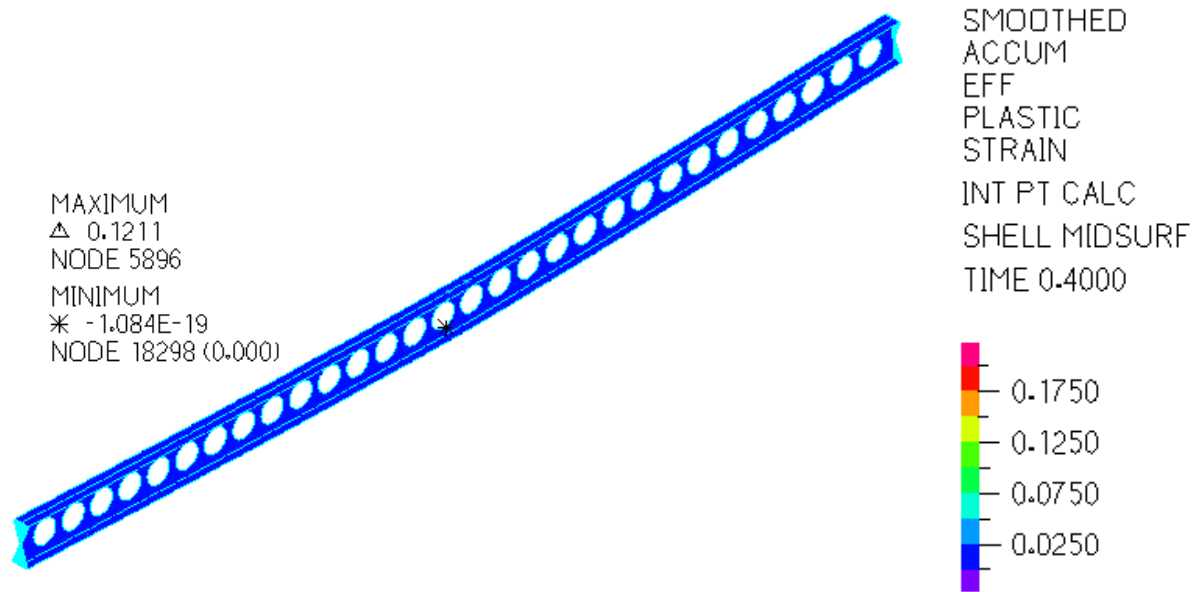
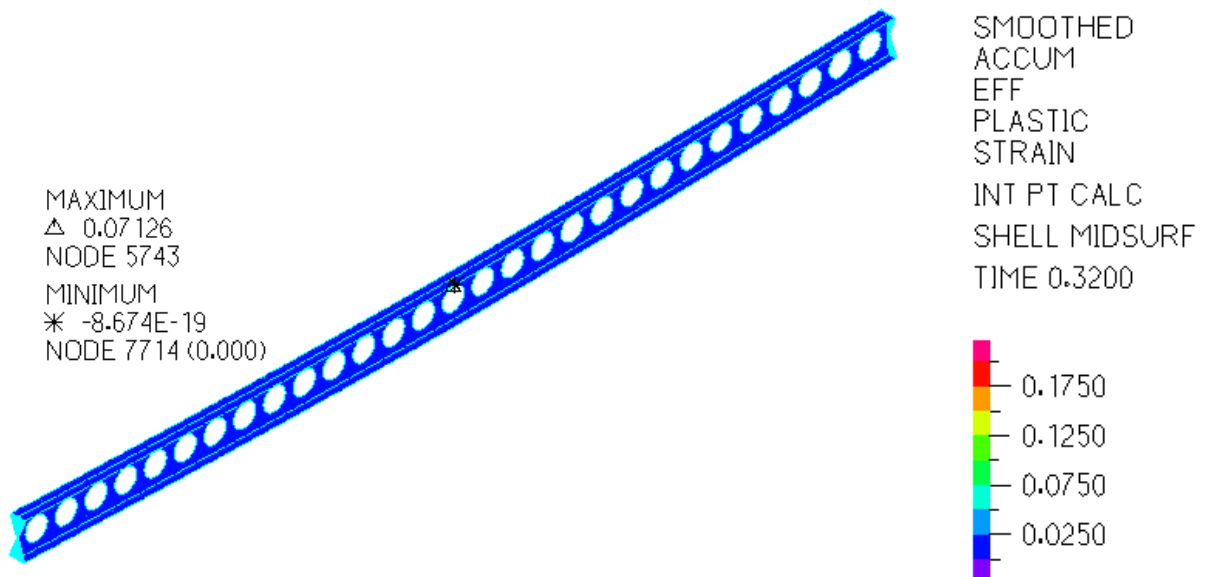
Σχήμα 6-11: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 290$ mm

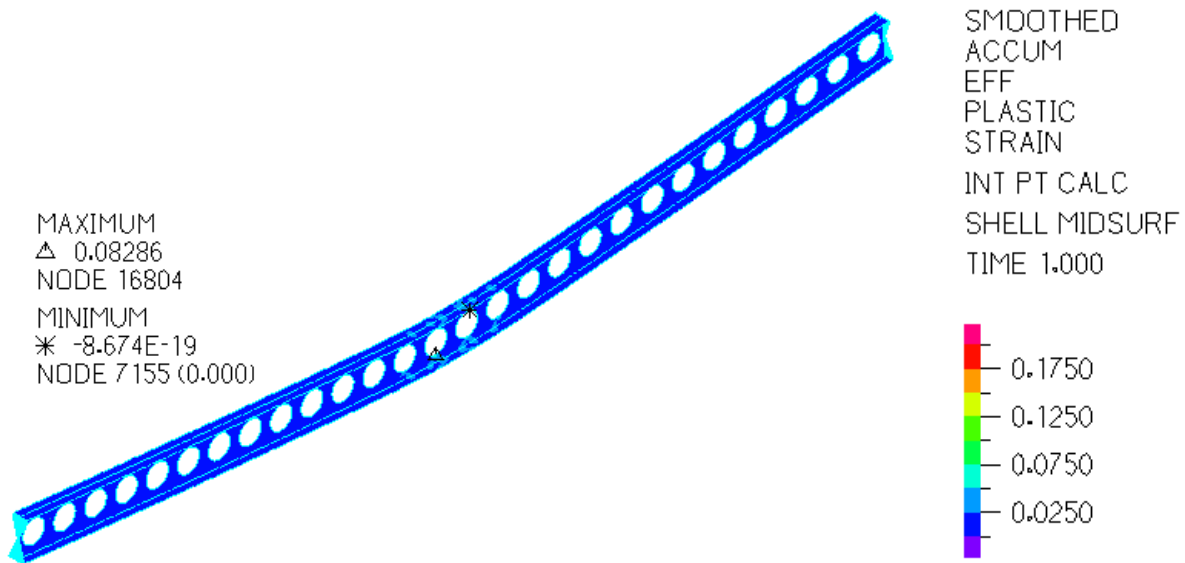


Σχήμα 6-12: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 300$ mm

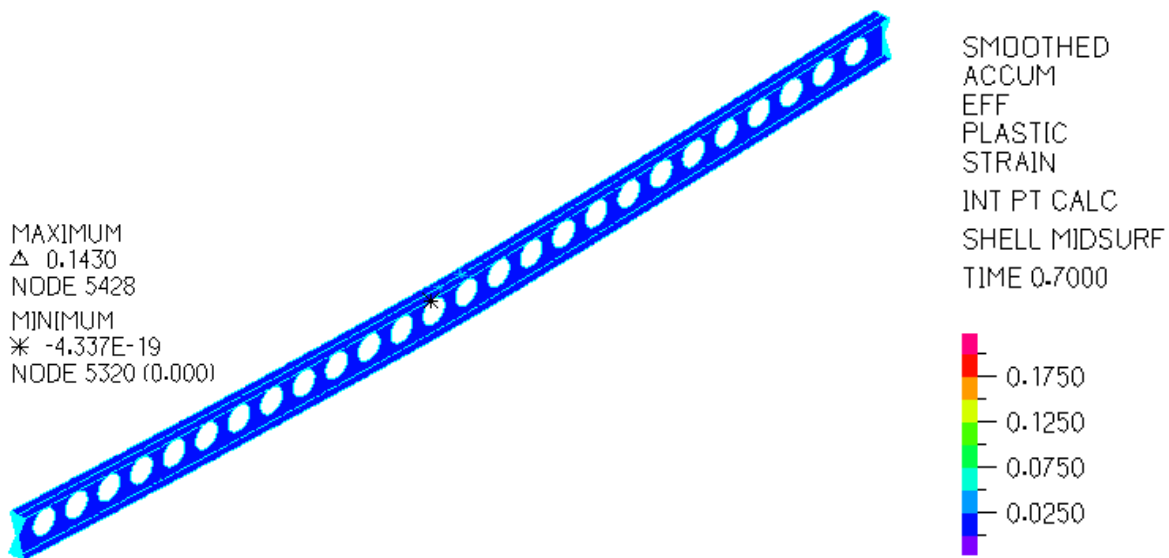


Σχήμα 6-13: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 312.50$ mm

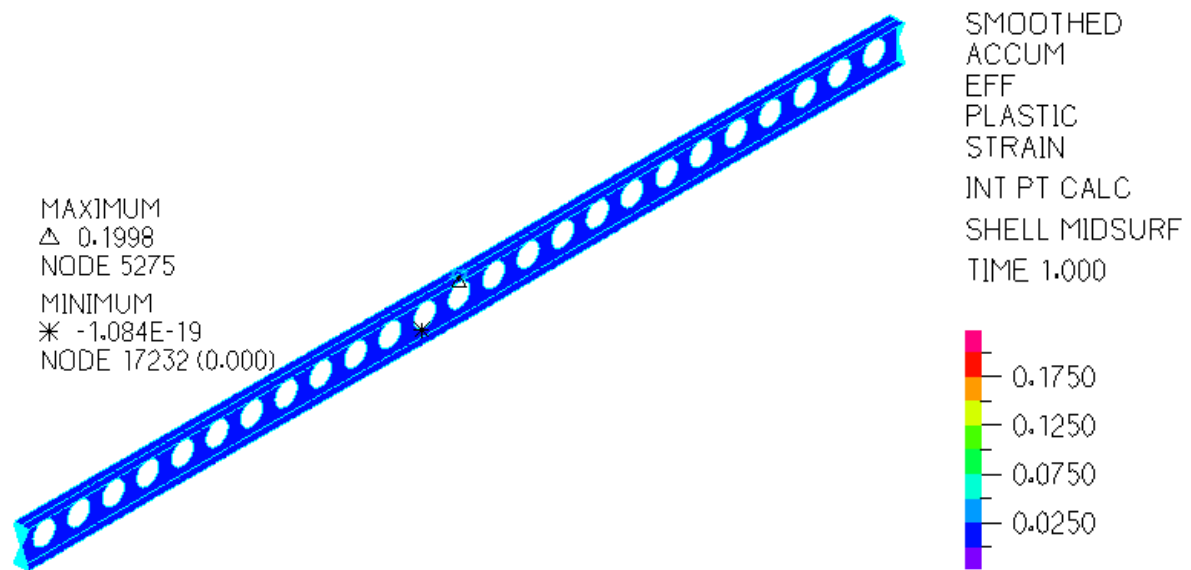
Σχήμα 6-14: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 326$ mmΣχήμα 6-15: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 341$ mm



Σχήμα 6-16: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 357.25$ mm

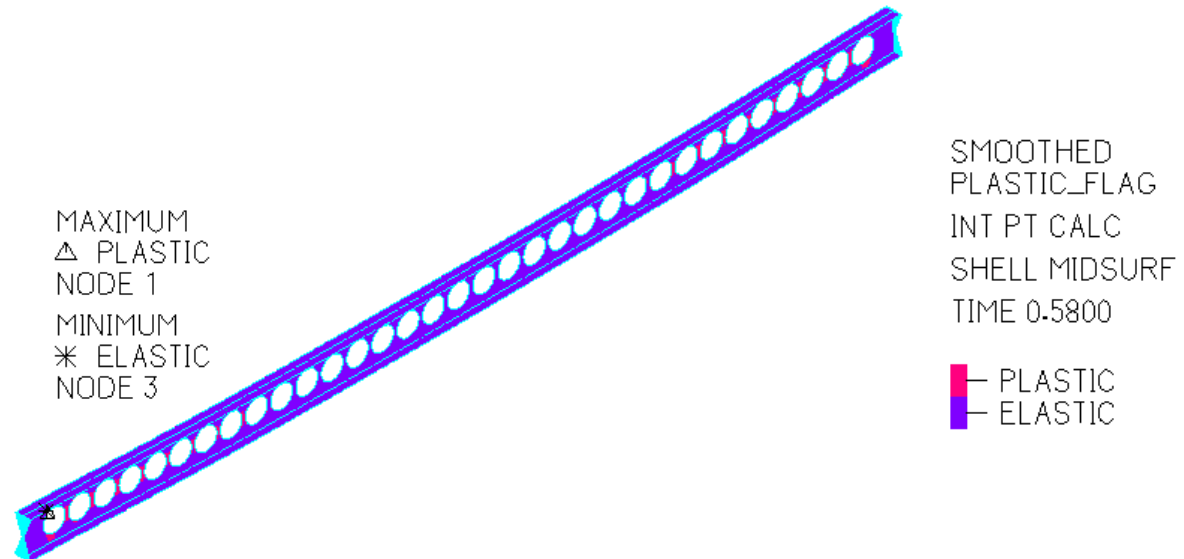


Σχήμα 6-17: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 375$ mm

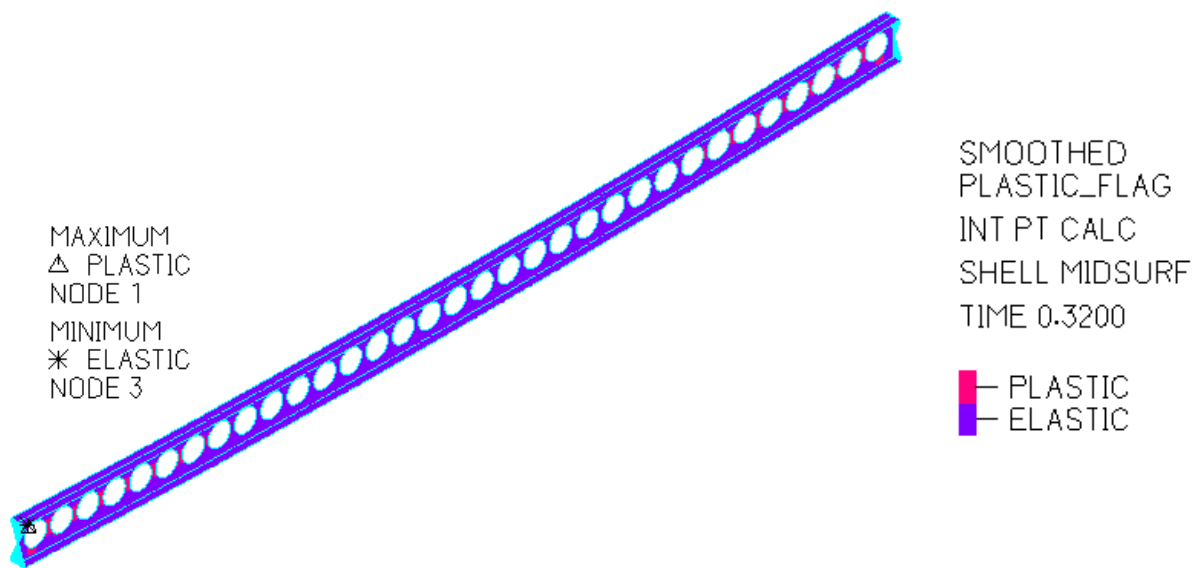


Σχήμα 6-18: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $s = 394.75$ mm

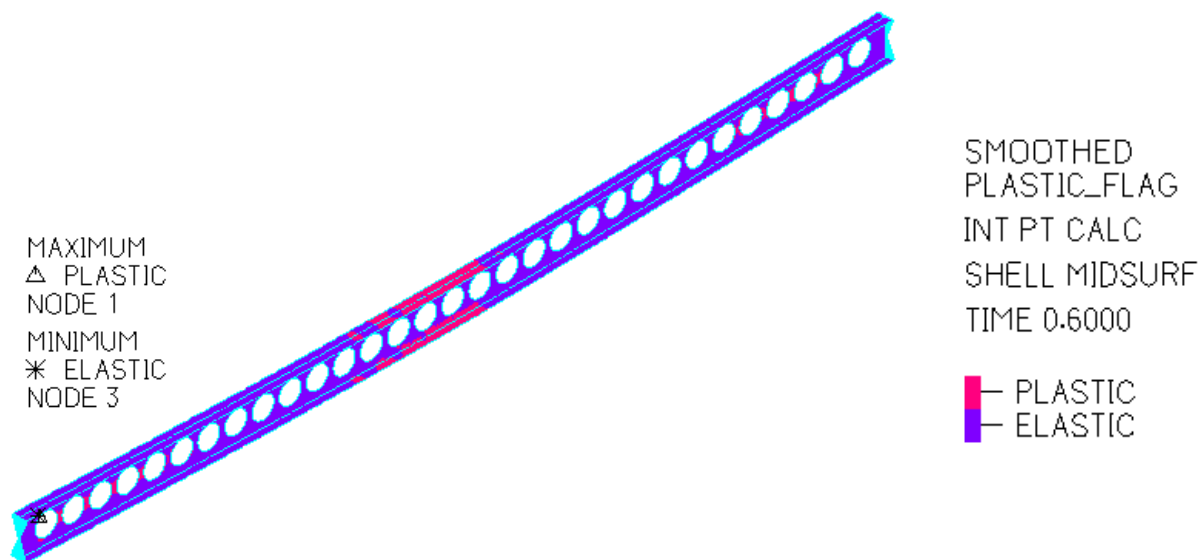
Στο Σχήμα 6-19 έως το Σχήμα 6-26 απεικονίζεται η περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Στις περιπτώσεις $s = 290$ mm και $s = 300$ mm η περιοχή πλαστικοποίησης εντοπίζεται αποκλειστικά στα άκρα της δοκού, όπου είχε παρατηρηθεί μέγιστη συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Με την αύξηση της απόστασης των κέντρων γειτονικών διακένων αυξάνεται το μήκος της περιοχής πλαστικοποίησης, η οποία εντοπίζεται στο μέσο της δοκού.



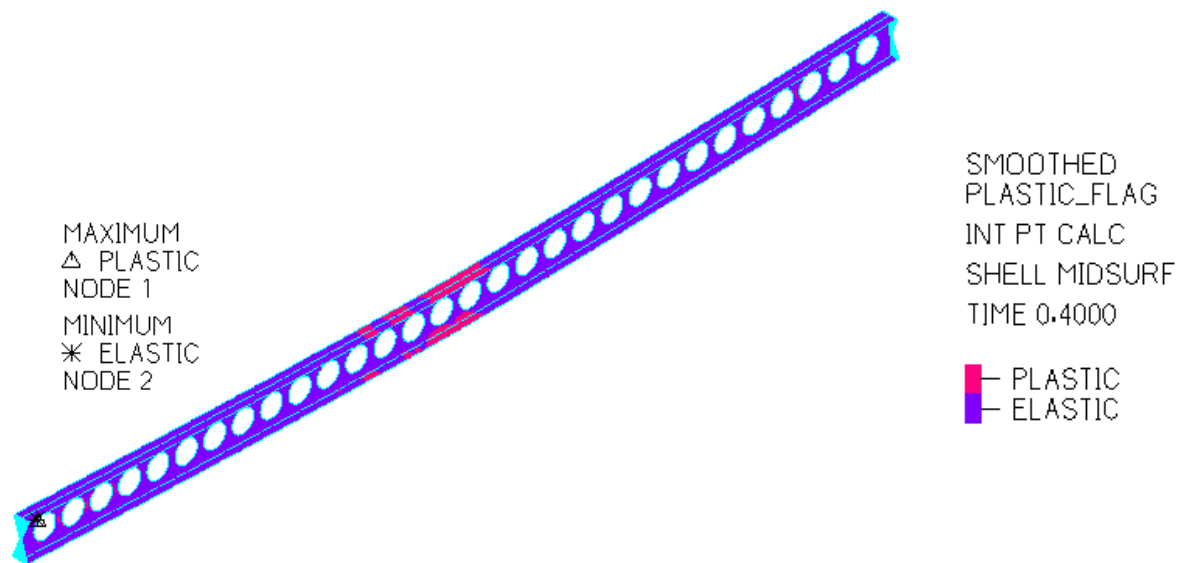
Σχήμα 6-19: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 290$ mm



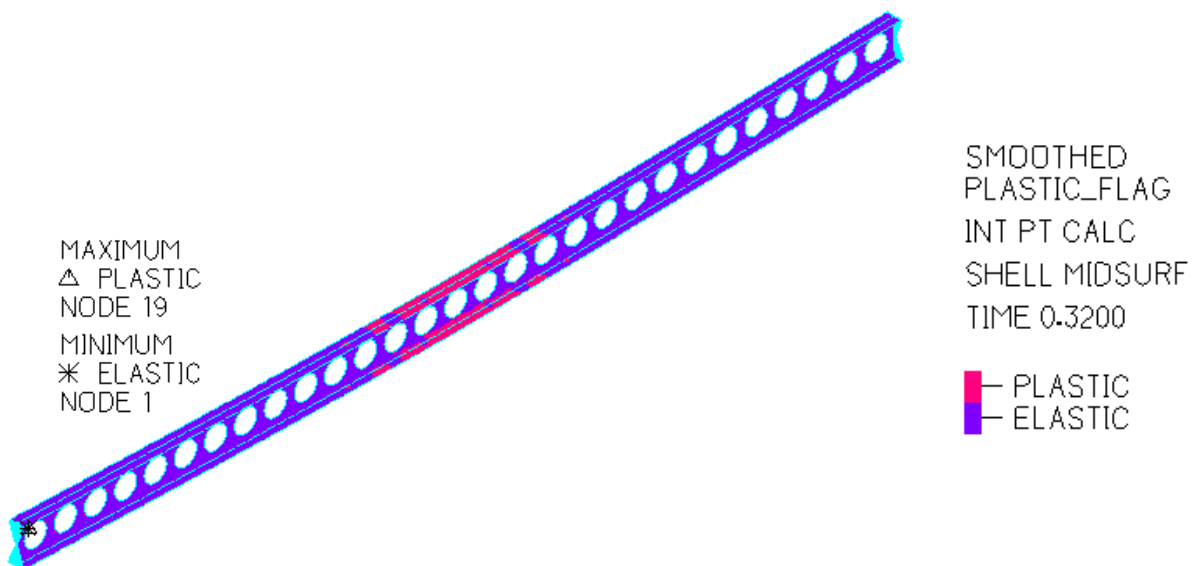
Σχήμα 6-20: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 300$ mm



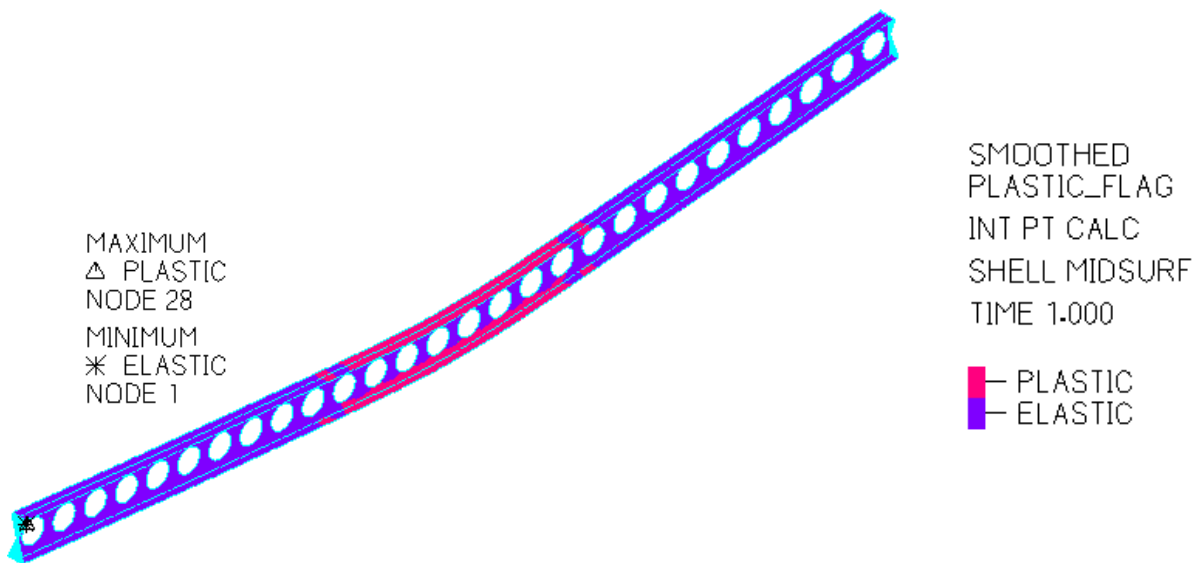
Σχήμα 6-21: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 312.50$ mm



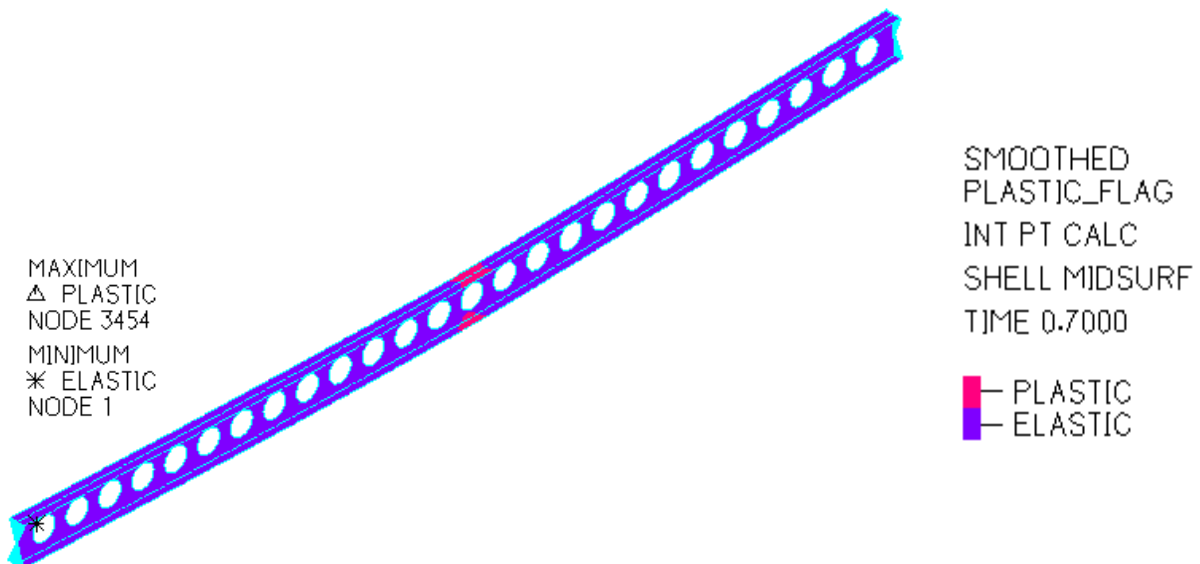
Σχήμα 6-22: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 326$ mm



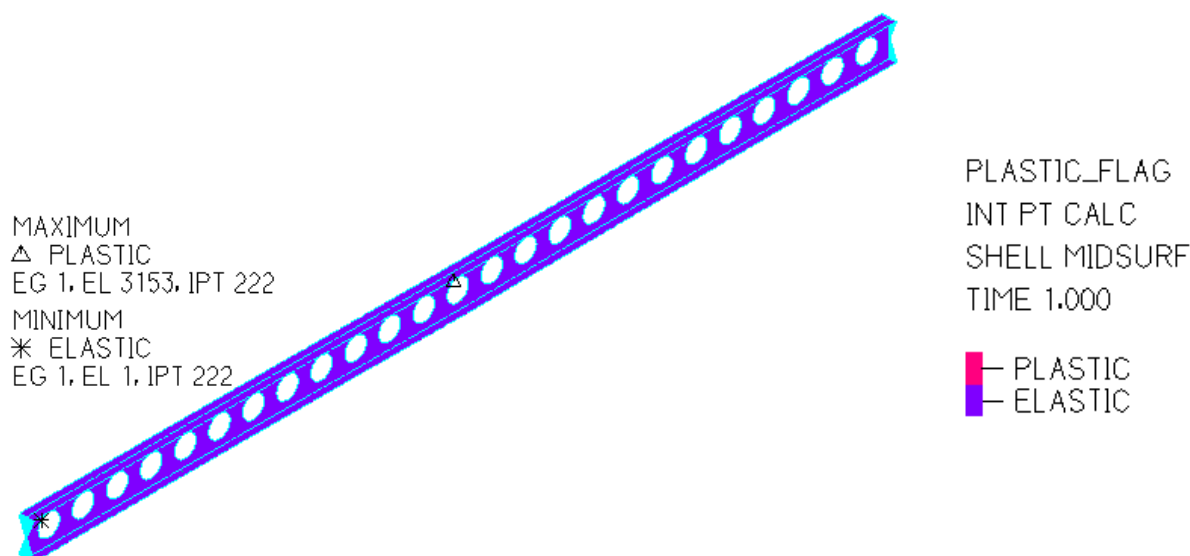
Σχήμα 6-23: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 341$ mm



Σχήμα 6-24: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 357.25$ mm



Σχήμα 6-25: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 375$ mm



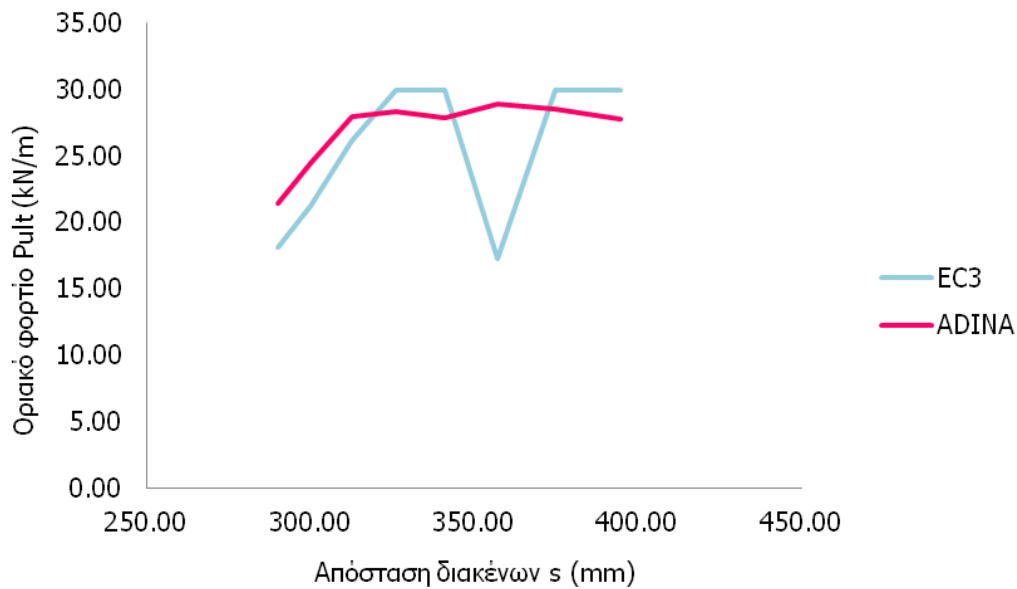
Σχήμα 6-26: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $s = 394.75$ mm

6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

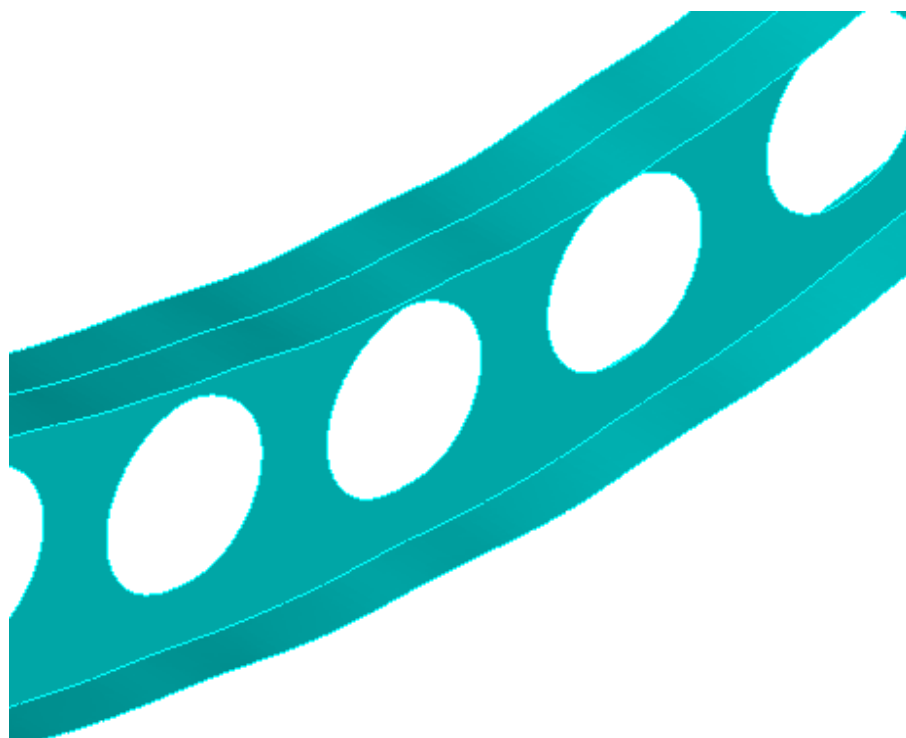
Ύστερα από τις αριθμητικές αναλύσεις έγινε έλεγχος της δοκού για κάθε περίπτωση απόστασης των κέντρων γειτονικών διακένων σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στον Πίνακα 6-2 παρουσιάζεται η Κατηγορία κατάταξης της διατομής και το οριακό φορτίο για όλες τις περιπτώσεις. Η δοκός κατατάσσεται ως Κατηγορία 2, δηλαδή η απόσταση s δεν επηρεάζει την κατάταξη της διατομής T σε κατηγορία, όπως φαίνεται από τη σχέση (3-1) έως τη σχέση (3-5) της Παραγράφου 3.5.1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το οριακό φορτίο των δοκών σύμφωνα με τις προσχέδιο ταυτίζεται οριακά με το αντίστοιχο οριακό φορτίο των αριθμητικών αναλύσεων (Σχήμα 6-27) σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από το μέγεθος απόστασης $s = 357.25$ mm. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τον σχεδιασμό της δοκού για $s = 357.25$ mm, η απόσταση του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού έχει πολύ μικρό μήκος ($s_e = 52.10$ mm), με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή των ακραίων συμπαγών τμημάτων του κορμού, να αστοχούν από διάτμηση και το οριακό φορτίο να ελαττώνεται. Στο Σχήμα 6-28 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη εικόνα στο μέσο της δοκού με $s = 357.25$ mm και παρατηρείται ότι η δοκός τελικά δεν αστοχεί από διάτμηση στα άκρα της αλλά από ελαστοπλαστικό λυγισμό των πελμάτων λόγω διαρροής από κάμψη. Συνεπώς, το μειωμένο μήκος του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού δεν διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αστοχία της δοκού. Αν ο έλεγχος αυτός αμεληθεί κατά τον υπολογισμό του οριακού φορτίου τότε για όλες τις περιπτώσεις αποστάσεως τα αποτελέσματα ταυτίζονται οριακά (Πίνακας 6-3 και Σχήμα 6-29). Σύμφωνα με τους κανονισμούς η δοκός για $s = 290$ mm, $s = 300$ mm και $s = 312.50$ mm αστοχεί διατμητικά στο δυσμενέστερο συμπαγές τμήμα του κορμού, αφού υπάρχει σημαντική απώλεια υλικού, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις η δοκός αστοχεί καμπτικά. Στο Σχήμα 6-30 παρουσιάζεται η διατμητική αστοχία στο δυσμενέστερο συμπαγές τμήμα της δοκού με $s = 290$ mm, $s = 300$ mm και $s = 312.50$ mm και στο Σχήμα 6-31 παρουσιάζεται η καμπτική αστοχία στο μέσο της δοκού για τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Τέλος, σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις συμπεραίνεται πως η μείωση της απόκρισης της δοκού παρατηρείται για $s \leq 0.75 \cdot h$, όπου h είναι το συνολικό ύψος της δοκού.

Πίνακας 6-2: Κατηγορία διατομής και οριακό φορτίο δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13

Απόσταση διακένων s (mm)	Κατηγορία διατομής	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
290	2	18.15
300	2	21.20
312.50	2	26.11
326	2	29.98
341	2	29.98
357.25	2	17.25
375	2	29.98
394.75	2	29.98



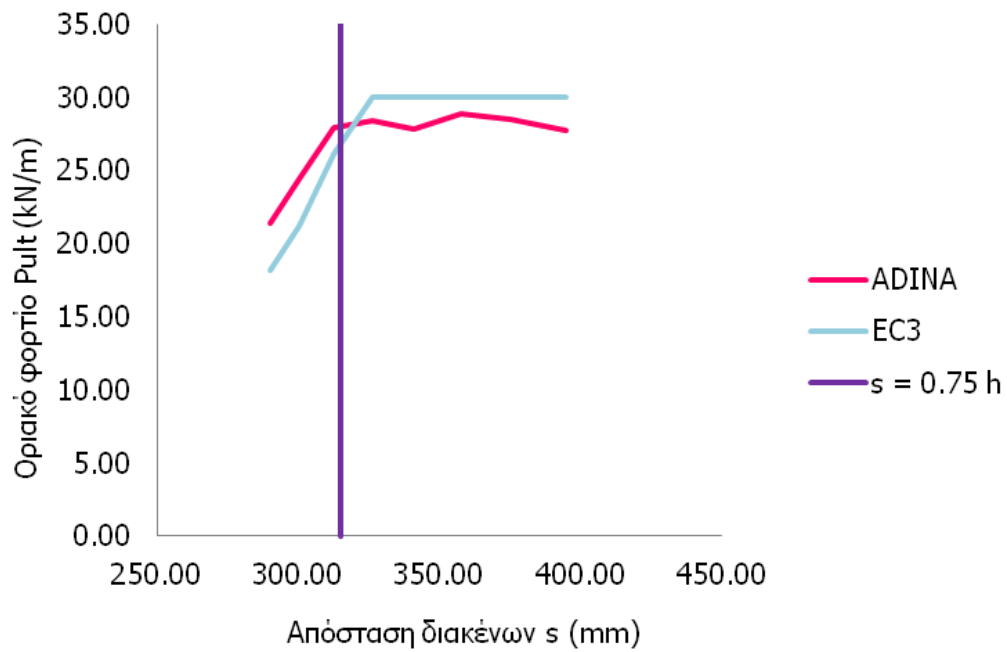
Σχήμα 6-27: Μεταβολή οριακού φορτίου συναρτήσει της αποστάσεως των κέντρων γειτονικών διακένων σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις και το προσχέδιο του EN1993-1-13



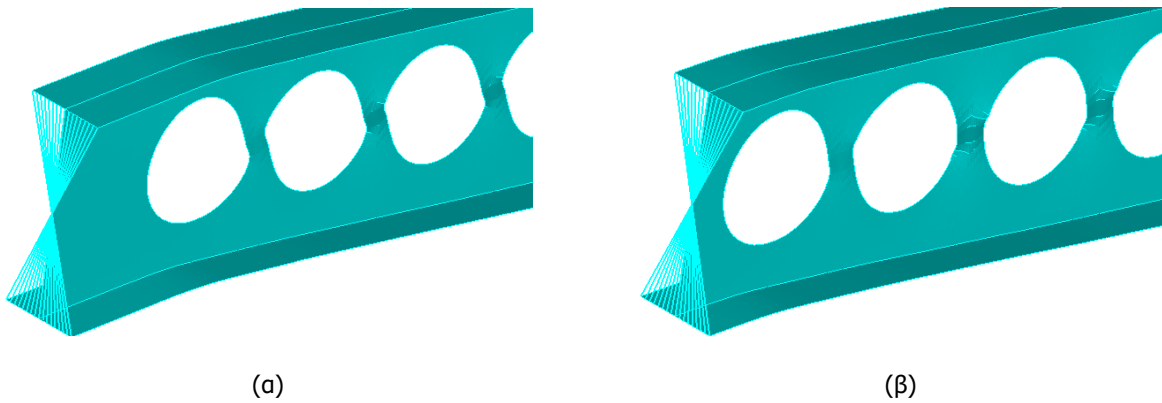
Σχήμα 6-28: Παραμορφωμένη εικόνα στο μέσο της δοκού για $s = 357.25$ mm

Πίνακας 6-3: Κατηγορία διατομής και οριακό φορτίο δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 αγνοώντας την αστοχία από διάτμηση του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού

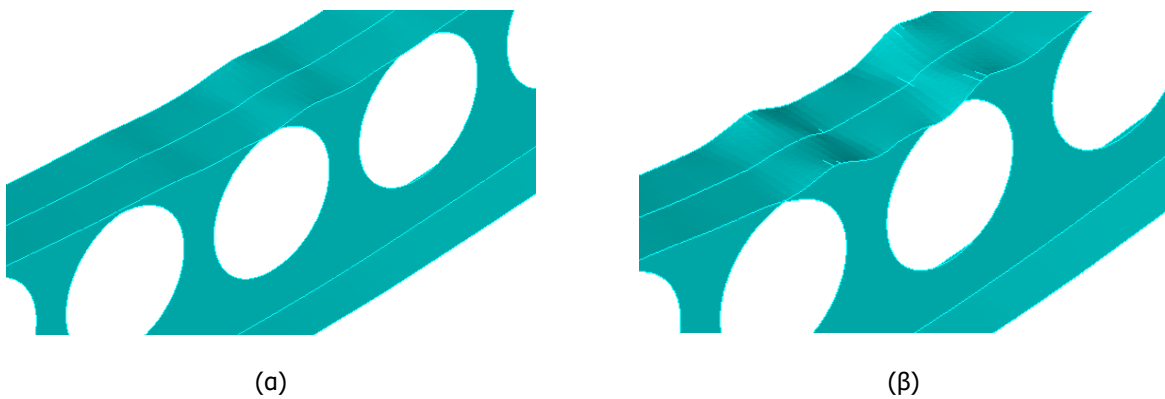
Απόσταση διακένων s (mm)	Κατηγορία διατομής	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
290	2	18.15
300	2	21.20
312.50	2	26.11
326	2	29.98
341	2	29.98
357.25	2	29.98
375	2	29.98
394.75	2	29.98

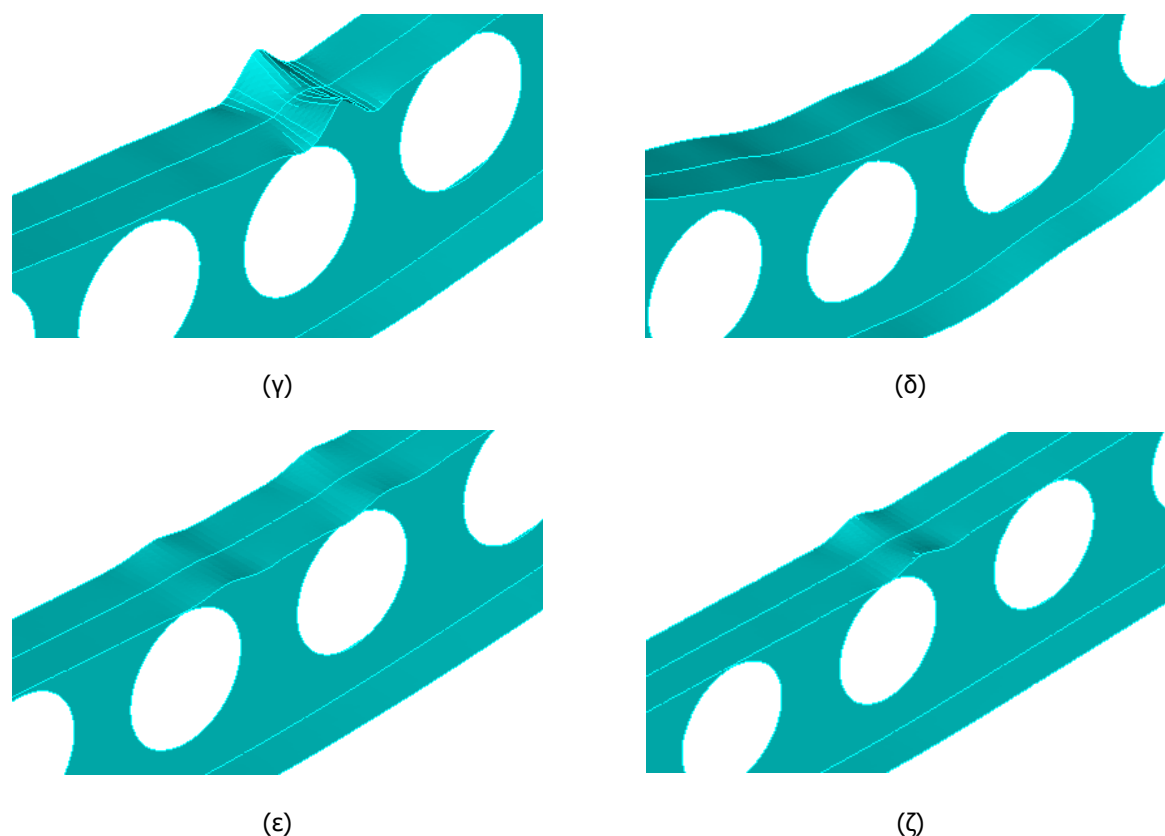


Σχήμα 6-29: Μεταβολή οριακού φορτίου συναρτήσει της αποστάσεως των κέντρων γειτονικών διακένων σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις και το προσχέδιο του EN1993-1-13, αγνοώντας την αστοχία από διάτμηση του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού



Σχήμα 6-30: Διατμητική αστοχία της δοκού για (α) $s = 290$ mm και (β) $s = 300$ mm





Σχήμα 6-31: Καμπτική αστοχία στο μέσο της δοκού για (α) $s = 312.50$ mm, (β) $s = 326$ mm, (γ) $s = 341$ mm, (δ) $s = 357.25$ mm, (ε) $s = 375$ mm και (ζ) $s = 394.75$ mm

6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ

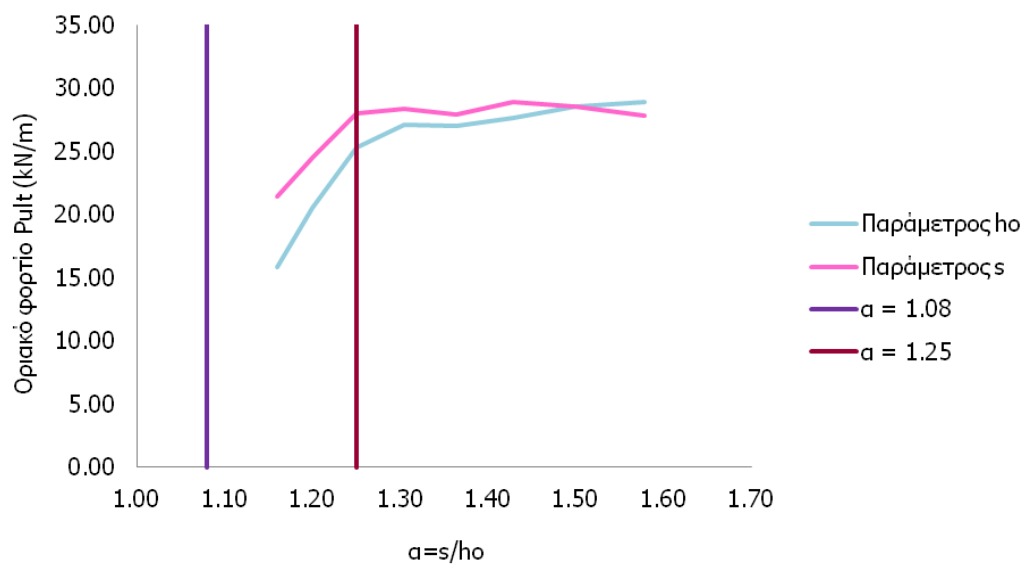
Ύστερα από διερεύνηση της επιρροής της διαμέτρου (h_0) και της αποστάσεως μεταξύ των κέντρων γειτονικών διακένων (s) στην απόκριση της δοκού συμπεραίνεται πως η διάμετρος του διάκενου διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στην απόκριση μίας δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού. Στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν διατηρήθηκε σταθερός ο λόγος α , ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Στον Πίνακα 6-4 παρουσιάζεται η τιμή του οριακού φορτίου της δοκού για κάθε περίπτωση του λόγου α ανάλογα με την παράμετρο της αριθμητικής ανάλυσης. Στο Σχήμα 6-32 απεικονίζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου ανάλογα με την παράμετρο της ανάλυσης και παρατηρείται πως η διάμετρος αποτελεί κρίσιμότερη παράμετρο στην απόκριση της δοκού, αφού η αύξησή της οδηγεί σε σημαντική μείωση της αντοχής και σε αύξηση αριθμού Κατηγορίας διατομής. Σύμφωνα με το Παράρτημα Α του προσχεδίου του EN1993-1-13 πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$1.08 \leq \alpha \leq 1.50 \quad (6-1)$$

Από τις παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν συμπεραίνεται πως η απόκριση της δοκού μειώνεται σημαντικά για $\alpha \leq 1.25$.

Πίνακας 6-4: Οριακό φορτίο δοκού ανάλογα με την παράμετρο της αριθμητικής ανάλυσης

$\alpha = \frac{s}{h_o}$	Παράμετρος h_o (mm) ($s = 375$ mm)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)	Παράμετρος s (mm) ($h_o = 250$ mm)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
1.16	325	15.84	290	21.44
1.20	312.50	20.48	300	24.47
1.25	300	25.26	312.50	27.96
1.30	287.50	27.10	326	28.37
1.36	275	27.05	341	27.87
1.43	262.50	27.61	357.25	28.92
1.50	250	28.52	375	28.52
1.58	237.50	28.89	394.75	27.78



Σχήμα 6-32: Μεταβολή οριακού φορτίου ανάλογα με την παράμετρο της αριθμητικής ανάλυσης

7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΚΟΡΜΟΥ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

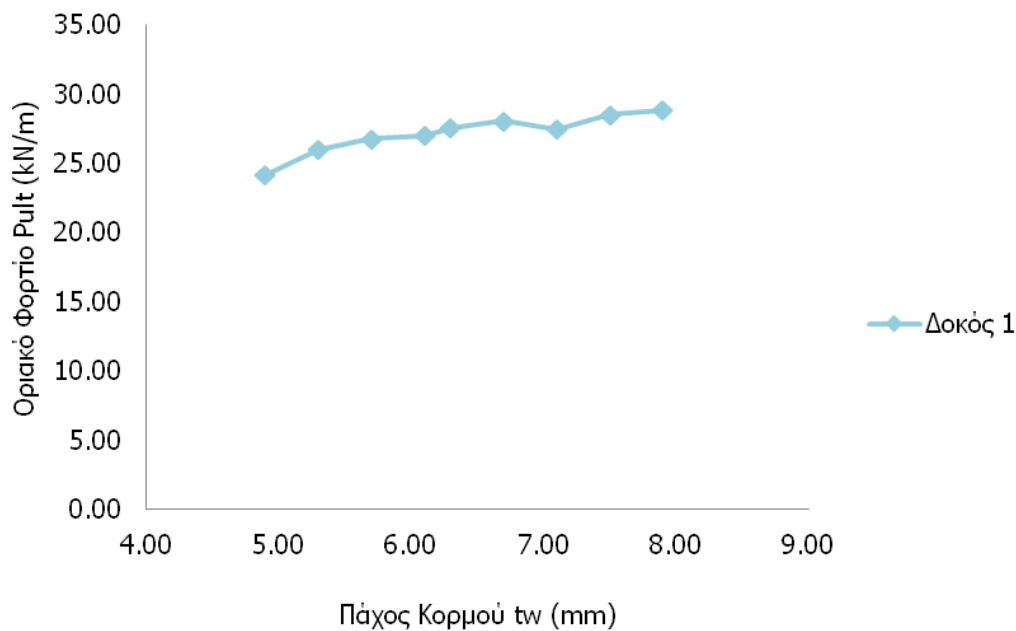
Η επιρροή του πάχους του κορμού (t_w) στην απόκριση της δοκού μελετάται για 9 χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Η επιλογή του πάχους t_w έγινε με σκοπό η διατομή να κατατάσσεται σε Κατηγορία 2 και 3 σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13. Τα μεγέθη του πάχους που επιλέχθηκαν κυμαίνονται από $t_w = 4.90$ mm έως $t_w = 7.90$ mm.

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΡΜΟΥ

Αρχικά, στον Πίνακα 7-1 παρουσιάζεται η τιμή του οριακού φορτίου (P_{cr}) της δοκού για κάθε περίπτωση πάχους κορμού. Στο Σχήμα 7-1 απεικονίζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει του πάχους του κορμού. Το πάχος του κορμού καθορίζει τη λυγηρότητά του και συνεπώς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τοπική ευστάθεια της δοκού. Το οριακό φορτίο ελαττώνεται σταδιακά με τη μείωση του πάχους, λόγω της αύξησης της λυγηρότητας του κορμού και επομένως η κλίση του διαγράμματος είναι ομαλή.

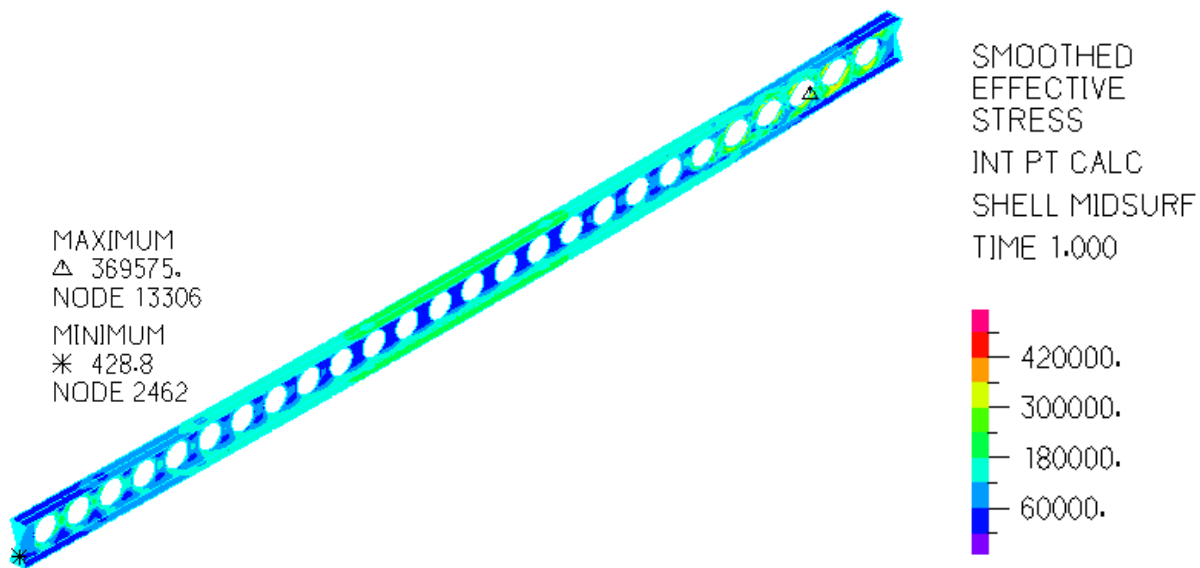
Πίνακας 7-1: Οριακό φορτίο δοκού για κάθε χαρακτηριστική περίπτωση πάχους κορμού

Πάχος κορμού t_w (mm)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
4.90	24.14
5.30	25.99
5.70	26.79
6.10	26.99
6.30	27.56
6.70	28.08
7.10	27.48
7.50	28.52
7.90	28.86

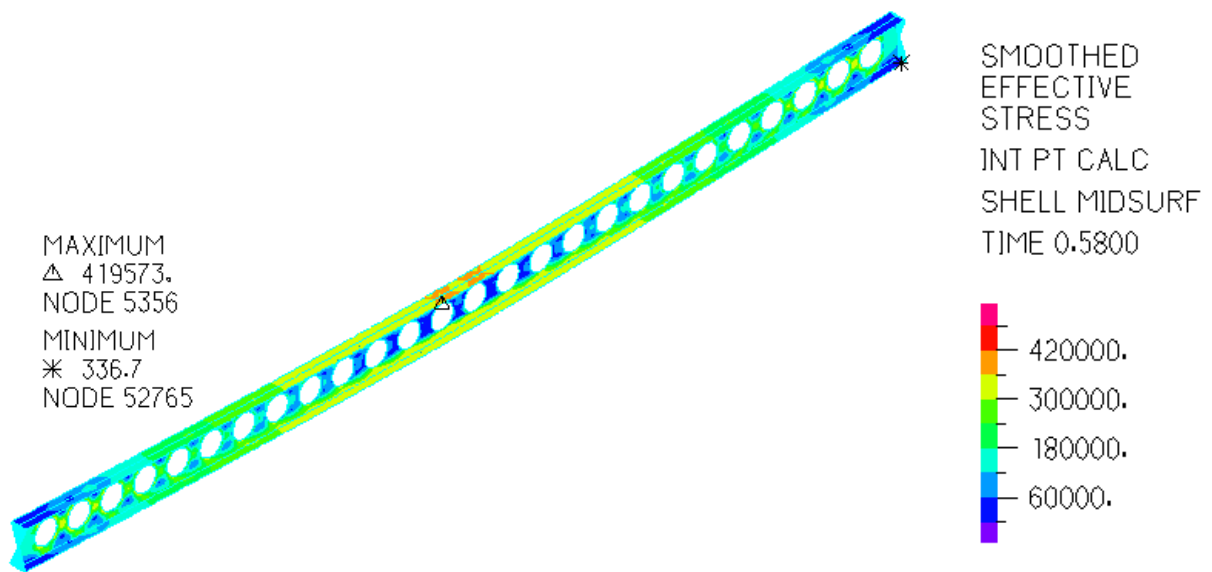
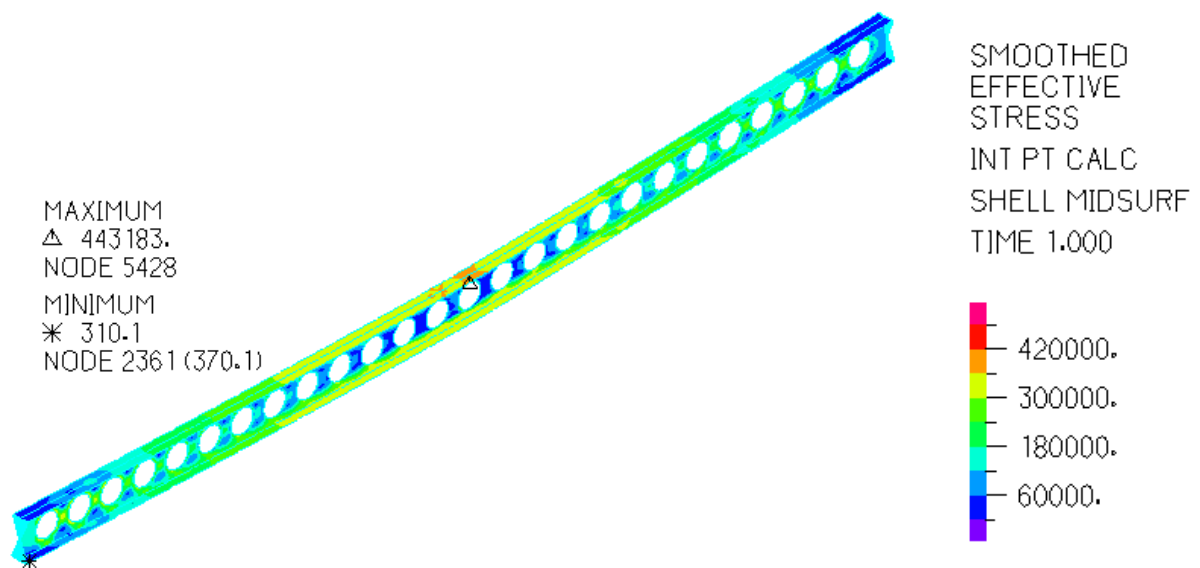


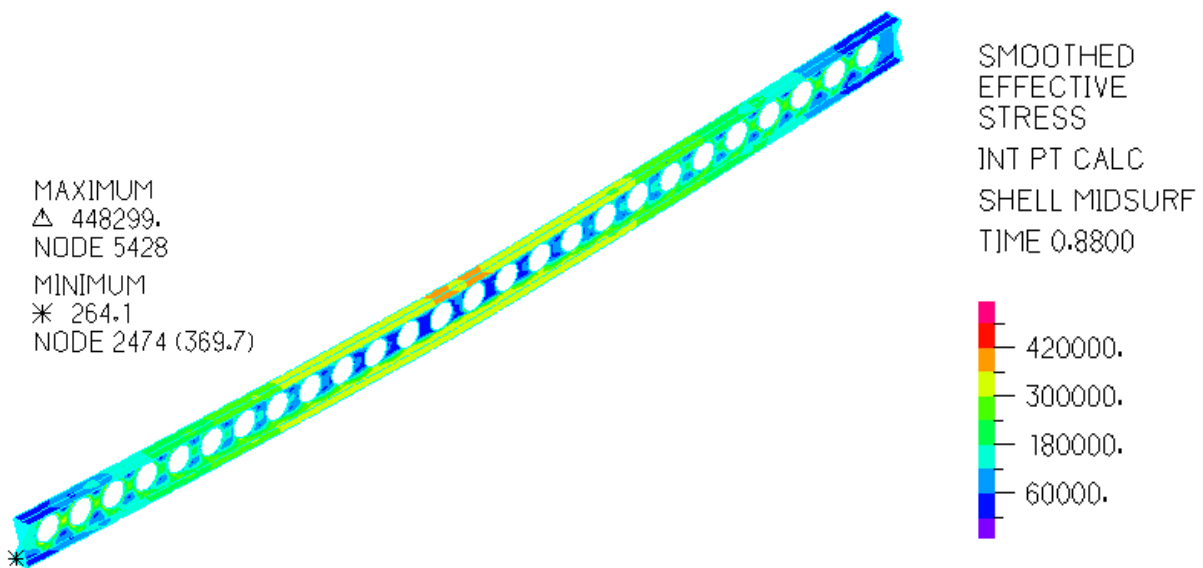
Σχήμα 7-1: Μεταβολή οριακού φορτίου δοκού συναρτήσει του πάχους του κορμού

Στο Σχήμα 7-2 έως το Σχήμα 7-10 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Η μέγιστη τιμή της τάσης υπερβαίνει το όριο διαρροής της δοκού ($f_y = 355$ MPa) σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η υπέρβαση αυτή οφείλεται στην κράτυνση του χάλυβα που λαμβάνεται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις. Η τιμή της τάσεως von Mises μεγιστοποιείται στο άκρο της δοκού και ελαττώνεται προοδευτικά μέχρι το μέσο της για πάχος κορμού $t_w = 4.90$ mm και η μέγιστη τιμή της δεν υπερβαίνει σημαντικά το όριο διαρροής, καθώς λόγω της μεγάλης λυγηρότητας του κορμού η δοκός αστοχεί γρήγορα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις παρατηρείται μεγιστοποίηση της τάσης von Mises στο μέσο της δοκού και σταδιακή ελάττωσή του μέχρι τα άκρα της.

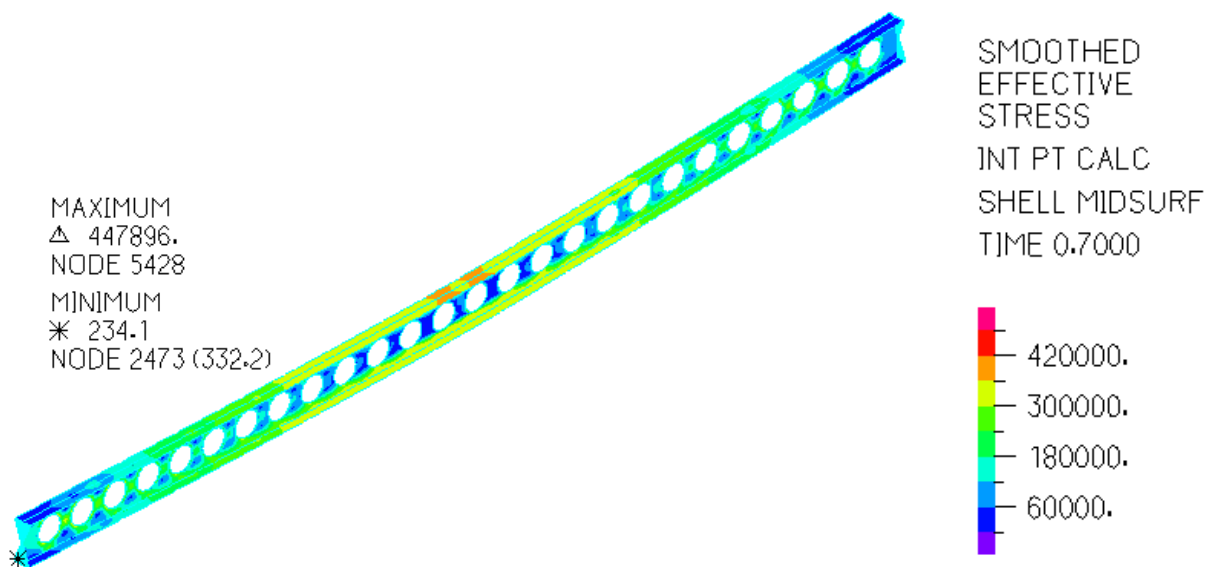


Σχήμα 7-2: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 4.90$ mm

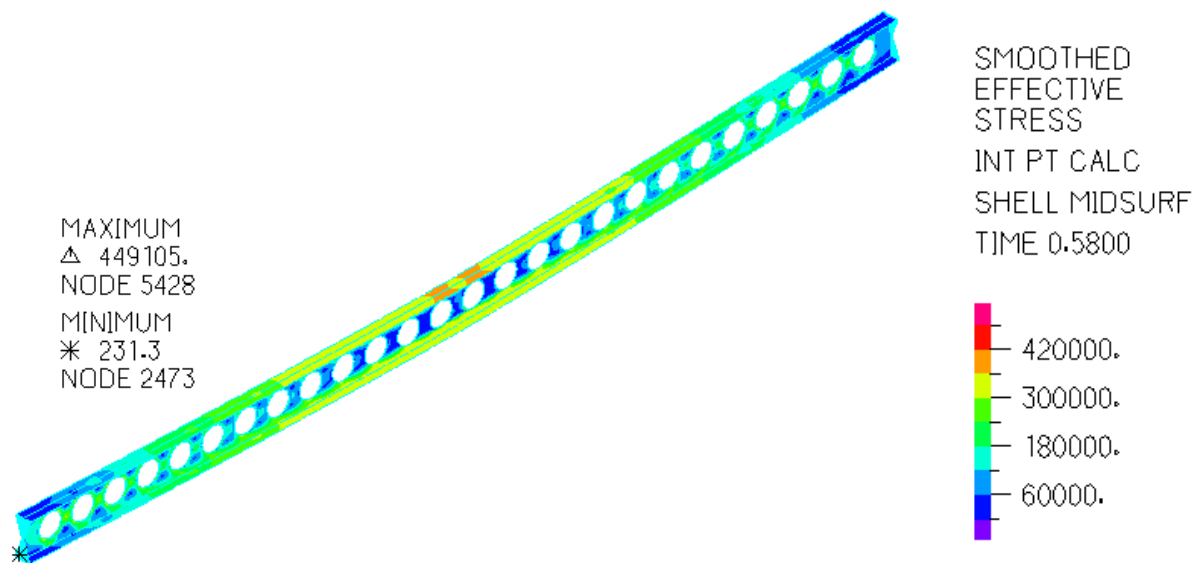
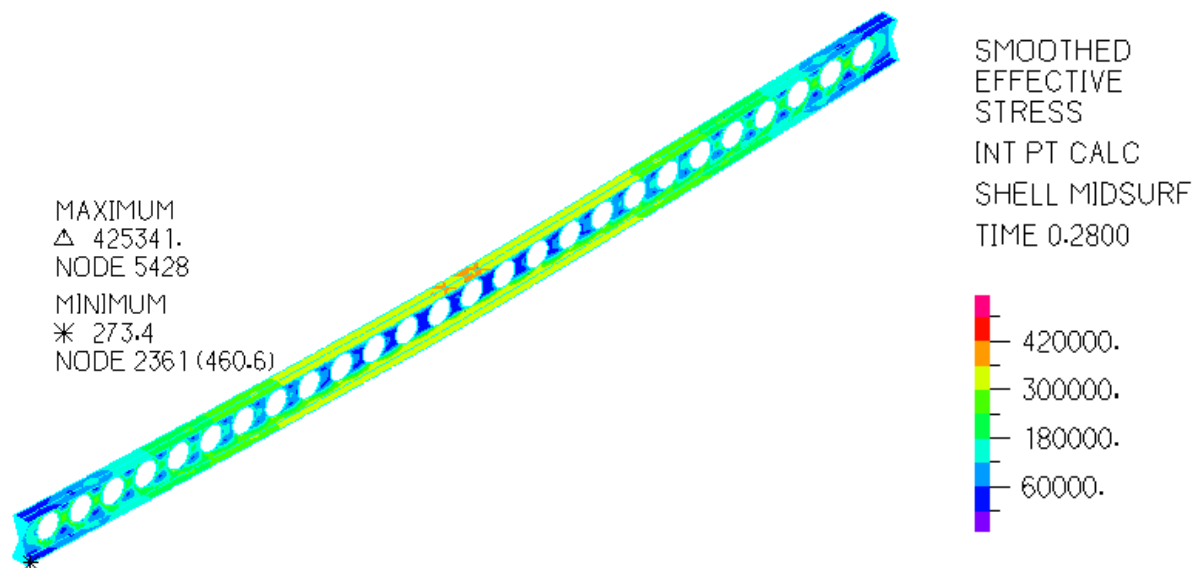
Σχήμα 7-3: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 5.30$ mmΣχήμα 7-4: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 5.70$ mm

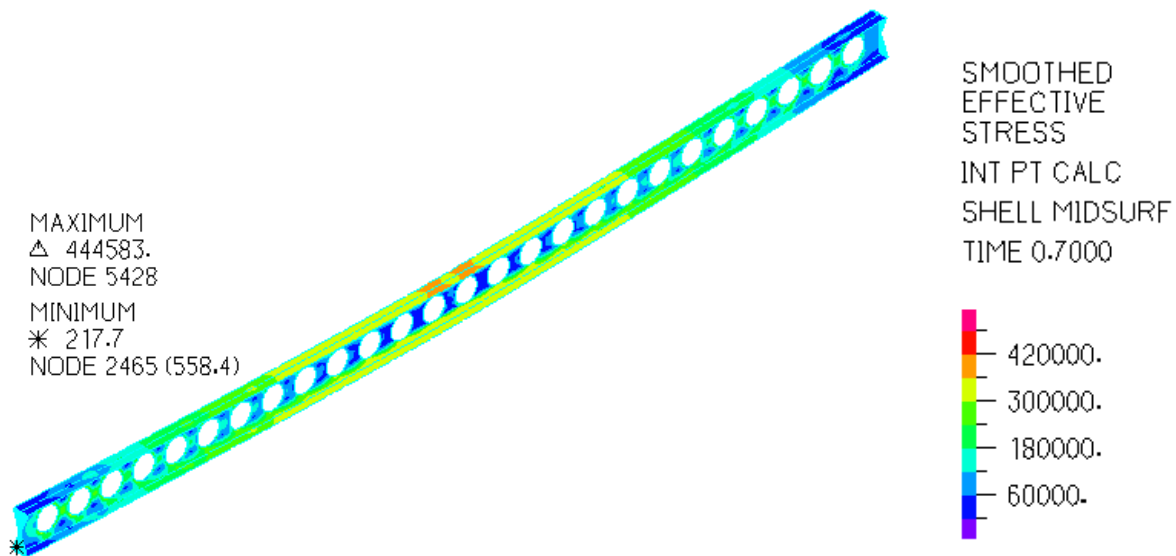


Σχήμα 7-5: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 6.10$ mm

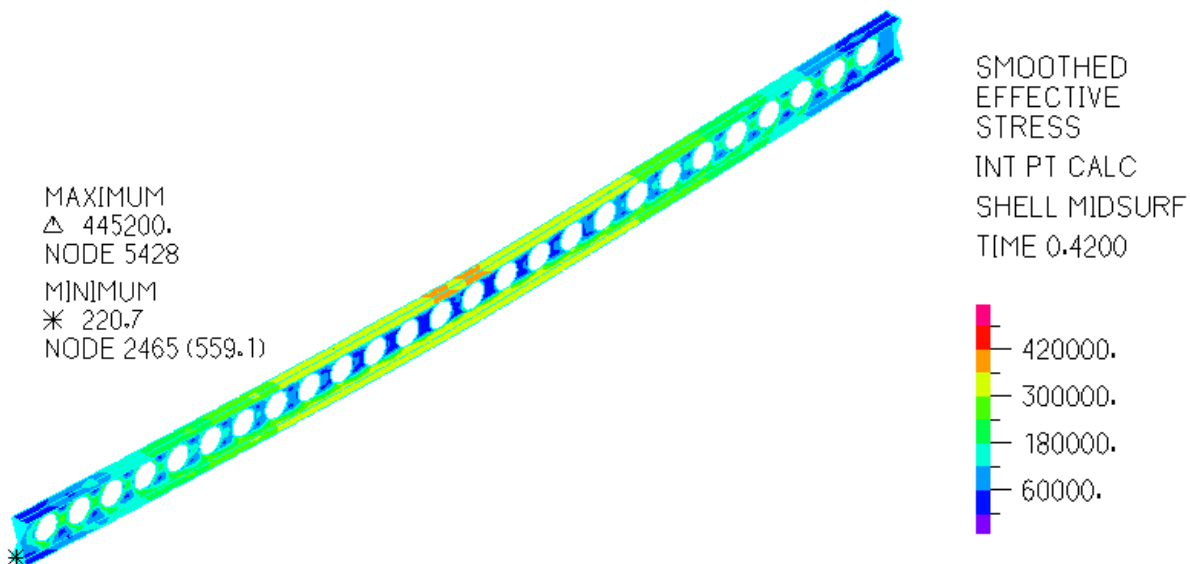


Σχήμα 7-6: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 6.30$ mm

Σχήμα 7-7: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 6.70$ mmΣχήμα 7-8: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 7.10$ mm

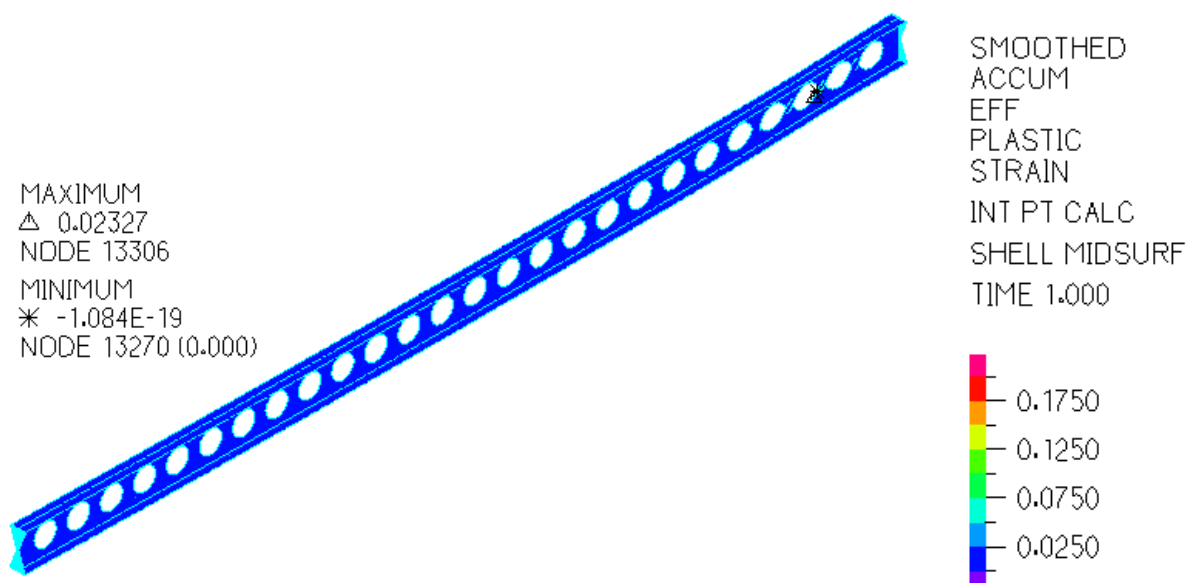
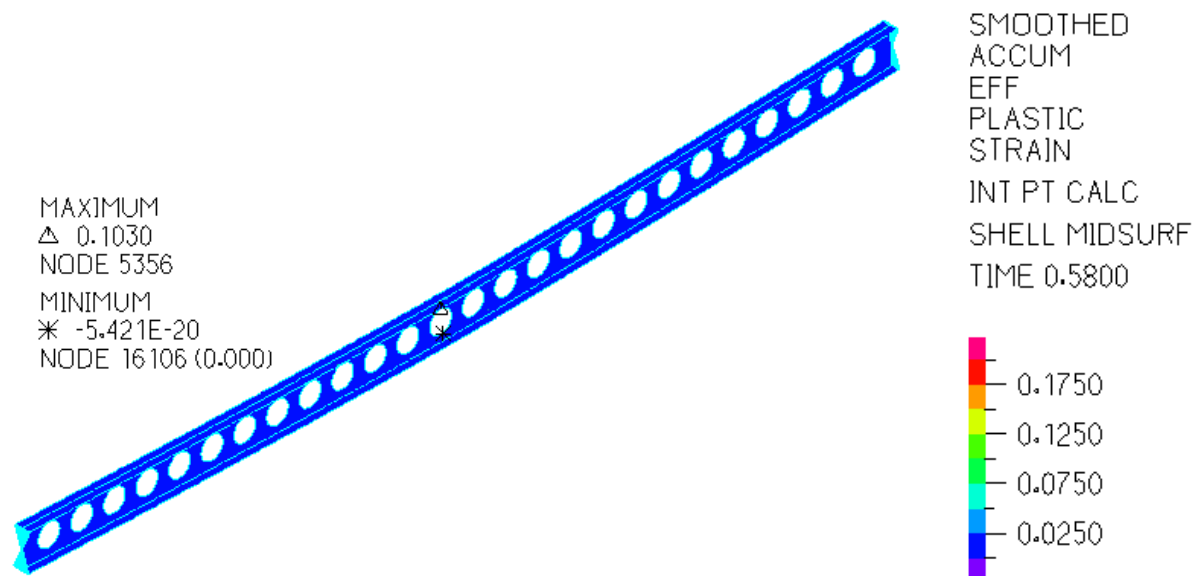


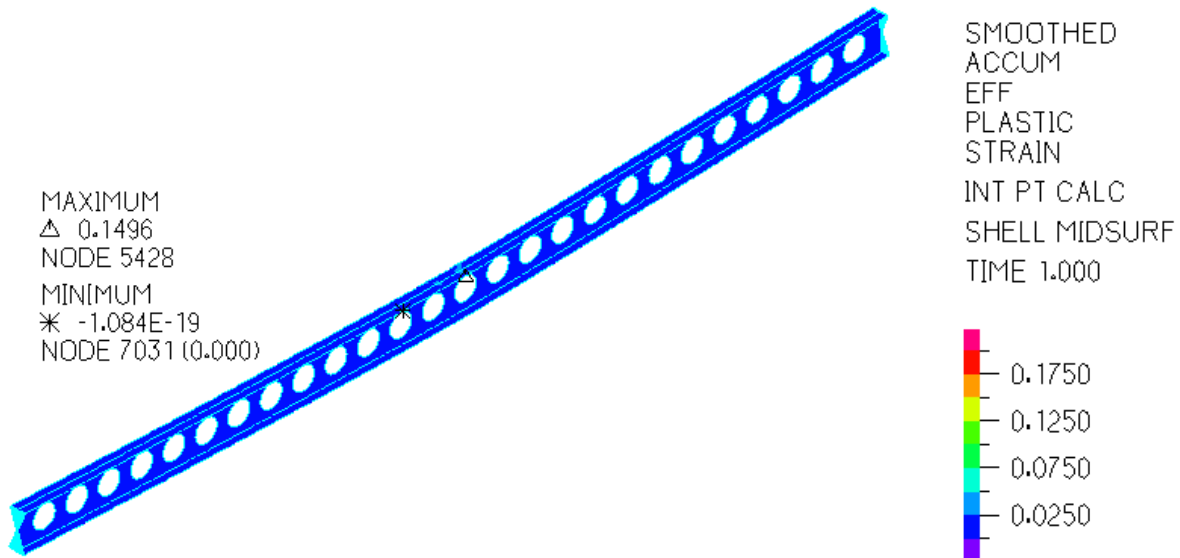
Σχήμα 7-9: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 7.50$ mm



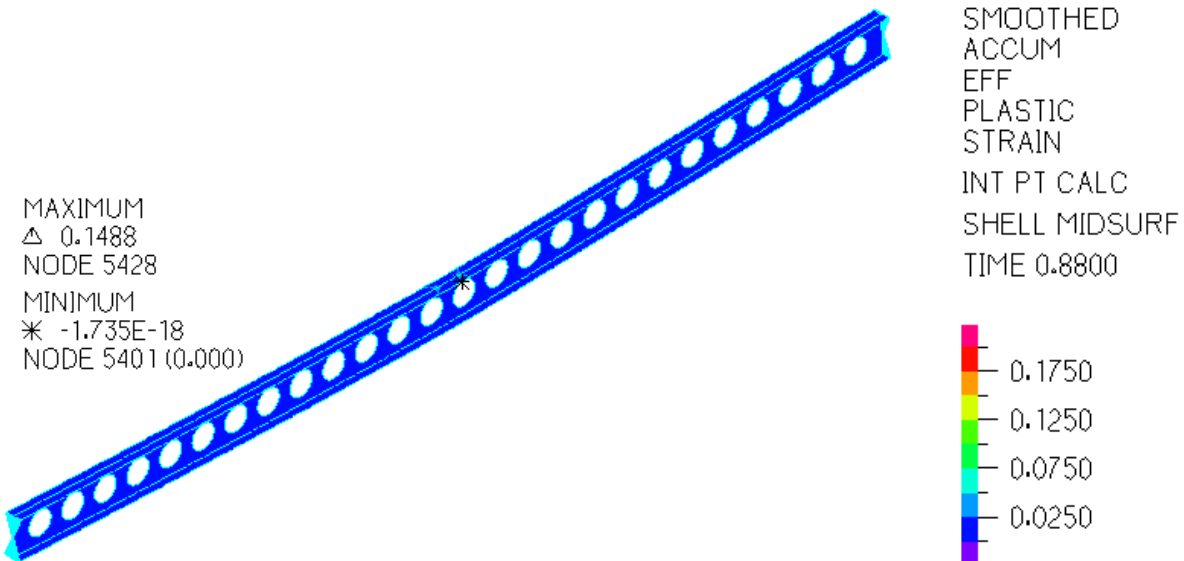
Σχήμα 7-10: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για $t_w = 7.90$ mm

Στο Σχήμα 7-11 έως το Σχήμα 7-19 παρουσιάζεται η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Η μέγιστη παραμόρφωση της δοκού για πάχος κορμού $t_w = 4.90$ mm εντοπίζεται στο άκρο της και δεν εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή τιμή, καθώς η αυξημένη λυγρότητα του κορμού οδηγεί γρήγορα σε αστοχία από διατμητικό λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η μέγιστη τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης εντοπίζεται στο κέντρο της δοκού και η υψηλότερη τιμή παραμόρφωσης που παρατηρείται ισούται με $\epsilon = 15.01\%$ για $t_w = 6.70$ mm.

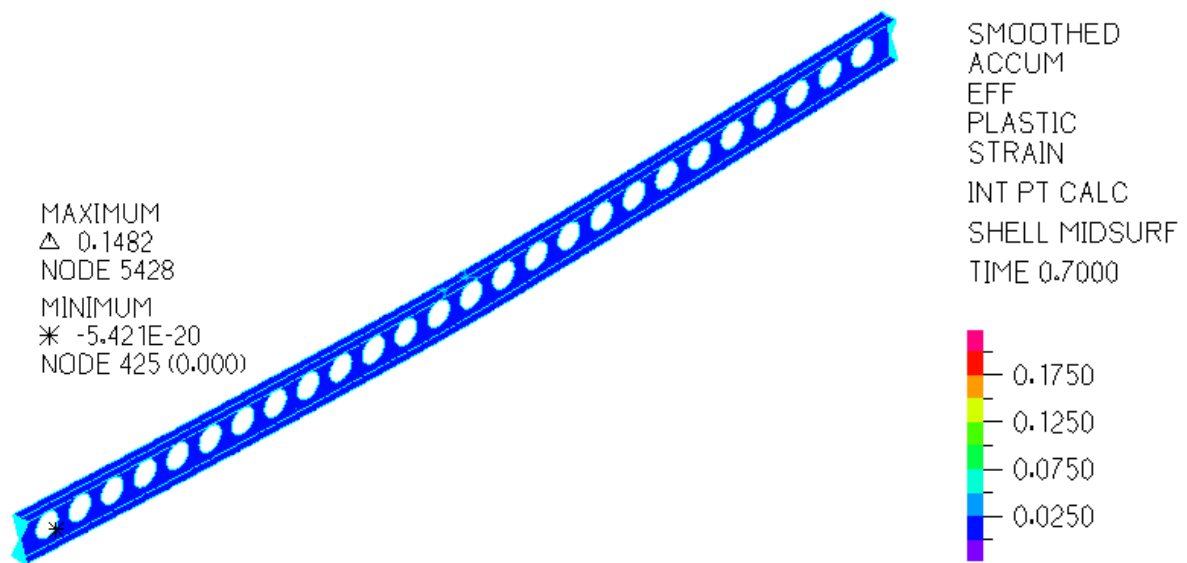
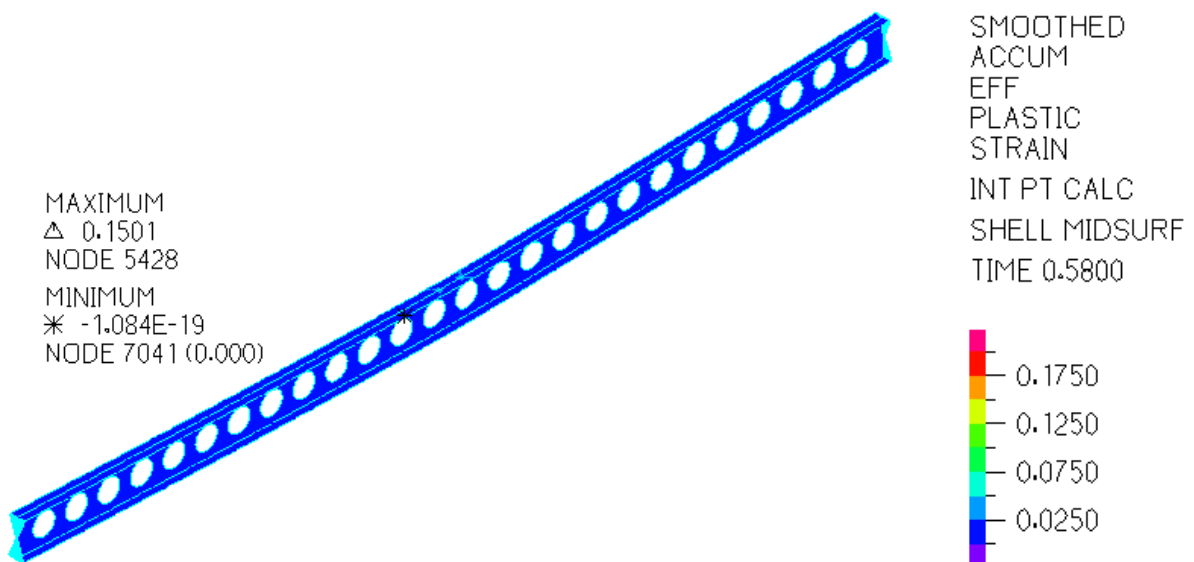
Σχήμα 7-11: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 4.90$ mmΣχήμα 7-12: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 5.30$ mm

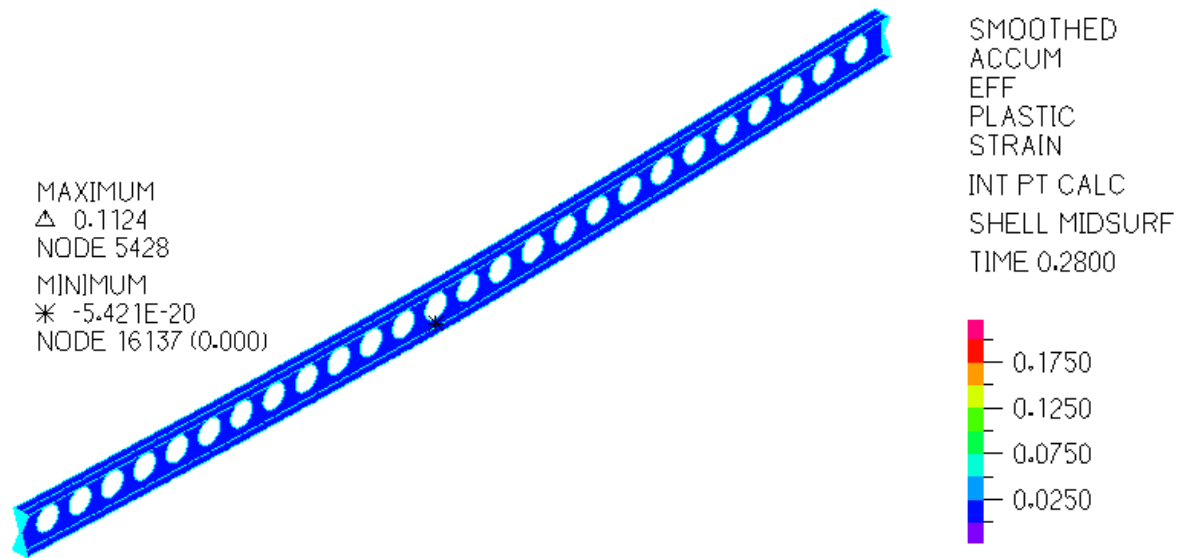


Σχήμα 7-13: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 5.70$ mm

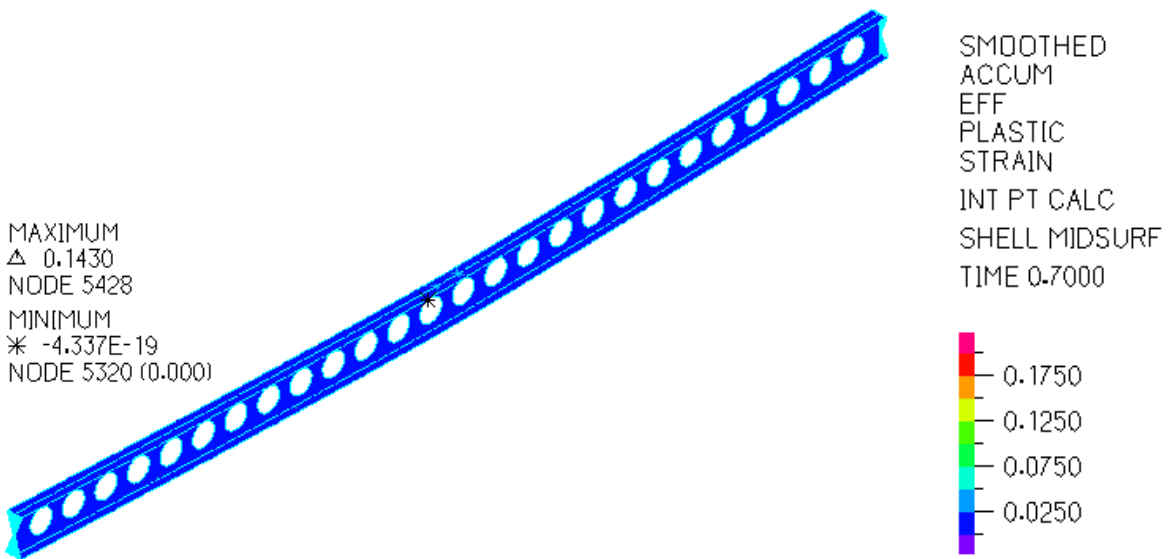


Σχήμα 7-14: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 6.10$ mm

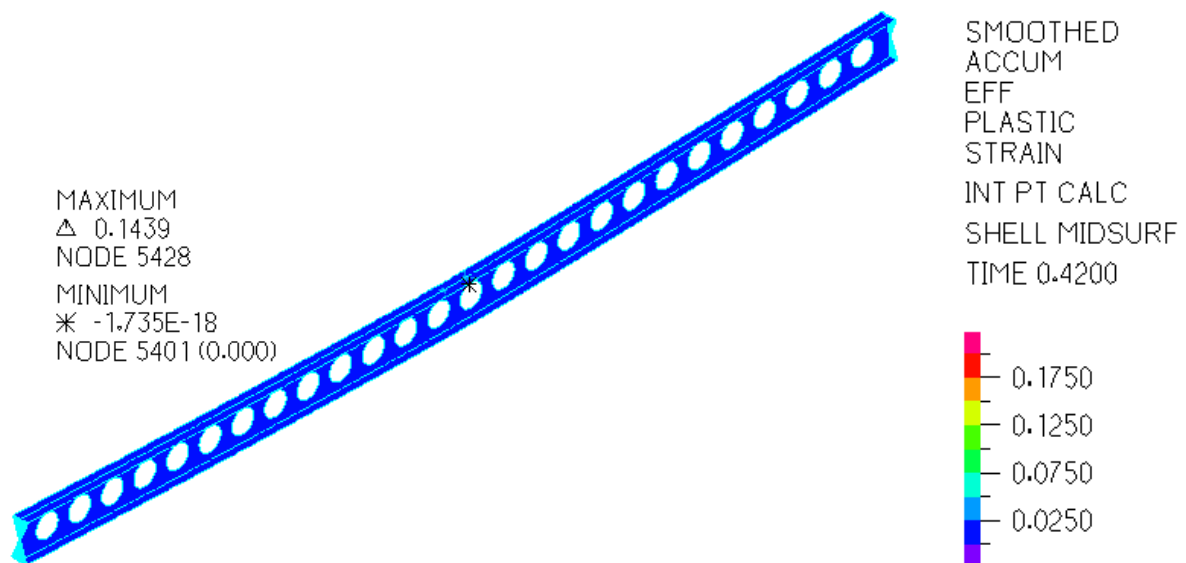
Σχήμα 7-15: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 6.30$ mmΣχήμα 7-16: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 6.70$ mm



Σχήμα 7-17: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 7.10$ mm

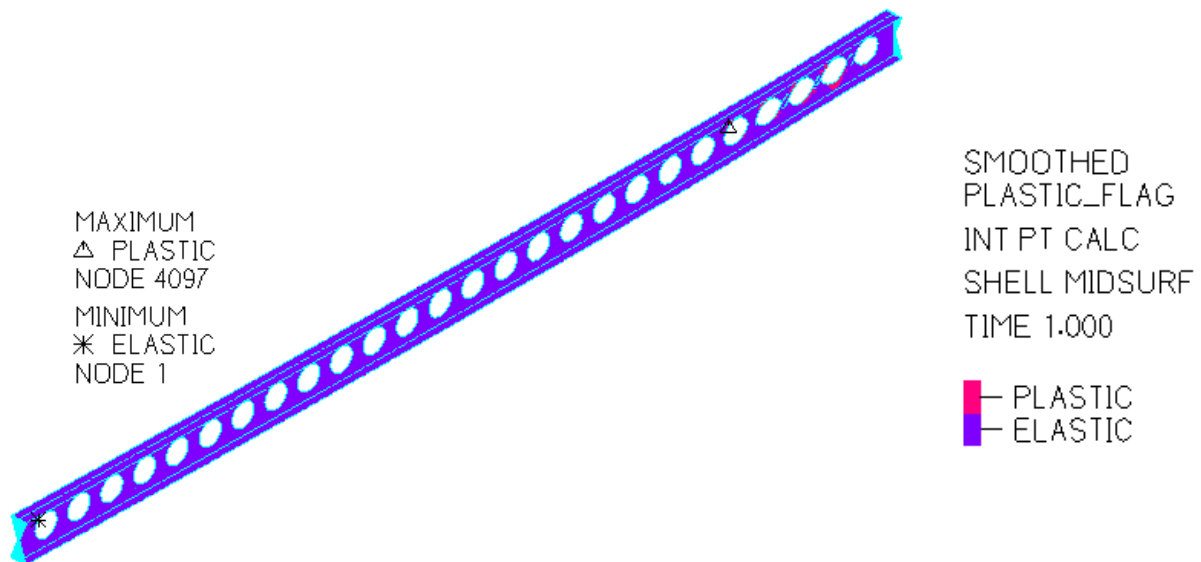


Σχήμα 7-18: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 7.50$ mm

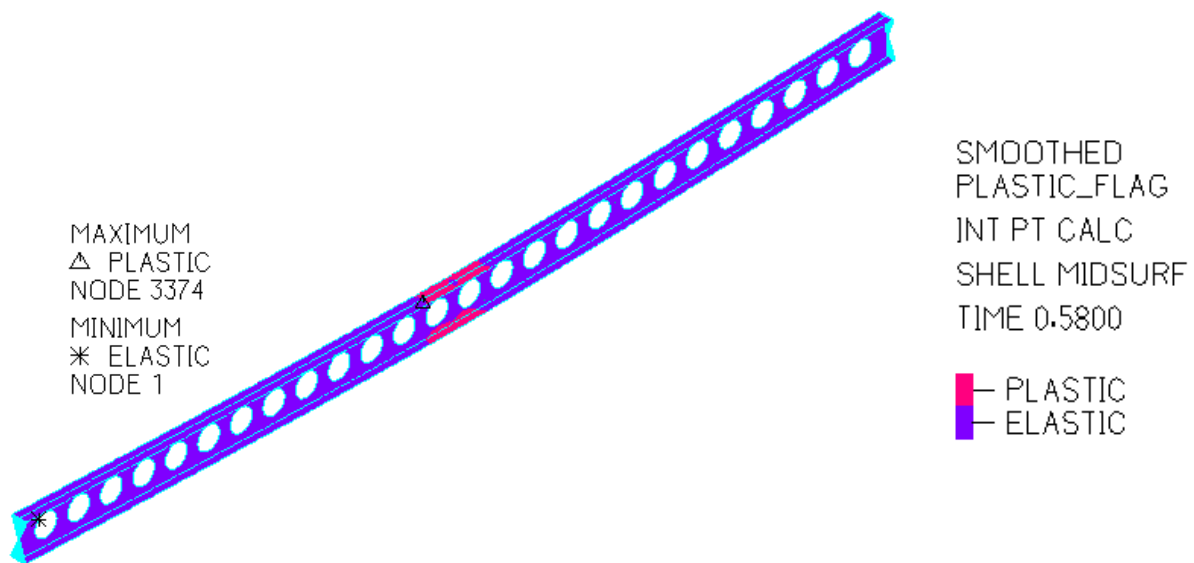


Σχήμα 7-19: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για $t_w = 7.90$ mm

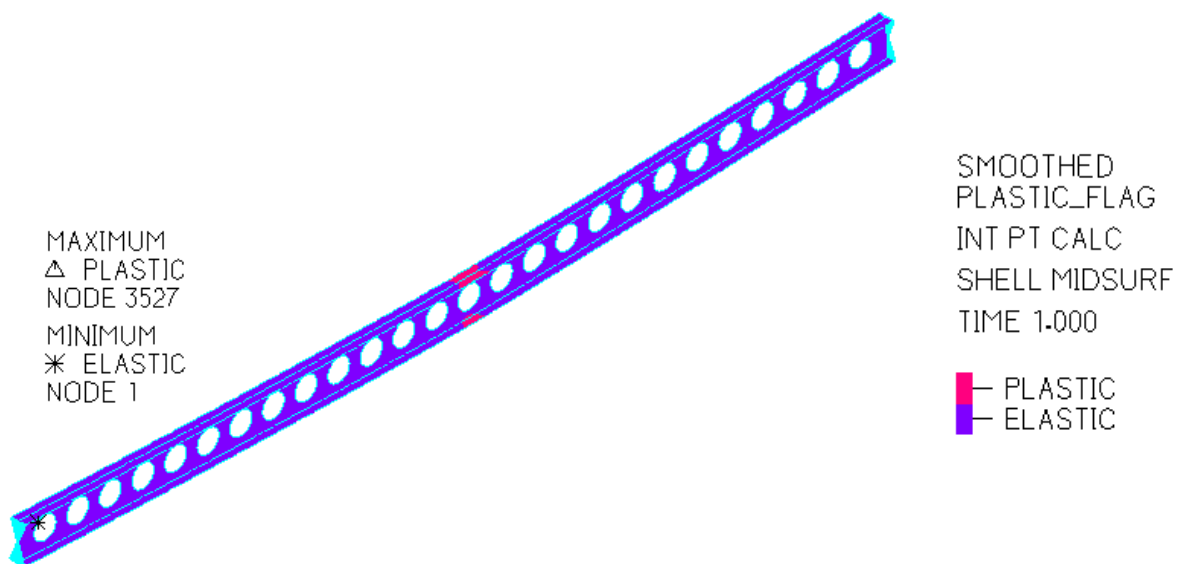
Στο Σχήμα 7-20 έως το Σχήμα 7-28 παρουσιάζεται η περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για όλες τις χαρακτηριστικές τιμές πάχους κορμού. Στην περίπτωση πάχους κορμού $t_w = 4.90$ mm η περιοχή πλαστικοποίησης εντοπίζεται αποκλειστικά στον κορμό στο άκρο της δοκού, όπου είχε παρατηρηθεί μέγιστη συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Αντίθετα, στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου μειώνεται η λυγηρότητα του κορμού, η περιοχή πλαστικοποίησης εντοπίζεται στο μέσο της δοκού στη διατομή του κορμού και των πελμάτων.



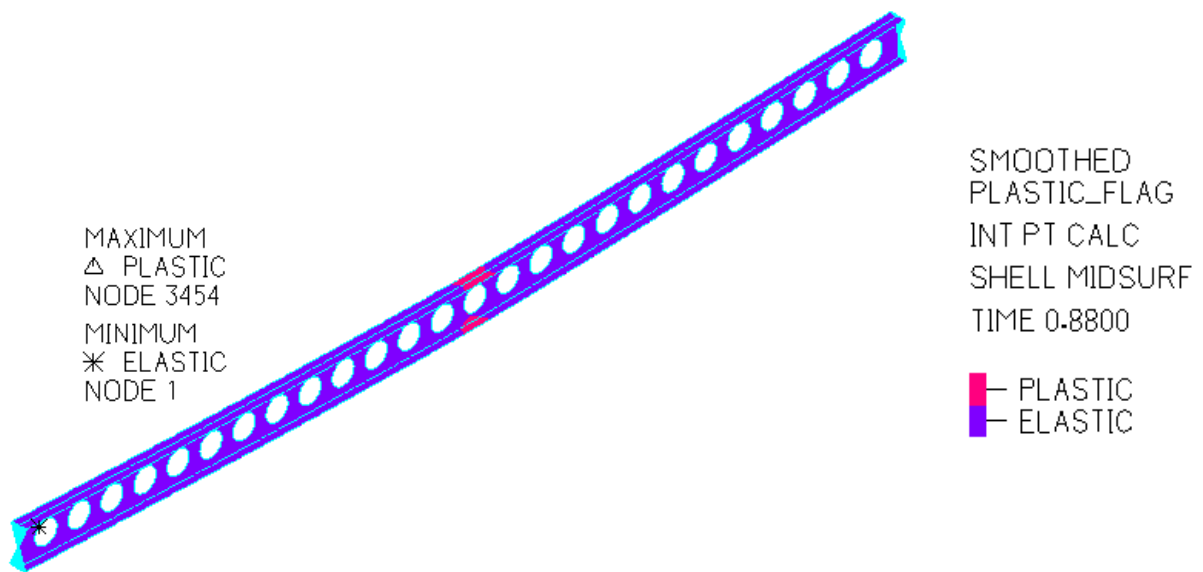
Σχήμα 7-20: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 4.90$ mm



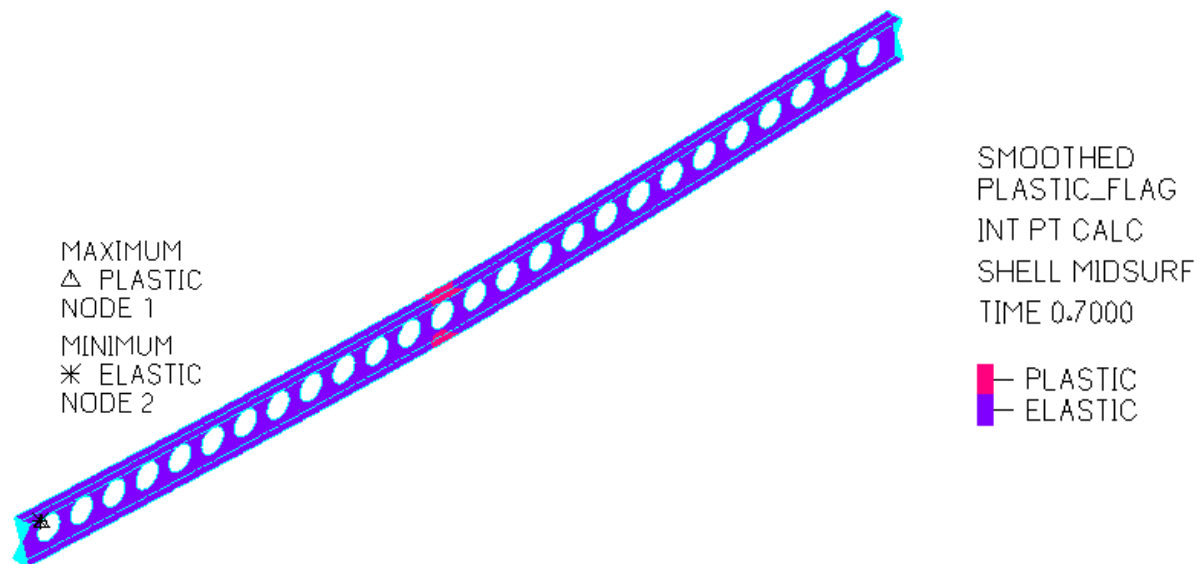
Σχήμα 7-21: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 5.30$ mm



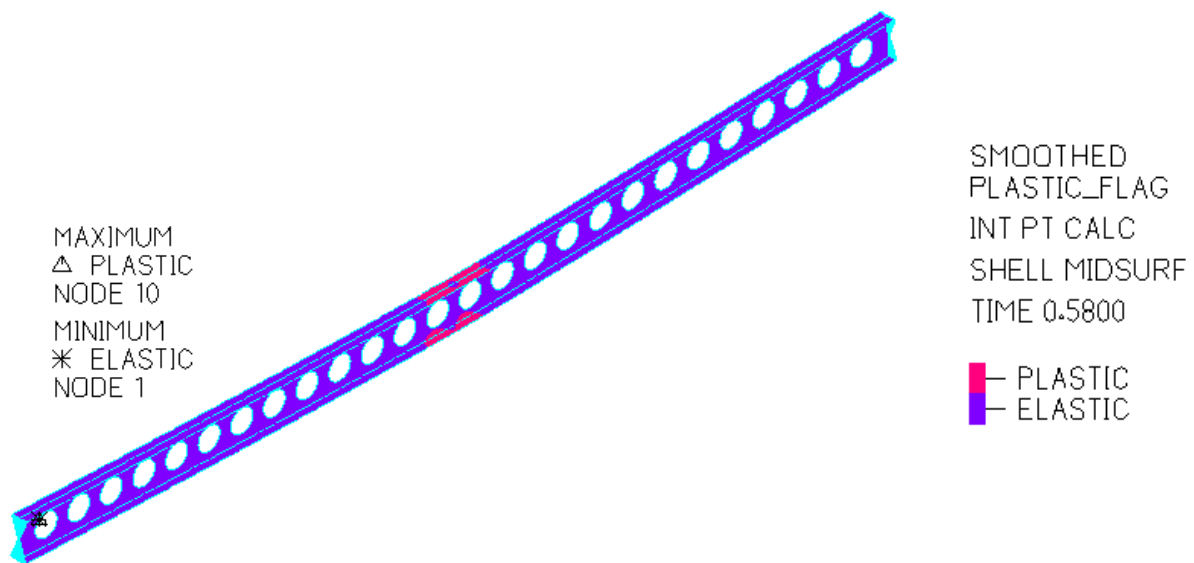
Σχήμα 7-22: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 5.70$ mm



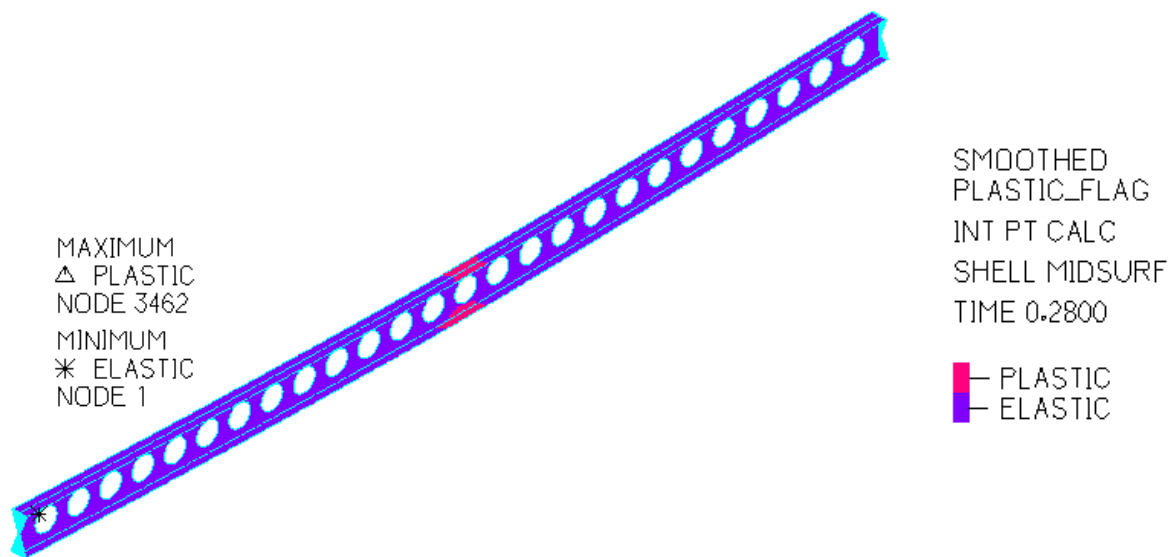
Σχήμα 7-23: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 6.10$ mm



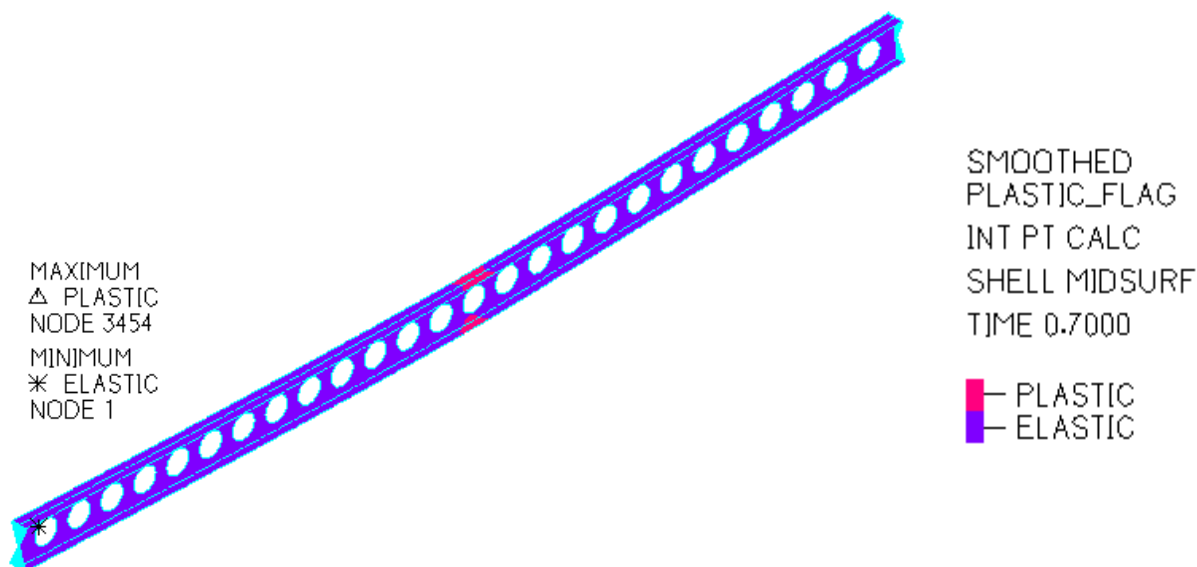
Σχήμα 7-24: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 6.30$ mm



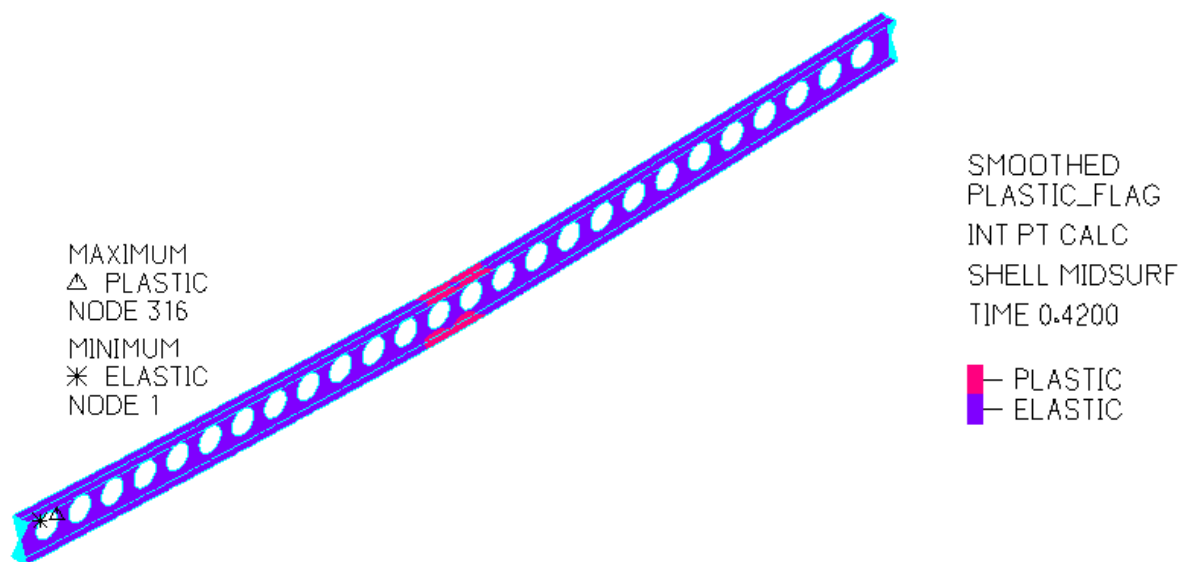
Σχήμα 7-25: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 6.70$ mm



Σχήμα 7-26: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 7.10$ mm



Σχήμα 7-27: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 7.50$ mm



Σχήμα 7-28: Περιοχή πλαστικοποίησης δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για $t_w = 7.90$ mm

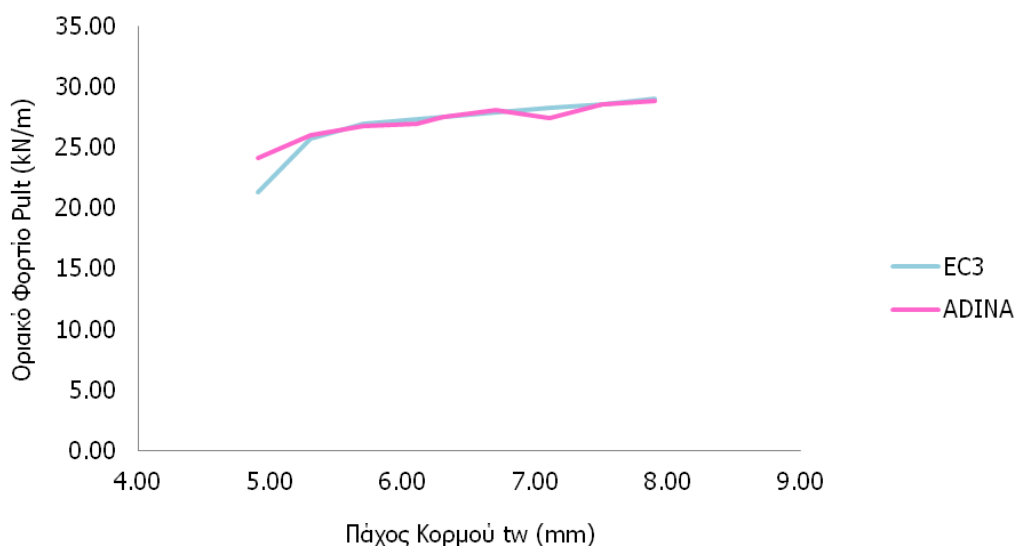
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Ύστερα από τις αριθμητικές αναλύσεις έγινε έλεγχος της δοκού για κάθε περίπτωση πάχους του κορμού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στον Πίνακα 7-2 παρουσιάζεται η Κατηγορία κατάταξης της διατομής και το οριακό φορτίο για όλες τις περιπτώσεις. Η δοκός με πάχος κορμού από $t_w = 7.90$ mm έως $t_w = 7.10$ mm κατατάσσεται ως Κατηγορία 2. Με τη μείωση του πάχους του κορμού αυξάνεται η λυγηρότητα του κορμού και συνεπώς και Κατηγορία διατομής, με αποτέλεσμα στις υπόλοιπες περιπτώσεις η δοκός να είναι Κατηγορίας 3. Το οριακό φορτίο των δοκών σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 ταυτίζεται οριακά με το αντίστοιχο οριακό φορτίο των αριθμητικών αναλύσεων (Σχήμα 7-29). Σύμφωνα με το προσχέδιο, με τη μείωση του πάχους του κορμού αλλάζει ο τρόπος

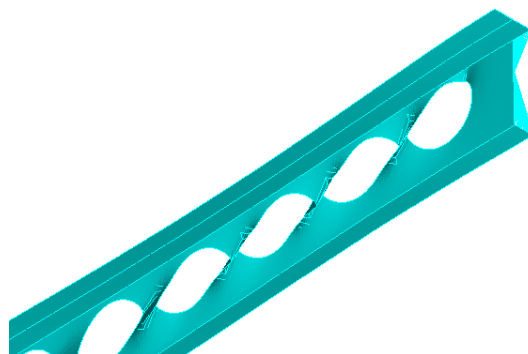
αστοχίας της δοκού. Για κορμούς με μεγάλη λυγηρότητα, $t_w = 4.90$ mm και $t_w = 5.30$ mm, αναμένεται αστοχία από διατμητικό λυγισμό του κορμού, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις η αναμενόμενη αστοχία είναι καμπική. Στην πραγματικότητα, μόνο η δοκός με πάχος κορμού $t_w = 4.90$ mm αστοχεί από διατμητικό λυγισμό του συμπαγούς τμήματος του κορμού (Σχήμα 7-30), ενώ η δοκός με $t_w = 5.30$ mm αστοχεί από ελαστοπλαστικό λυγισμό των πελμάτων λόγω διαρροής από κάμψη (Σχήμα 7-31 (α)) όπως και οι υπόλοιπες περιπτώσεις.

Πίνακας 7-2: Κατηγορία διατομής και οριακό φορτίο δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13

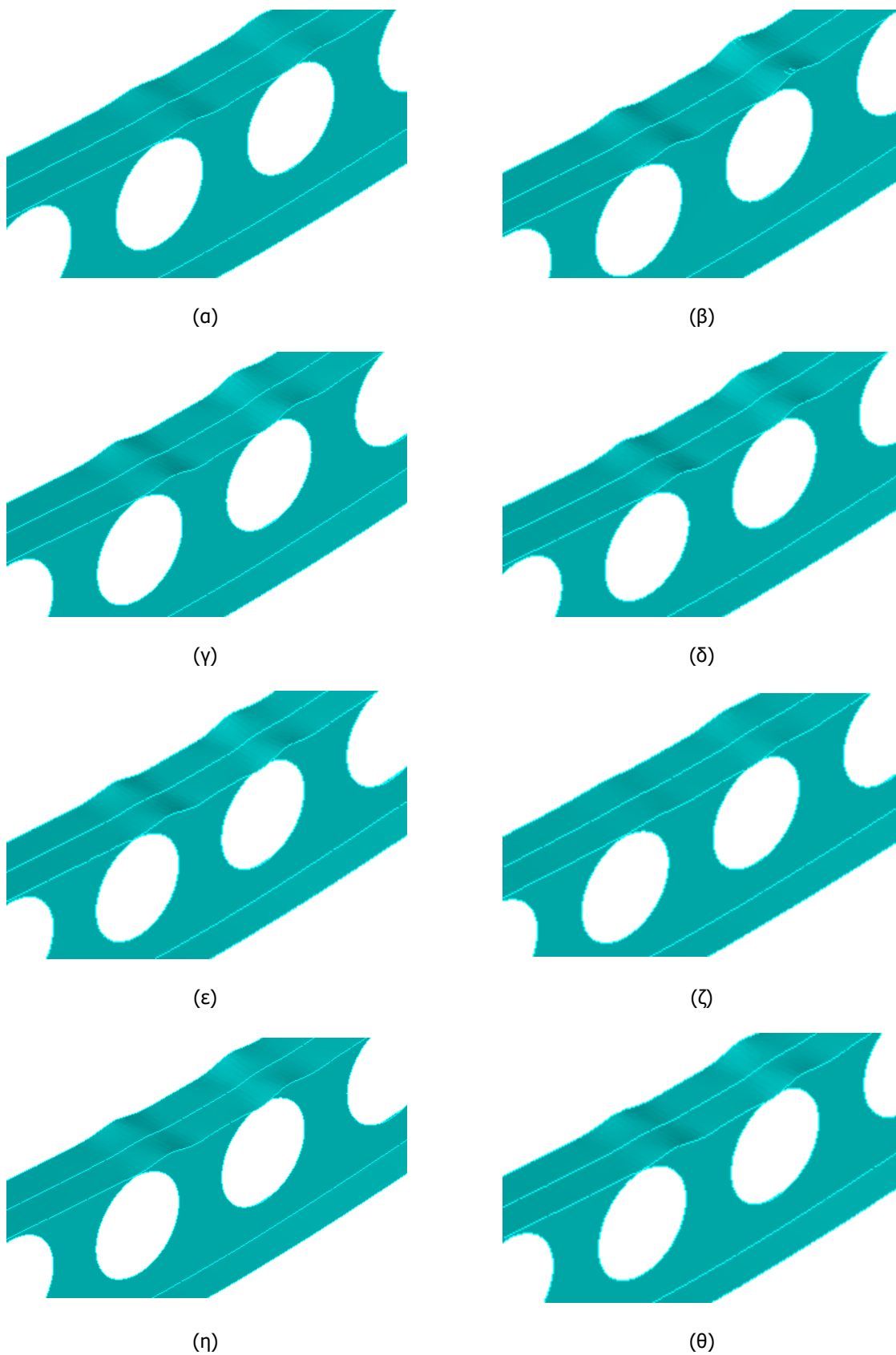
Πάχος κορμού t_w (mm)	Κατηγορία διατομής	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN/m)
4.90	3	21.32
5.30	3	25.71
5.70	3	27.00
6.10	3	27.38
6.30	3	27.57
6.70	3	27.94
7.10	2	28.32
7.50	2	28.52
7.90	2	29.07



Σχήμα 7-29: Μεταβολή οριακού φορτίου συναρτήσει του πάχους του κορμού σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις και το προσχέδιο του EN1993-1-13



Σχήμα 7-30: Αστοχία από διατμητικό λυγισμό στο άκρο της δοκού για $t_w = 4.90$ mm



Σχήμα 7-31: Καμπτική αστοχία στο μέσο της δοκού για (α) $t_w = 5.30$ mm, (β) $t_w = 5.70$ mm, (γ) $t_w = 6.10$ mm, (δ) $t_w = 6.30$ mm, (ε) $t_w = 6.70$ mm, (ζ) $t_w = 7.10$ mm, (η) $t_w = 7.50$ mm και (θ) $t_w = 7.90$ mm

8 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΔΟΚΟ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

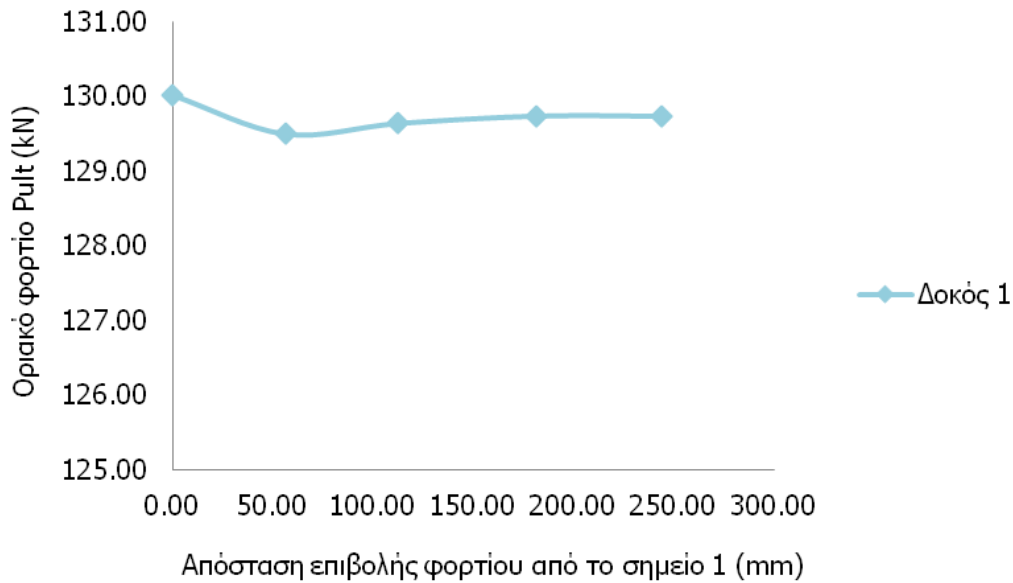
Σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 δεν αναφέρεται κάποιος κανόνας για τη θέση επιβολής ενός συγκεντρωμένου φορτίου σε δοκό με κυκλικά διάκενα κορμού. Για τη διερεύνηση της επιρροής της θέσης επιβολής συγκεντρωμένου φορτίου υιοθετήθηκε ένας γενικός κανόνας σχεδιασμού ορθογωνικών διακένων που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σύμφωνα με αυτό τον κανόνα, η απόσταση από κάθε σημείο του διάκενου στο κοντινότερο συγκεντρωμένο φορτίο δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το 0.5 του συνολικού ύψους της διατομής (h). Στην περίπτωση δοκού με πολλαπλά κυκλικά διάκενα κορμού χρησιμοποιήθηκαν οι διαστάσεις του ισοδύναμου ορθογωνίου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1 της Παραγράφου 3.4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για τη διερεύνηση της επιρροής στην απόκριση της δοκού επιλέχθηκαν 5 θέσεις επιβολής του φορτίου.

8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

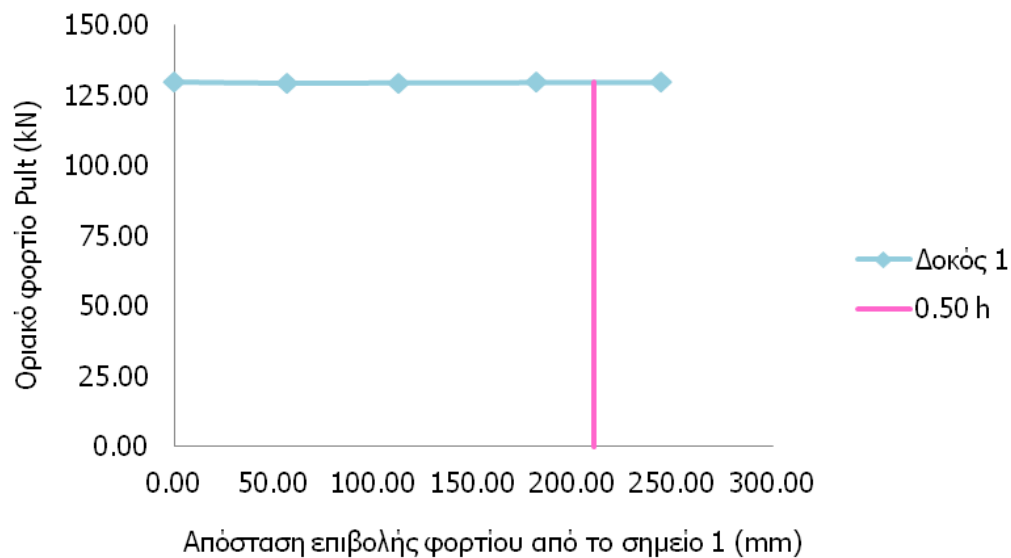
Αρχικά, στον Πίνακα 8-1 παρουσιάζεται η απόσταση επιβολής του φορτίου από το Σημείο 1 του κεντρικού διάκενου (Σχήμα 8-2) και η τιμή του οριακού φορτίου για κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 8-1 απεικονίζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της αποστάσεως επιβολής του φορτίου από το Σημείο 1. Στην περίπτωση όπου η απόσταση ισούται με 243.75 mm, δηλαδή υπερβαίνει το 0.5 του ύψους της διατομής, η τιμή του οριακού φορτίου δεν αποκλίνει από τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η κλίση του διαγράμματος παρατηρείται πως είναι σχεδόν μηδενική, δηλαδή η θέση επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της δοκού.

Πίνακας 8-1: Οριακό φορτίο δοκού για κάθε περίπτωση αποστάσεως

Απόσταση θέσης επιβολής από το Σημείο 1 (mm)	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN)
0	130.1
56.25	129.49
112.50	129.63
181.25	129.73
243.75	129.73

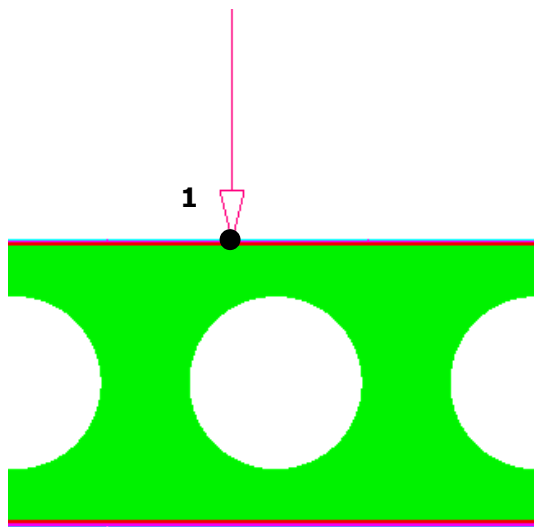


(α)

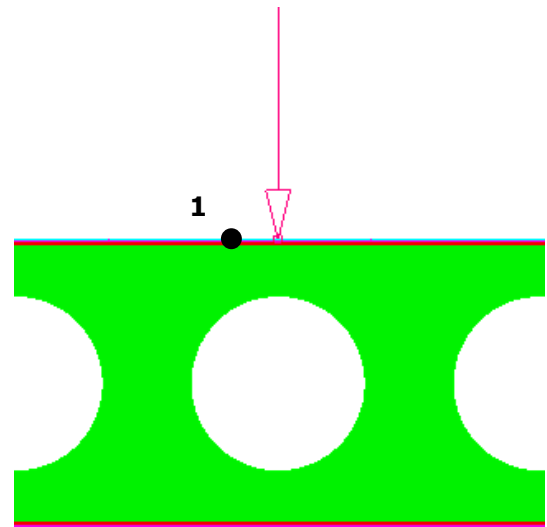


(β)

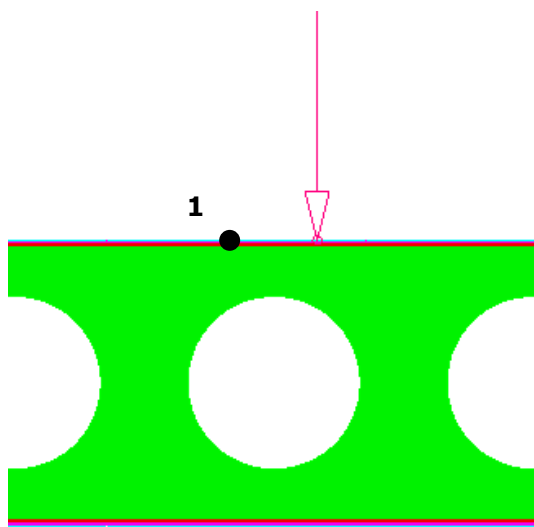
Σχήμα 8-1: (α) και (β) Μεταβολή οριακού φορτίου δοκού συναρτήσει της θέσης επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου



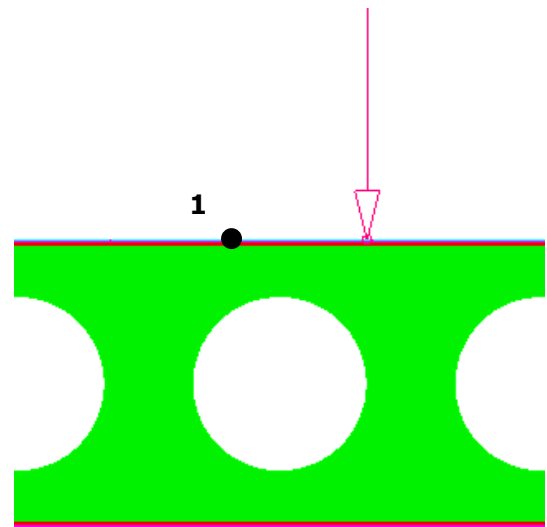
(α)



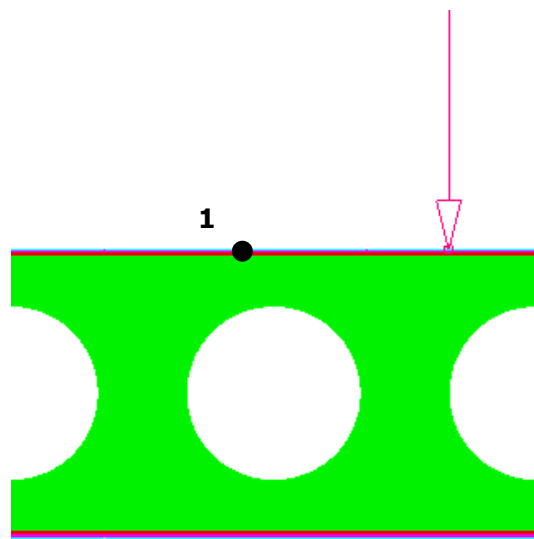
(β)



(γ)



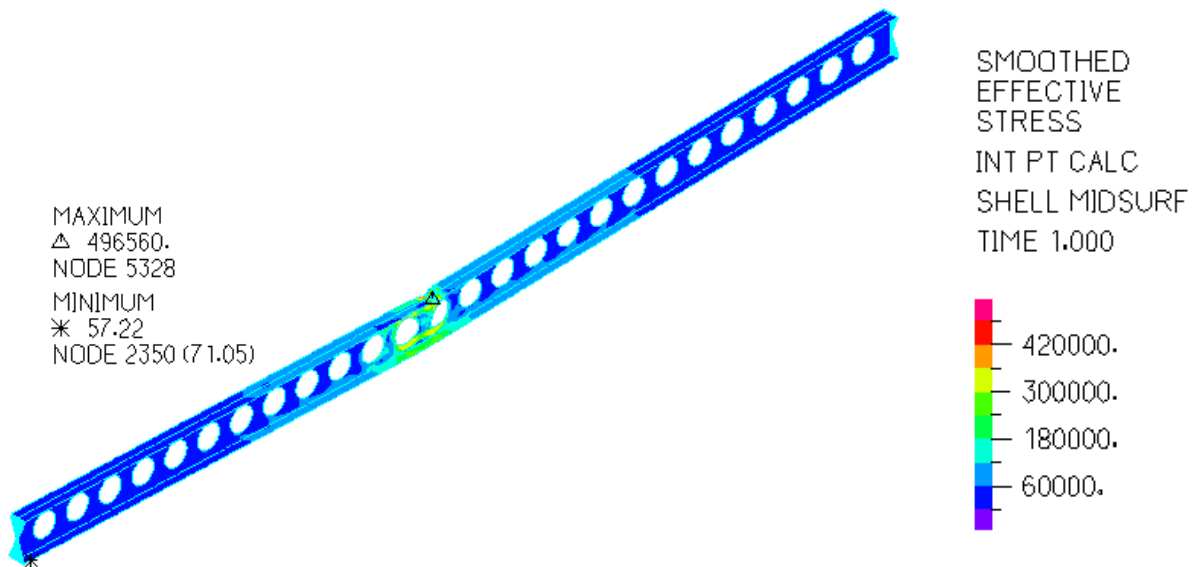
(δ)



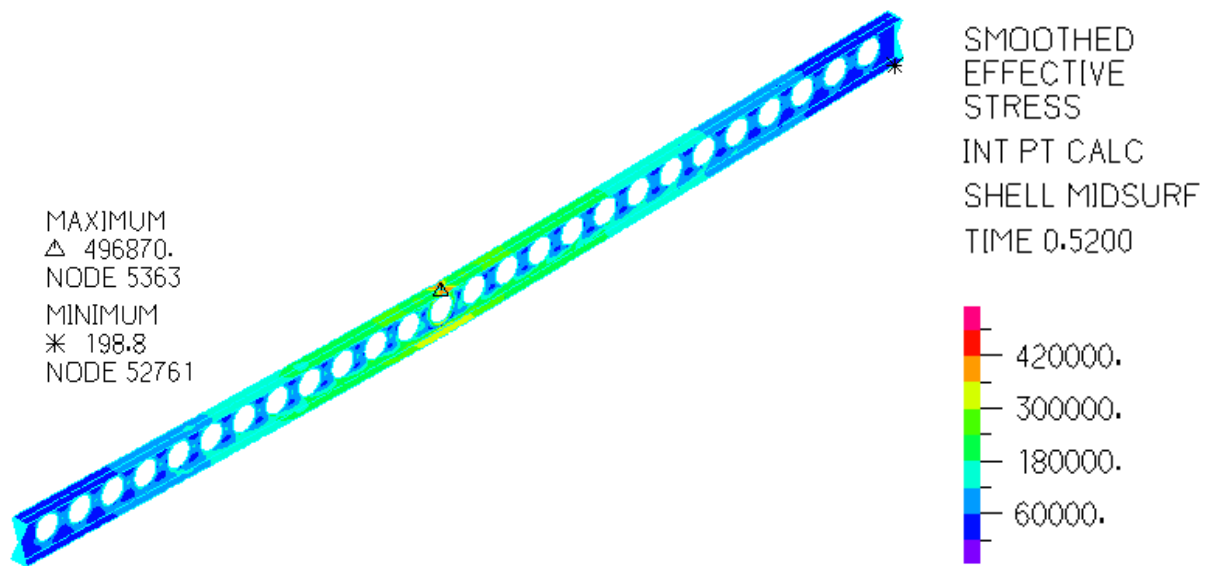
(ε)

Σχήμα 8-2: Απόσταση επιβολής συγκεντρωμένου φορτίου από το Σημείο 1 (α) 0 mm, (β) 56.25 mm, (γ) 112.50 mm, (δ) 181.25 mm και (ε) 243.75 mm

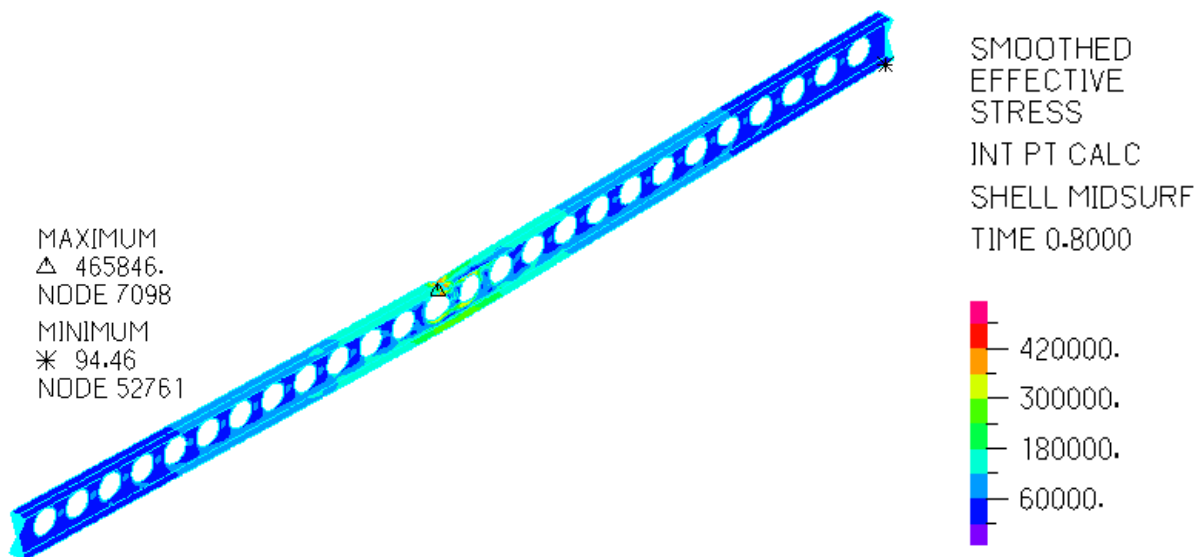
Στο Σχήμα 8-3 έως το Σχήμα 8-7 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Η τιμή της μέγιστης τάσης υπερβαίνει το όριο διαρροής της δοκού ($f_y = 355$ MPa) σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η υπέρβαση αυτή οφείλεται στην κράτυνση του χάλυβα που λαμβάνεται υπόψη στις αριθμητικές αναλύσεις. Η τιμή της τάσεως von Mises μεγιστοποιείται στο σημείο επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου και παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Η τιμή αυτή αποτελεί ένα τοπικό φαινόμενο και δεν είναι αντιπροσωπευτική της κατανομής των τάσεων κατά μήκος της δοκού, αφού πέρα από τη θέση επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου η συγκέντρωση των τάσεων είναι ομαλή και κυμαίνεται σε χαμηλό εύρος τιμών.



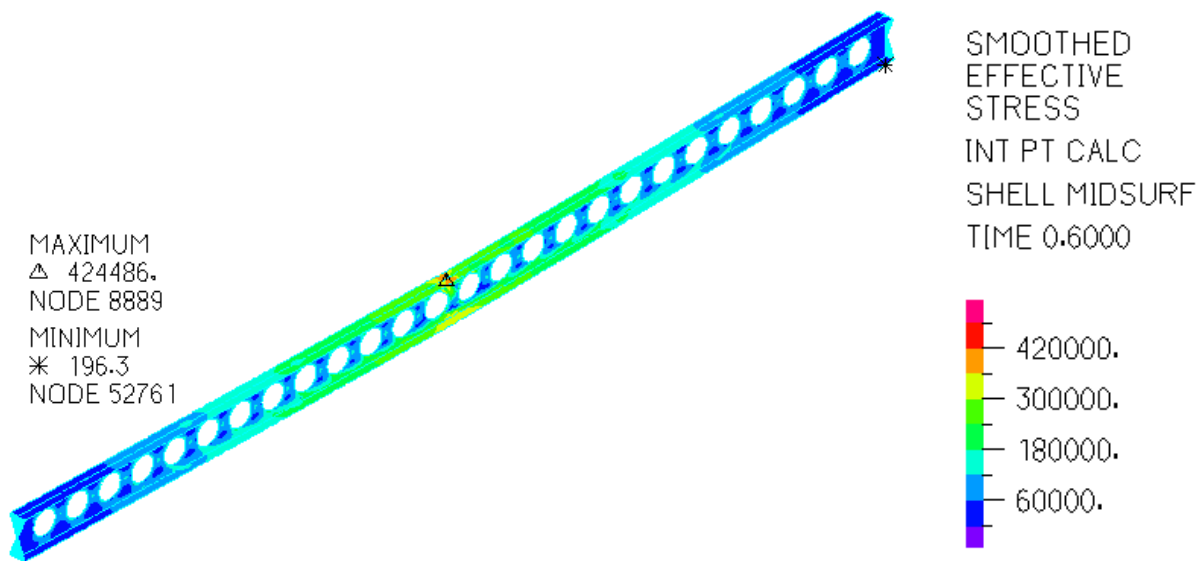
Σχήμα 8-3: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για 0 mm



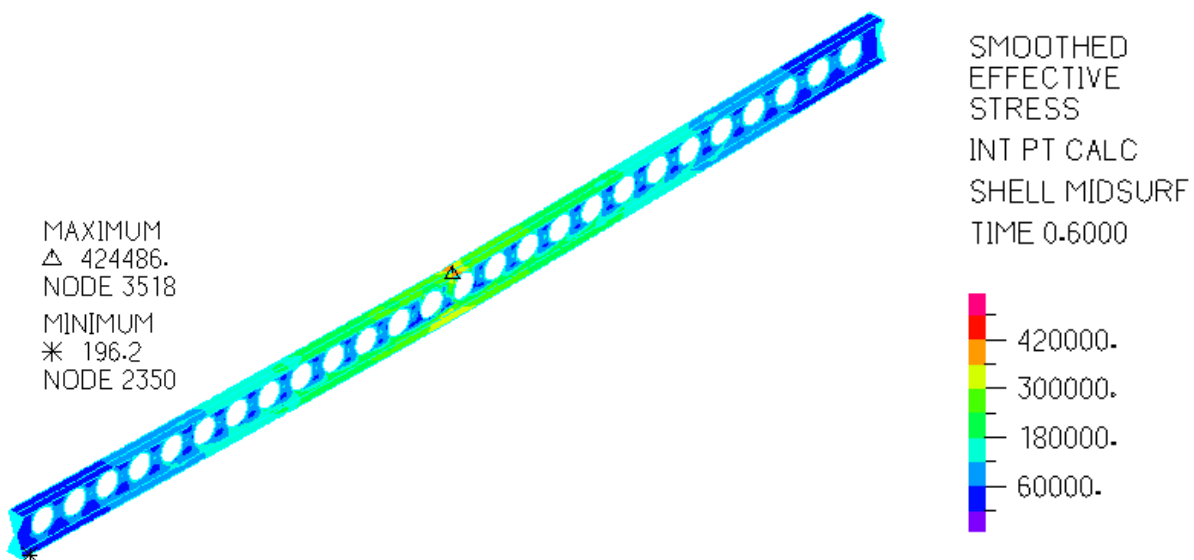
Σχήμα 8-4: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για 56.25 mm



Σχήμα 8-5: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για 112.50 mm

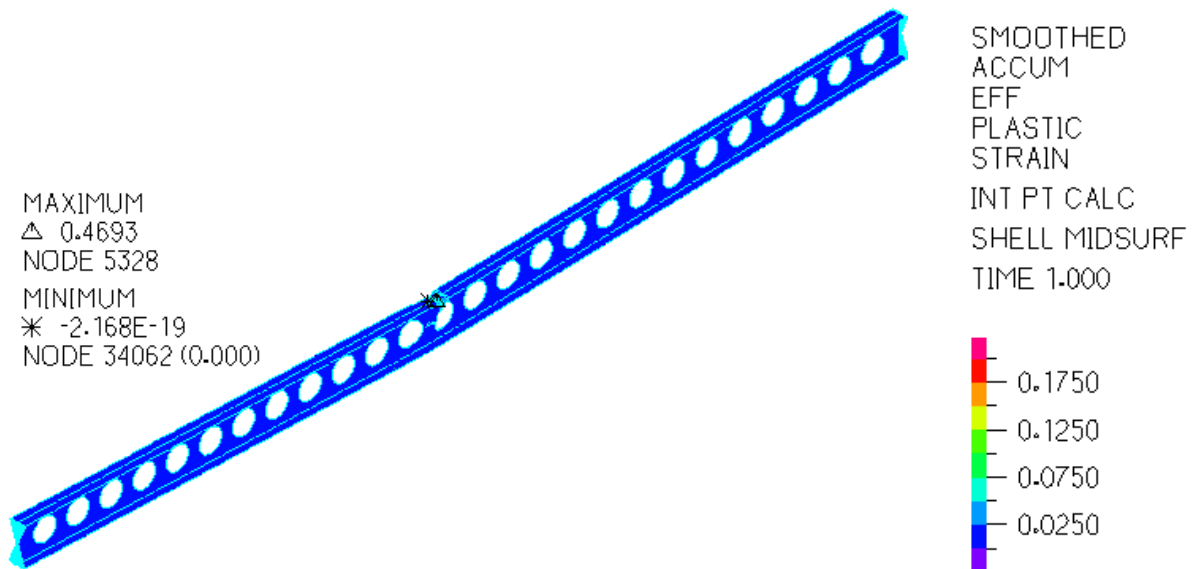


Σχήμα 8-6: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για 181.25 mm

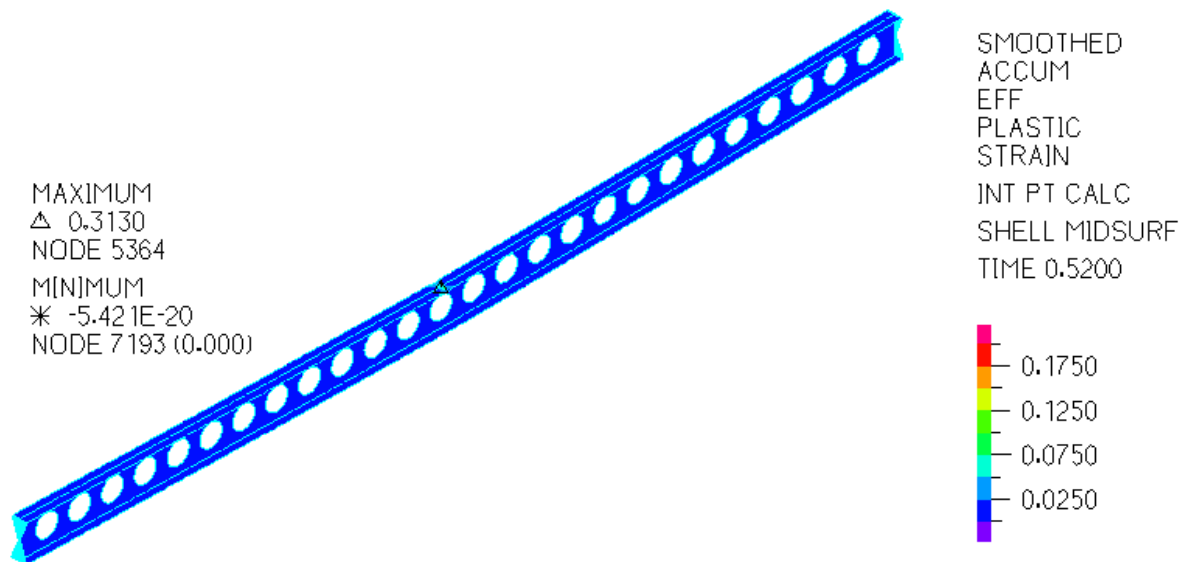


Σχήμα 8-7: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού για 243.75 mm

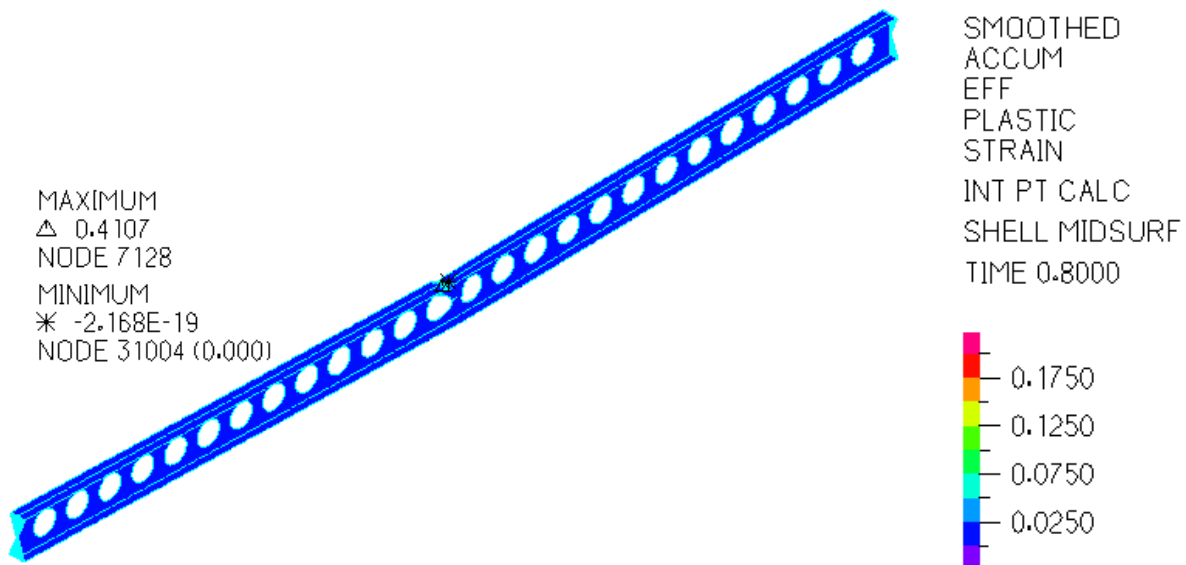
Στο Σχήμα 8-8 έως το Σχήμα 8-12 παρουσιάζεται η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Στο σημείο επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου εντοπίζεται η μέγιστη παραμόρφωση της δοκού, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Παρόλα αυτά, η υψηλή τιμή αποτελεί ένα τοπικό φαινόμενο και δεν είναι αντιπροσωπευτική της κατανομής των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού, αφού πέρα από τη θέση επιβολής είναι ομαλή και κυμαίνεται σε χαμηλό εύρος τιμών.



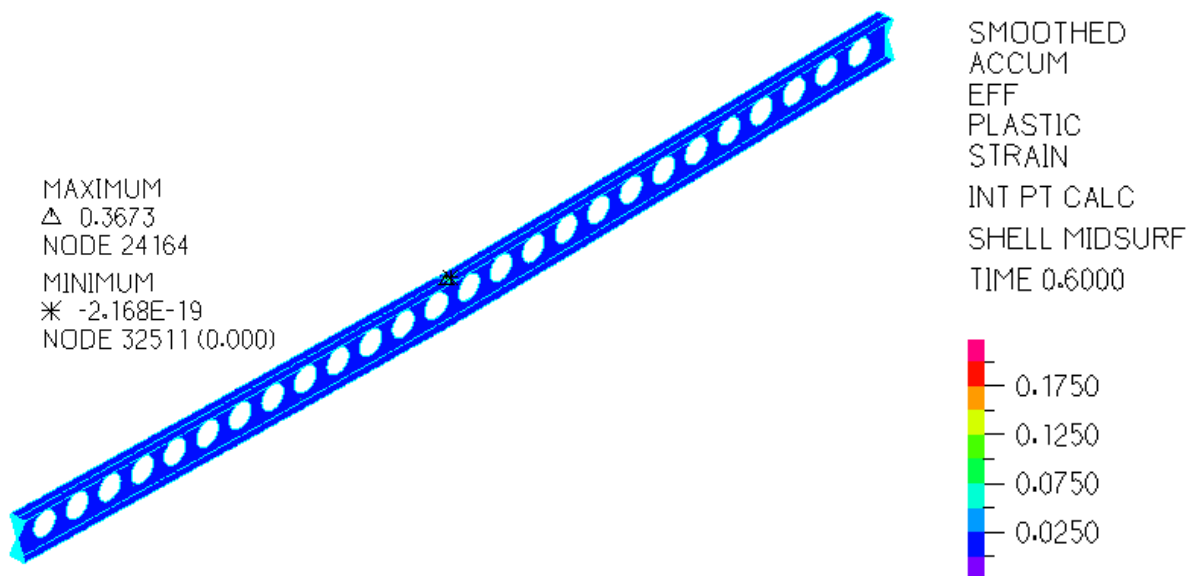
Σχήμα 8-8: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για 0 mm



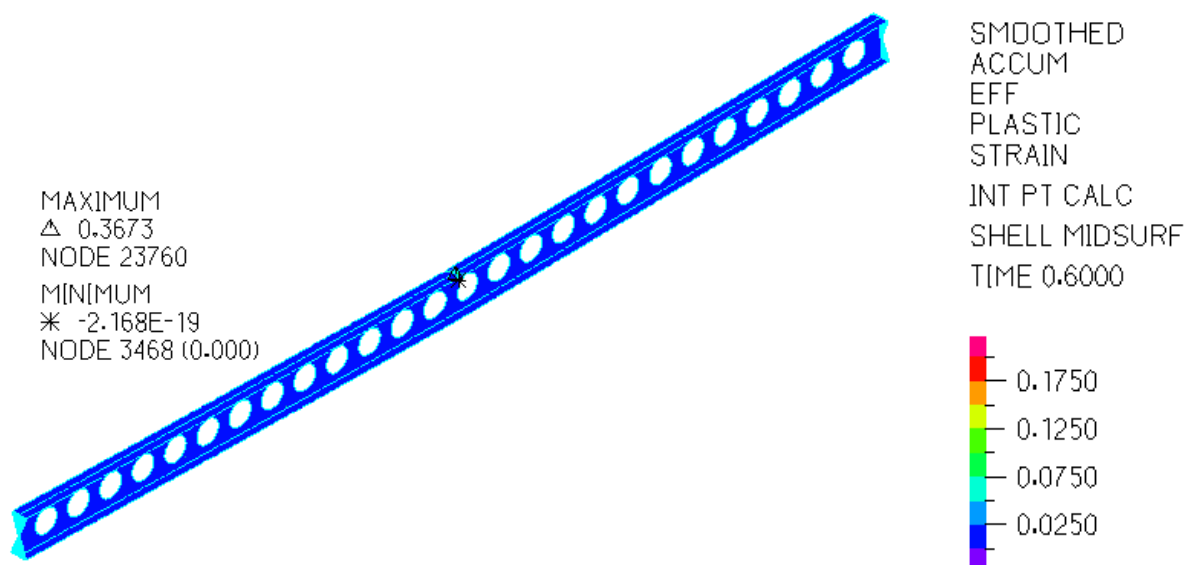
Σχήμα 8-9: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για 56.25 mm



Σχήμα 8-10: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για 112.50 mm

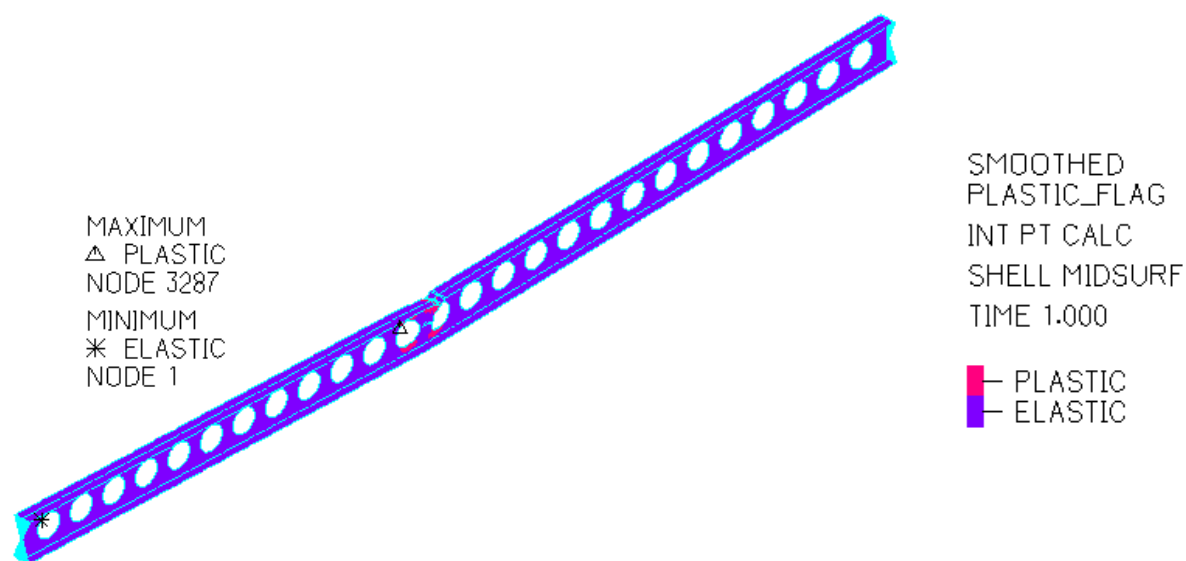


Σχήμα 8-11: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για 181.25 mm

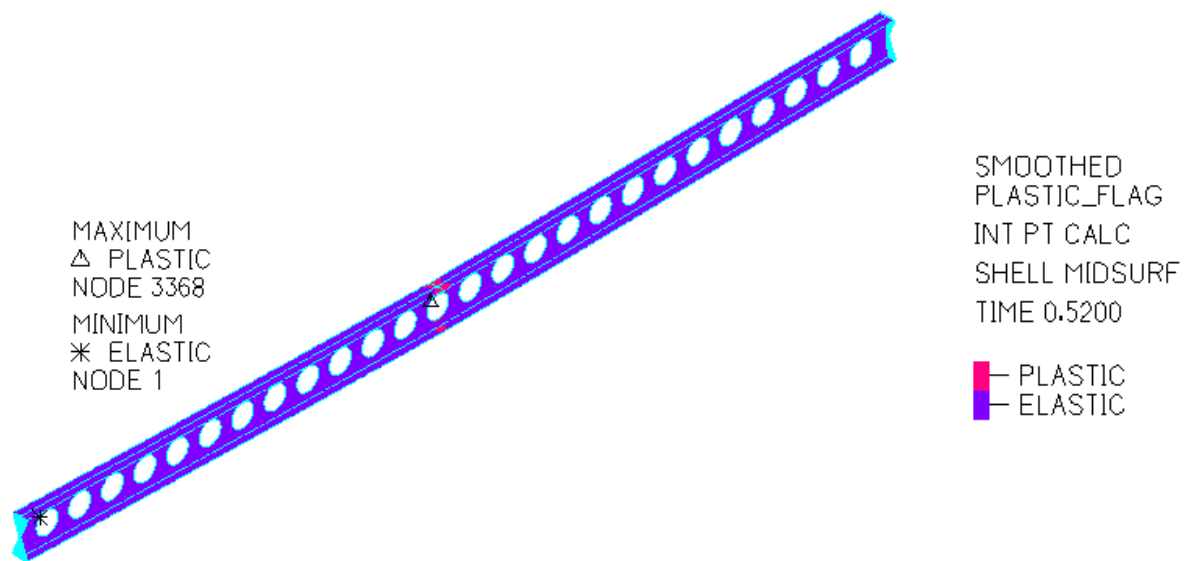


Σχήμα 8-12: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού για 243.75 mm

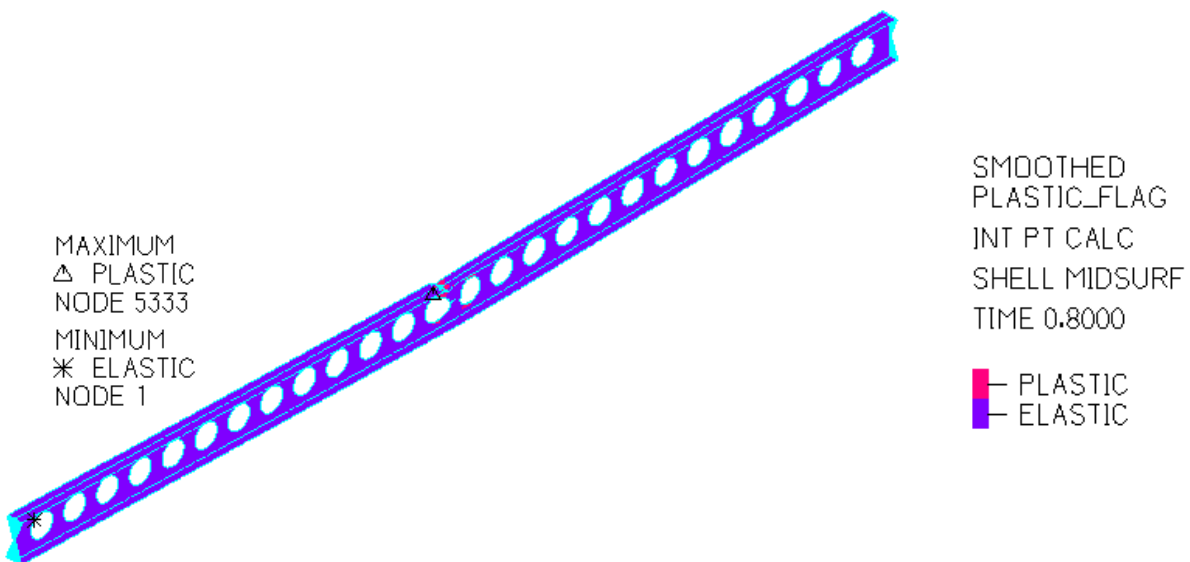
Στο Σχήμα 8-13 έως το Σχήμα 8-17 παρουσιάζεται η περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού εμφανίζεται γύρω από τη θέση επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου όπου η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι μέγιστη.



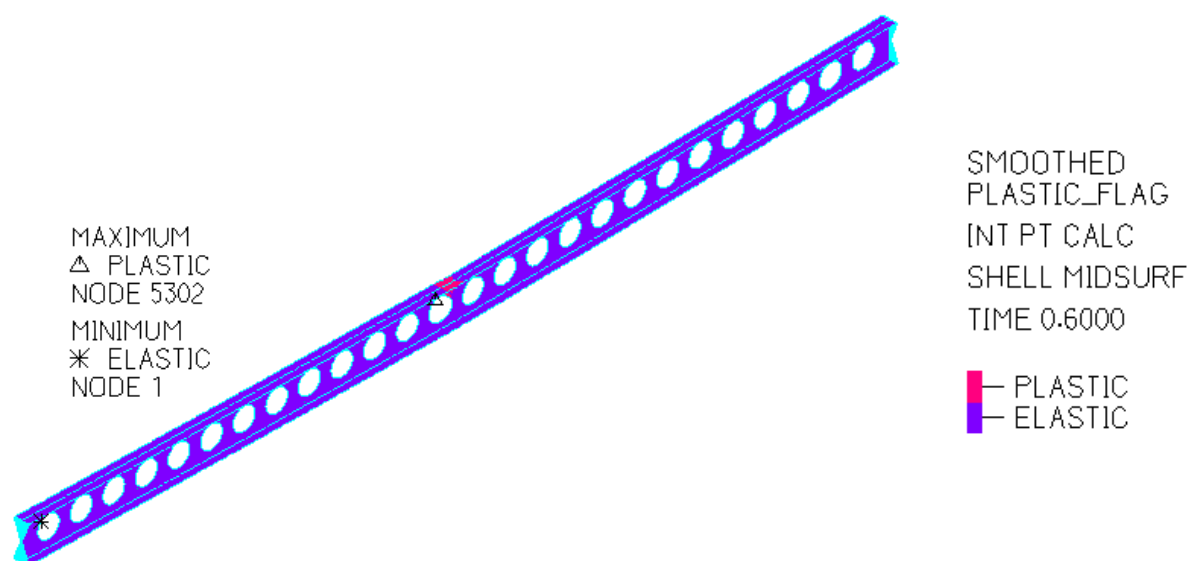
Σχήμα 8-13: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για 0 mm



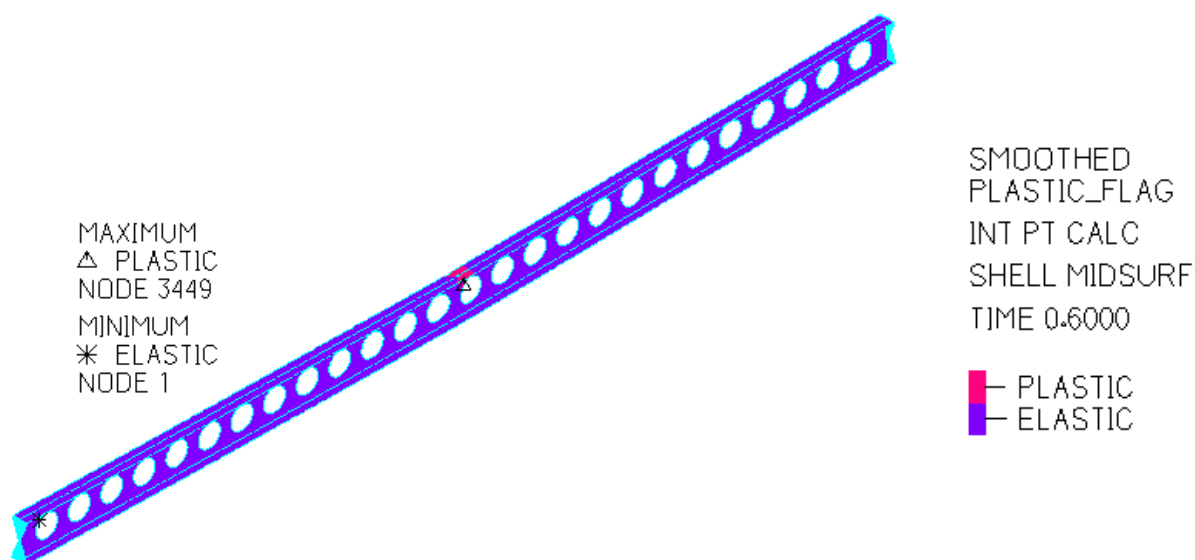
Σχήμα 8-14: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για 56.25 mm



Σχήμα 8-15: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για 112.50 mm

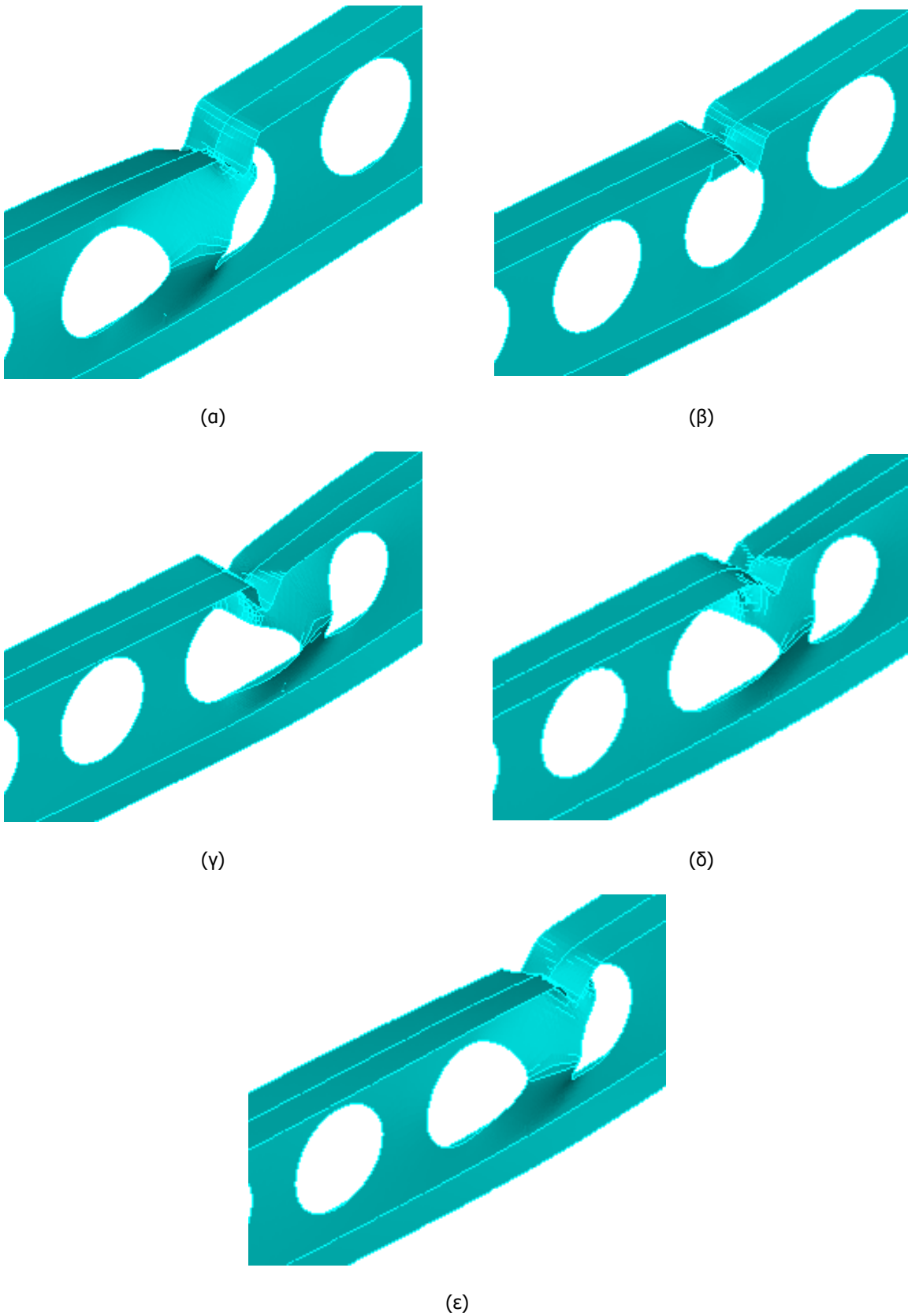


Σχήμα 8-16: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για 181.25 mm



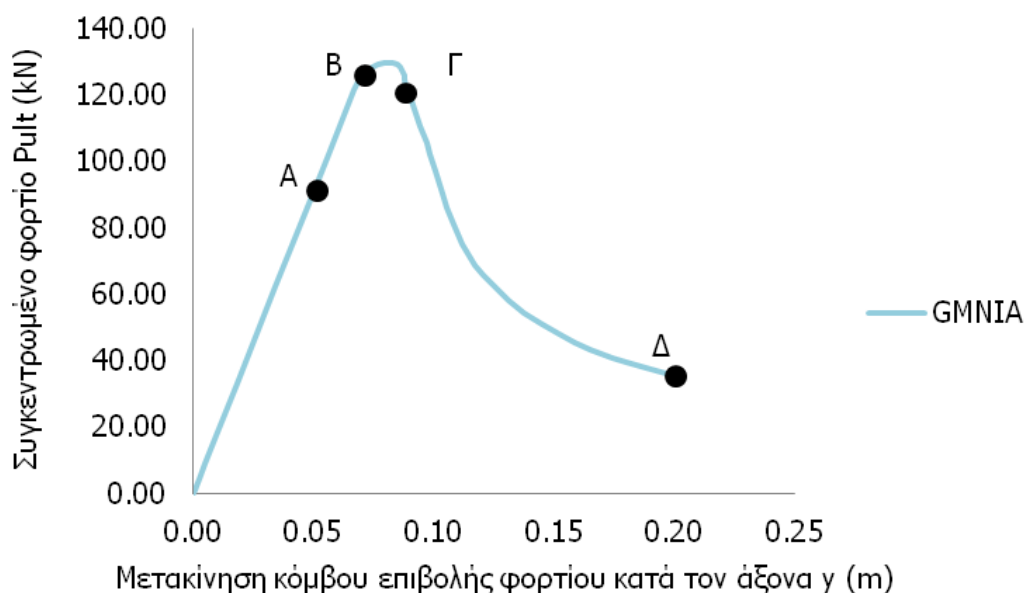
Σχήμα 8-17: Περιοχή πλαστικοποίησης της δοκού στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για 243.75 mm

Στο Σχήμα 8-18 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη εικόνα της δοκού για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, όπου παρατηρείται έντονος τοπικός λυγισμός του άνω πέλματος και του κορμού στη θέση επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου.

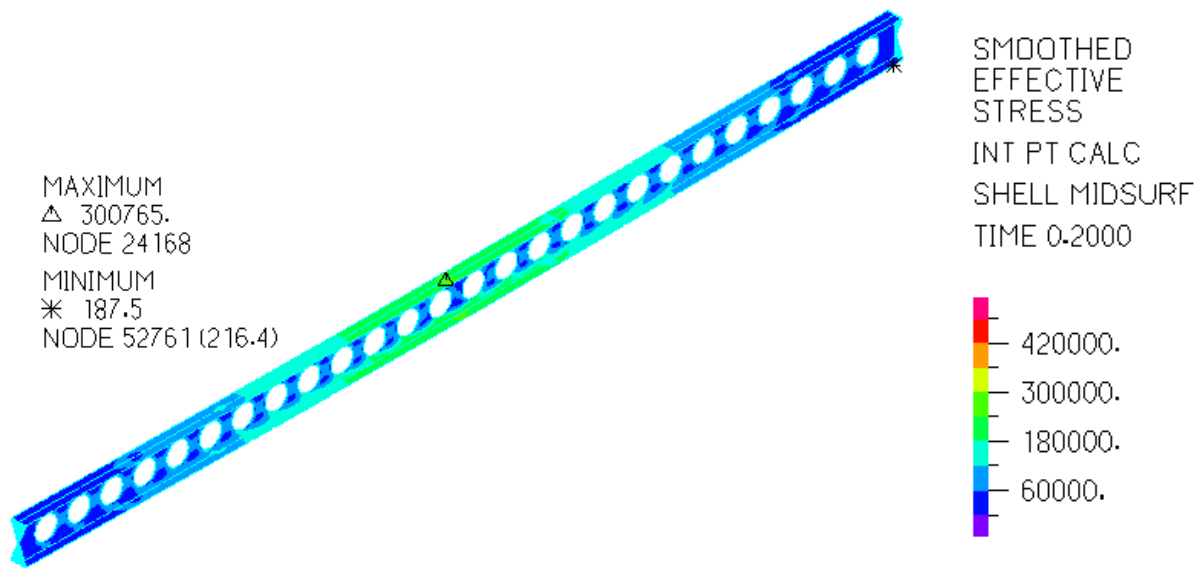


Σχήμα 8-18: Παραμορφωμένη εικόνα στη θέση επιβολής του φορτίου για (α) 0 mm, (β) 56.25 mm, (γ) 112.50 mm, (δ) 181.25 mm και (ε) 243.75 mm

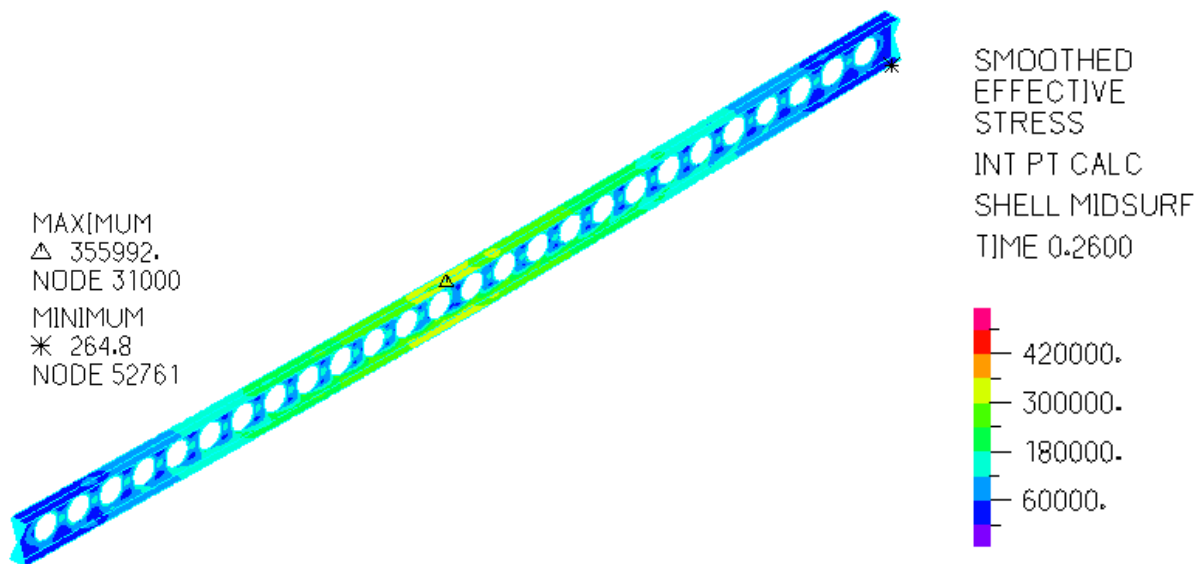
Για την 3^η περίπτωση θέσης επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου γίνεται διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας. Στο Σχήμα 8-19 παρουσιάζεται η μετακίνηση του κόμβου που ασκείται το συγκεντρωμένο φορτίο συναρτήσει της τιμής του φορτίου. Αρχικά, ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει ανοδικό κλάδο, μέχρι το οριακό φορτίο και ύστερα καθοδικό κλάδο μέχρι την αστοχία. Στο Σχήμα 8-20 έως το Σχήμα 8-27 απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων Von Mises και των παραμορφώσεων σε 4 χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας της δοκού. Στο Σημείο Α, το οποίο αντιστοιχεί στον ελαστικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας, η τιμή της μέγιστης τάσης δεν υπερβαίνει το όριο διαρροής και δεν παρατηρείται έντονη ανάπτυξη παραμορφώσεων. Λίγο πριν συμβεί η 1^η διαρροή της δοκού, στο Σημείο Β, εντοπίζεται υπέρβαση του ορίου διαρροής ενώ οι παραμορφώσεις κυμαίνονται σε μικρό εύρος τιμών. Επιπλέον, παρατηρείται πως η δοκός περνάει στη διαρροή πριν το λυγισμό του κορμού και των πελμάτων. Ύστερα από την 1^η διαρροή, στο Σημείο Γ, παρατηρείται υπέρβαση του ορίου διαρροής και υψηλή συγκέντρωση παραμορφώσεων τοπικά στη θέση επιβολής του φορτίου. Στην αστοχία της δοκού, Σημείο Δ, παρατηρείται τοπικά υψηλή συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων ενώ πέρα από το σημείο επιβολής η κατανομή είναι ομαλή και κυμαίνεται σε χαμηλότερο εύρος τιμών.



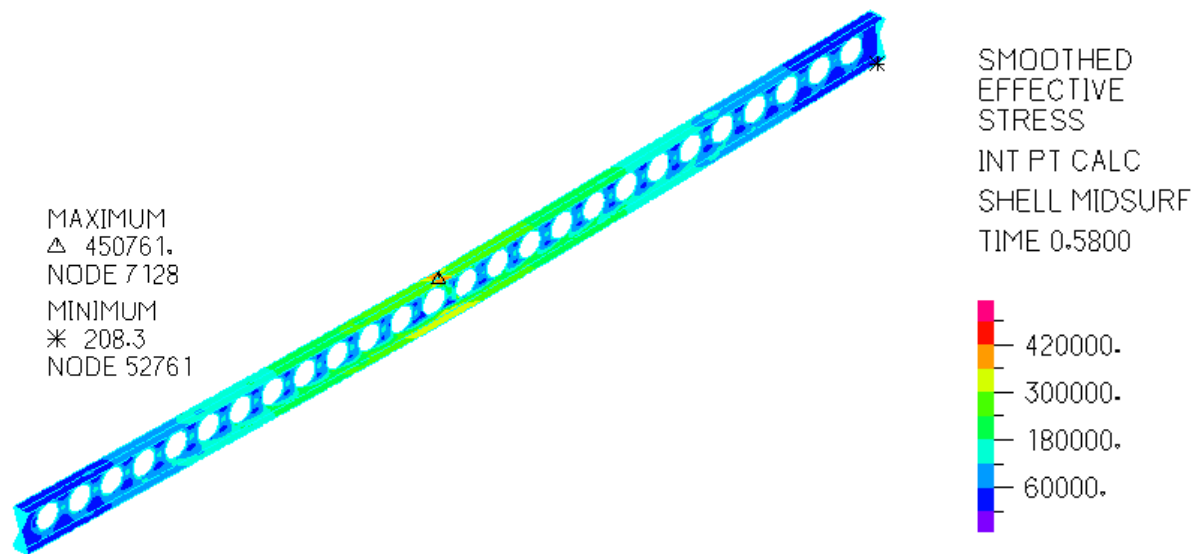
Σχήμα 8-19: Δρόμος ισορροπίας δοκού



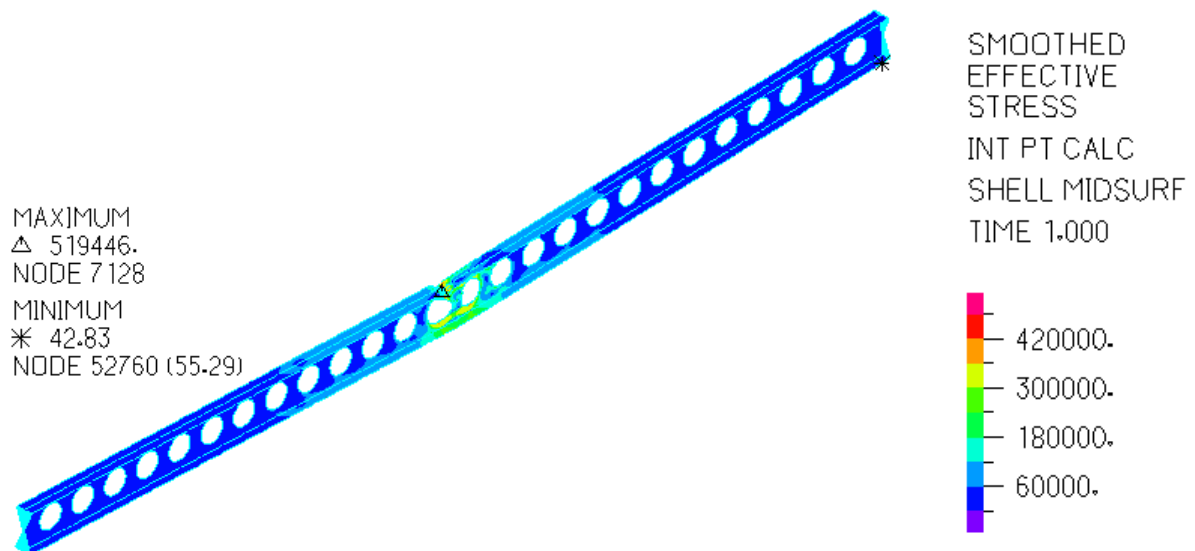
Σχήμα 8-20: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Α



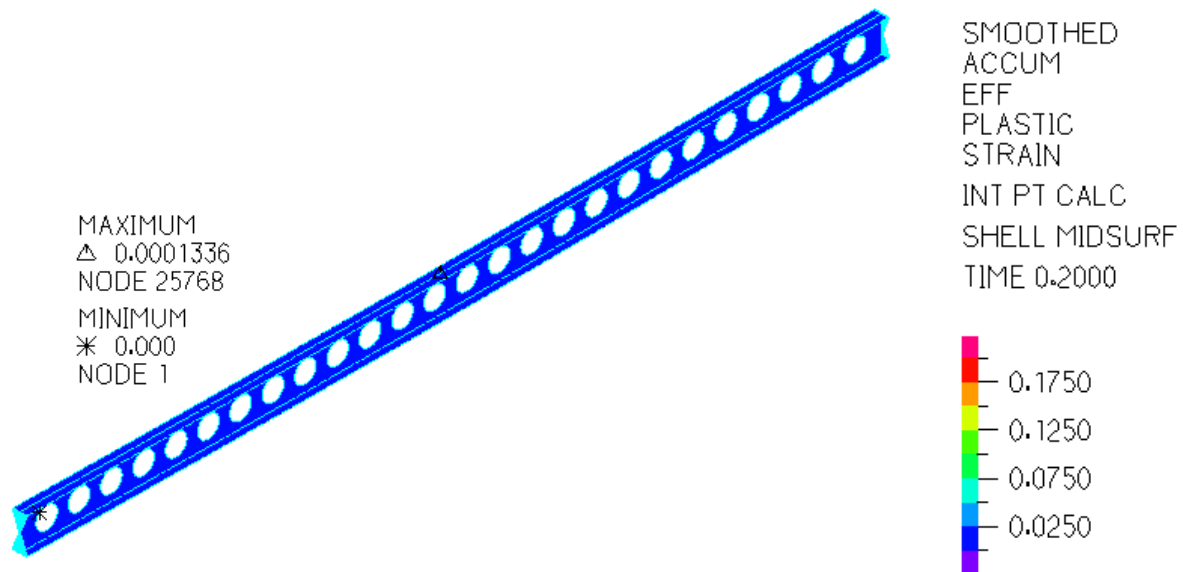
Σχήμα 8-21: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Β



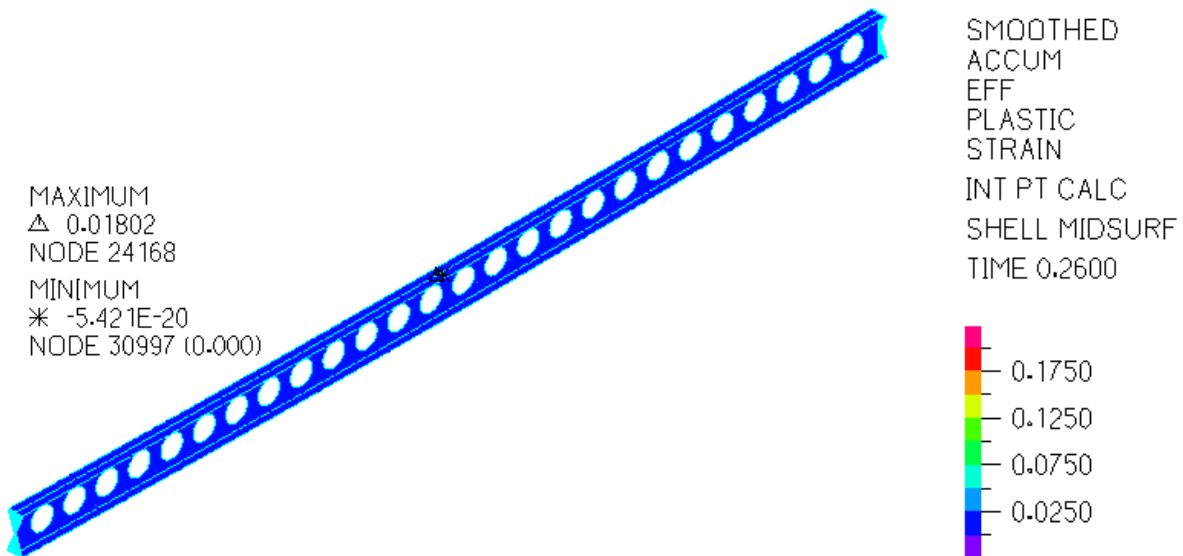
Σχήμα 8-22: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ



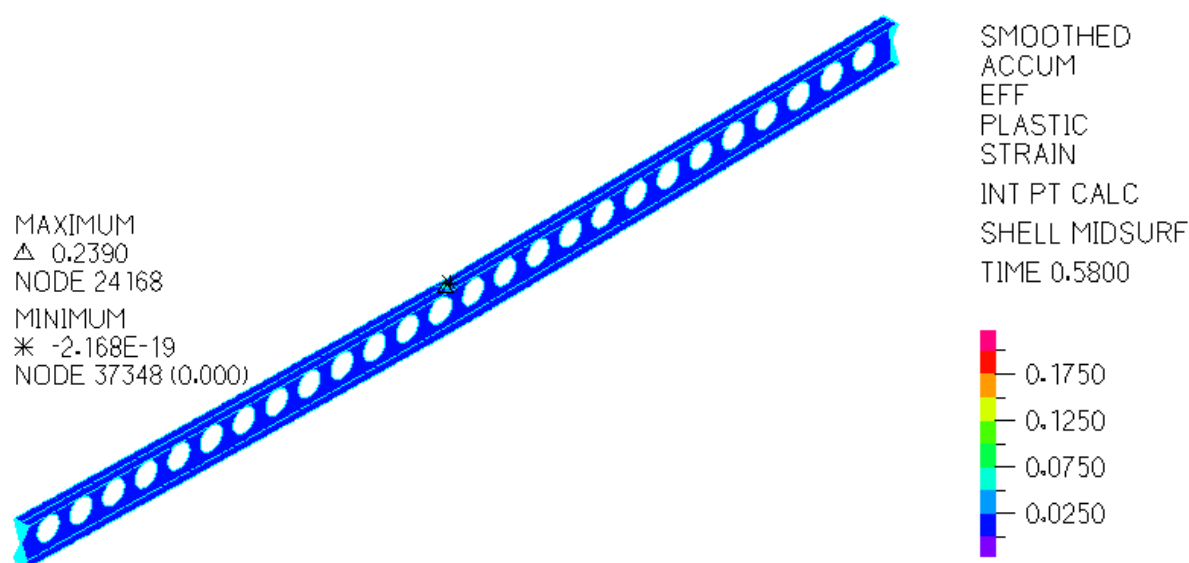
Σχήμα 8-23: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ



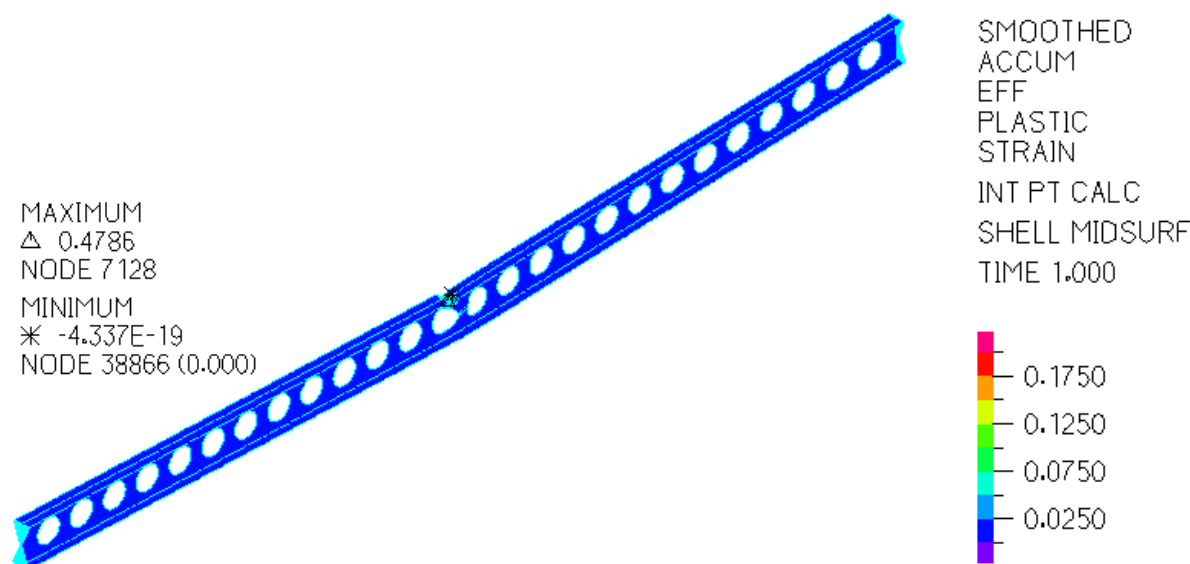
Σχήμα 8-24: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο A



Σχήμα 8-25: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο B



Σχήμα 8-26: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ



Σχήμα 8-27: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ

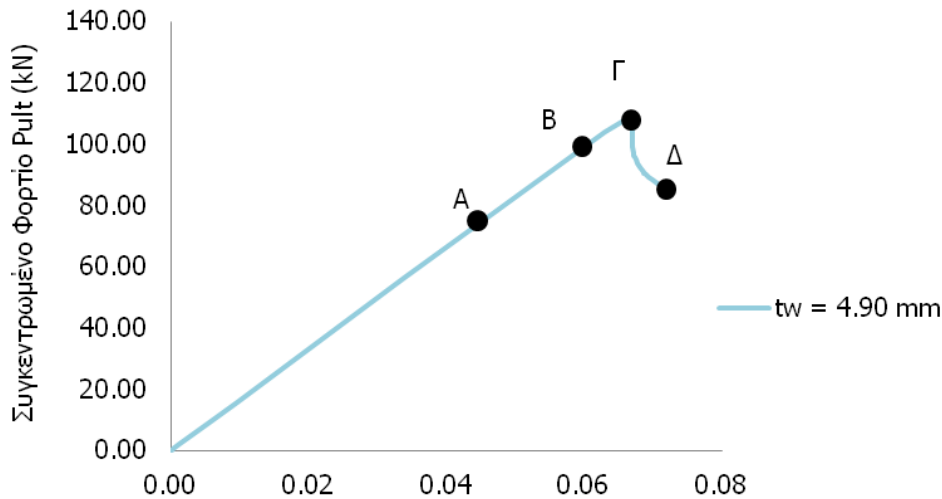
8.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΡΜΟΥ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η επίδραση του πάχους του κορμού στον τρόπο αστοχίας της δοκού υπό την επιβολή συγκεντρωμένου φορτίου μελετάται για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις: (α) $t_w = 7.50$ mm και (β) $t_w = 4.90$ mm. Η απόκριση της δοκού με πάχος κορμού $t_w = 7.50$ mm (Κατηγορία 2) παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 8.2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στον Πίνακα 8-2 παρουσιάζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει του πάχους του κορμού. Η δοκός με πάχος κορμού $t_w = 4.90$ mm είναι Κατηγορίας 3 και στο Σχήμα 8-28 (α) παρουσιάζεται η μετακίνηση του κόμβου που ασκείται το συγκεντρωμένο φορτίο κατά τον άξονα y συναρτήσει της τιμής του φορτίου. Αρχικά, ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει ανοδικό κλάδο μέχρι το οριακό φορτίο και ύστερα καθοδικό κλάδο μέχρι την αστοχία. Στο Σχήμα 8-28 (β) παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της δοκού για $t_w = 7.50$

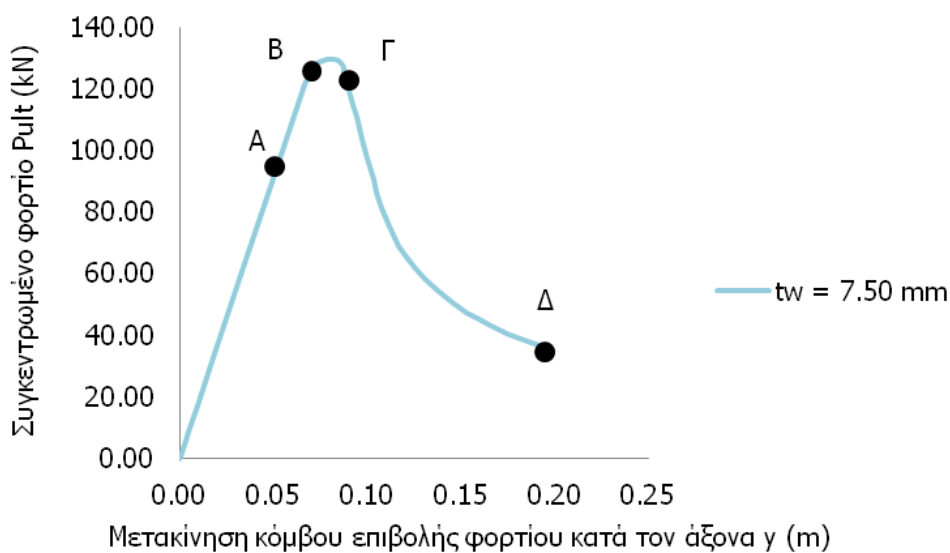
mm. Στην περίπτωση διατομής Κατηγορίας 2 παρατηρείται αυξημένη δυνατότητα ανάπτυξης μετακινήσεων πριν την αστοχία και αυξημένη αντοχή.

Πίνακας 8-2: Οριακό φορτίο δοκού για κάθε περίπτωση πάχους κορμού

Πάχος κορμού t_w (mm)	Κατηγορία διατομής	Οριακό φορτίο P_{ult} (kN)
4.90	3	108.71
7.50	2	129.63



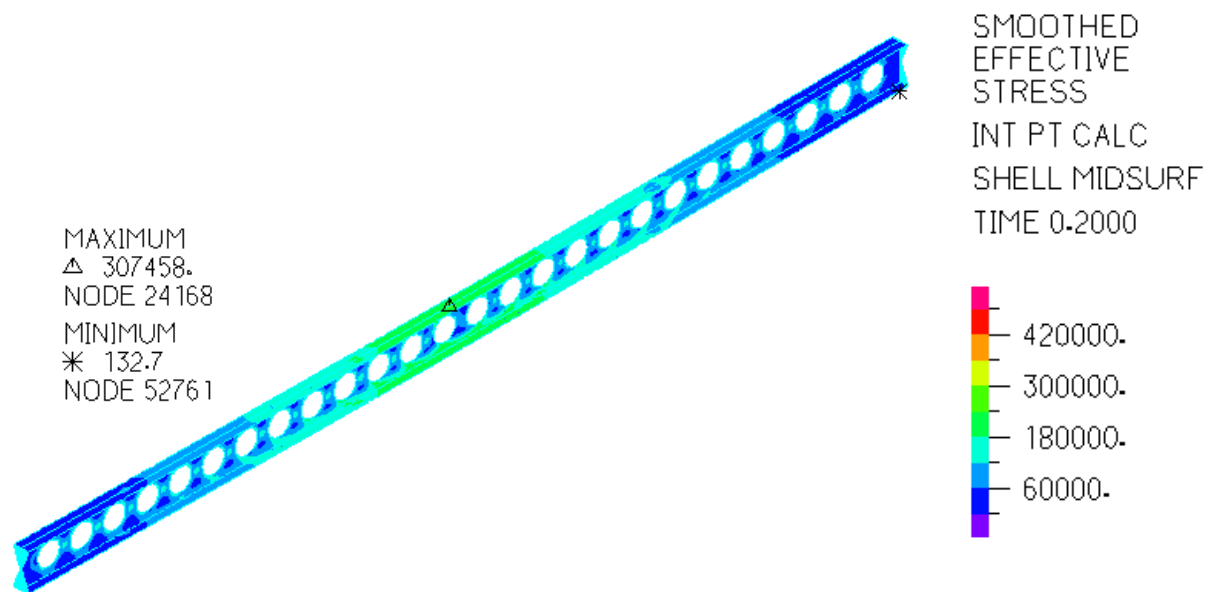
(α)



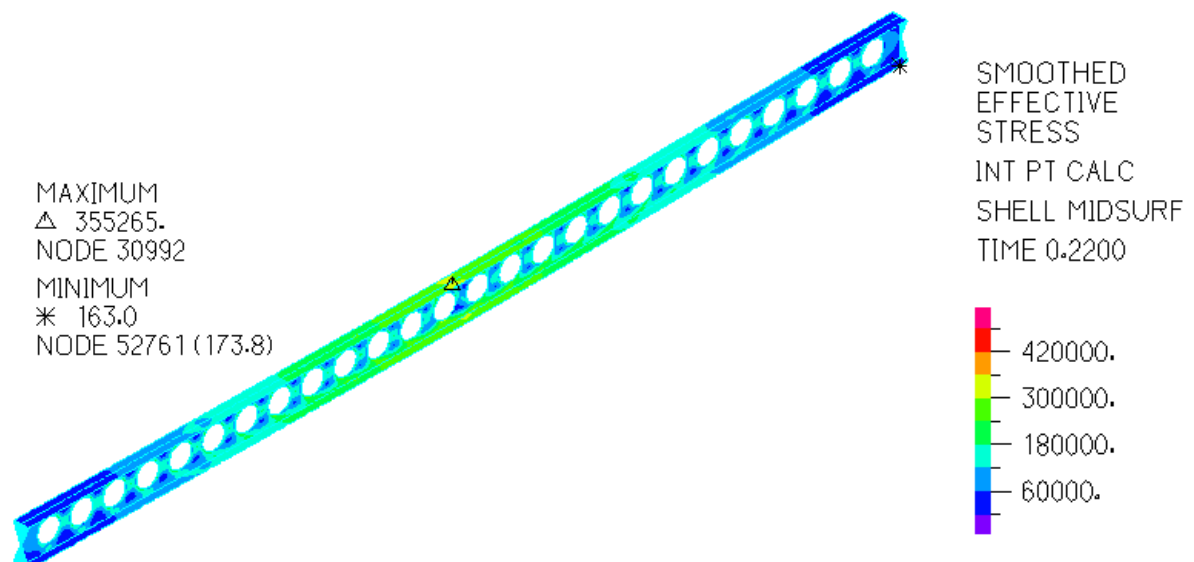
(β)

Σχήμα 8-28: Δρόμος ισορροπίας δοκού για (α) $t_w = 4.90$ mm και (β) $t_w = 7.50$ mm

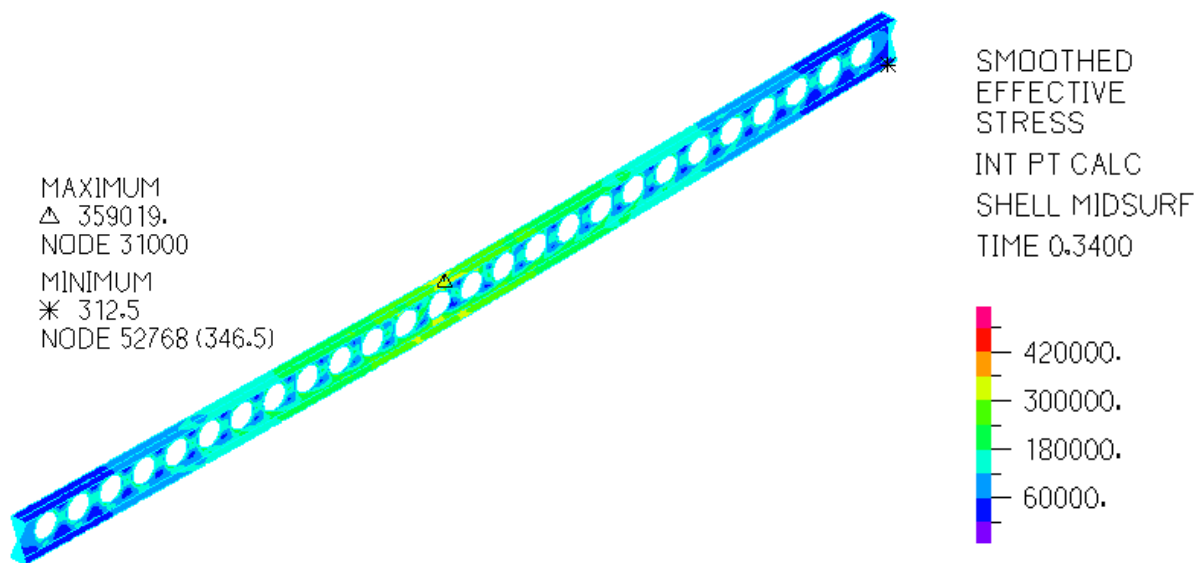
Στο σχήμα 8-28 έως το Σχήμα 8-36 απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων von Mises και των παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού σε 4 χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας, για πάχος κορμού $t_w = 4.90$ mm. Στο Σημείο A, το οποίο αντιστοιχεί στον ελαστικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας, δεν παρατηρείται υπέρβαση του ορίου διαρροής και η κατανομή των παραμορφώσεων είναι ομαλή. Λίγο πριν την 1^η διαρροή, Σημείο B, η μέγιστη τάση έχει υπερβεί το όριο διαρροής και οι παραμορφώσεις συνεχίζουν να κυμαίνονται σε μικρό εύρος τιμών. Ύστερα από την 1^η διαρροή, Σημείο Γ, και στην αστοχία, Σημείο Δ η μέγιστη τάση υπερβαίνει το όριο διαρροής στη θέση επιβολής του φορτίου και οι παραμορφώσεις αυξάνονται σταδιακά.



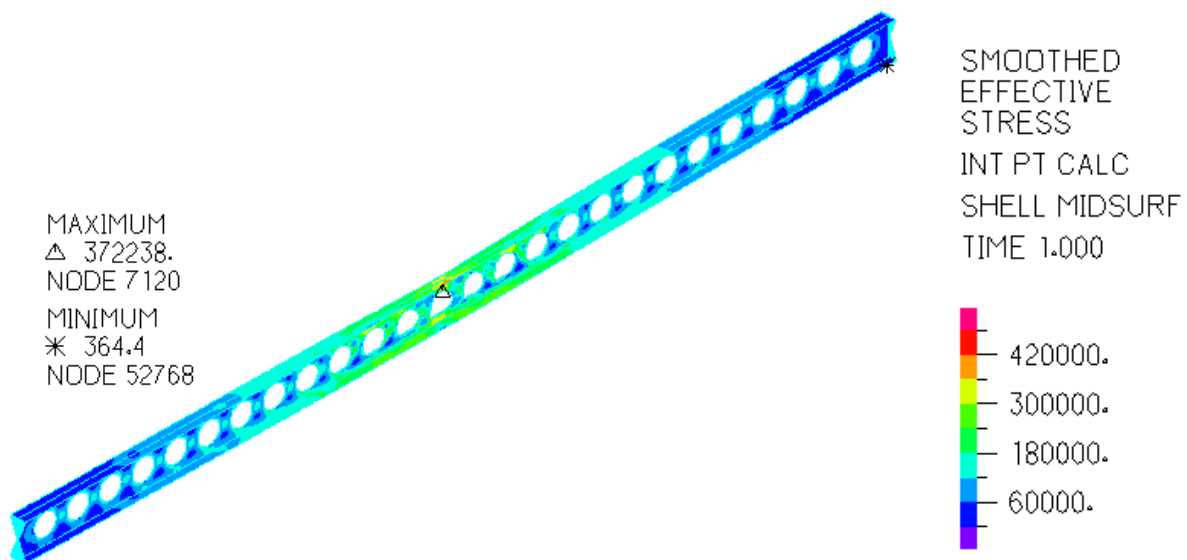
Σχήμα 8-29: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο A



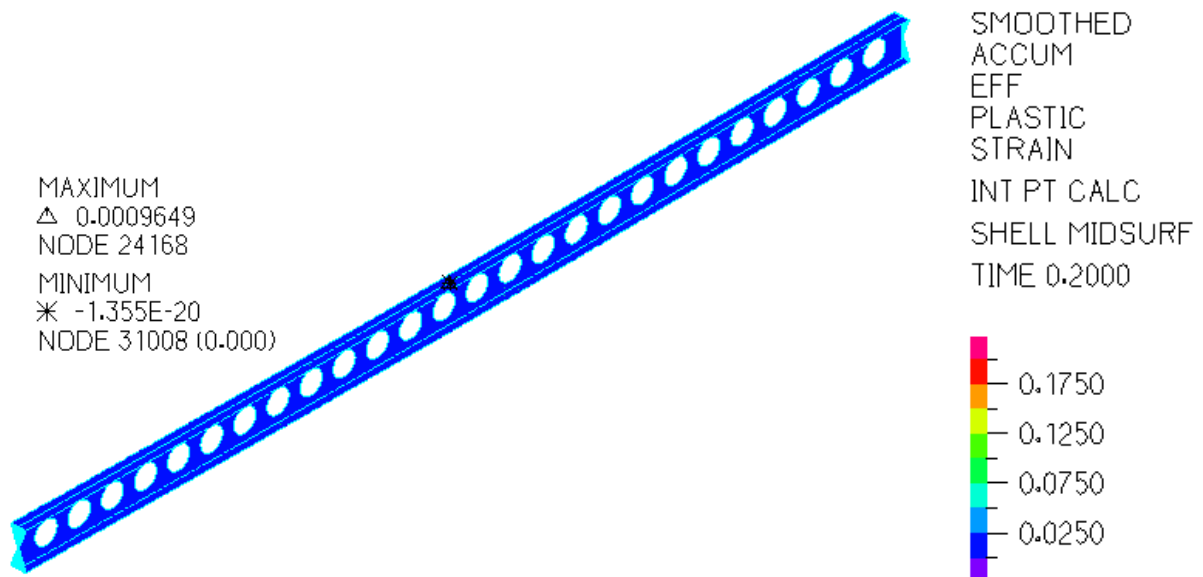
Σχήμα 8-30: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο B



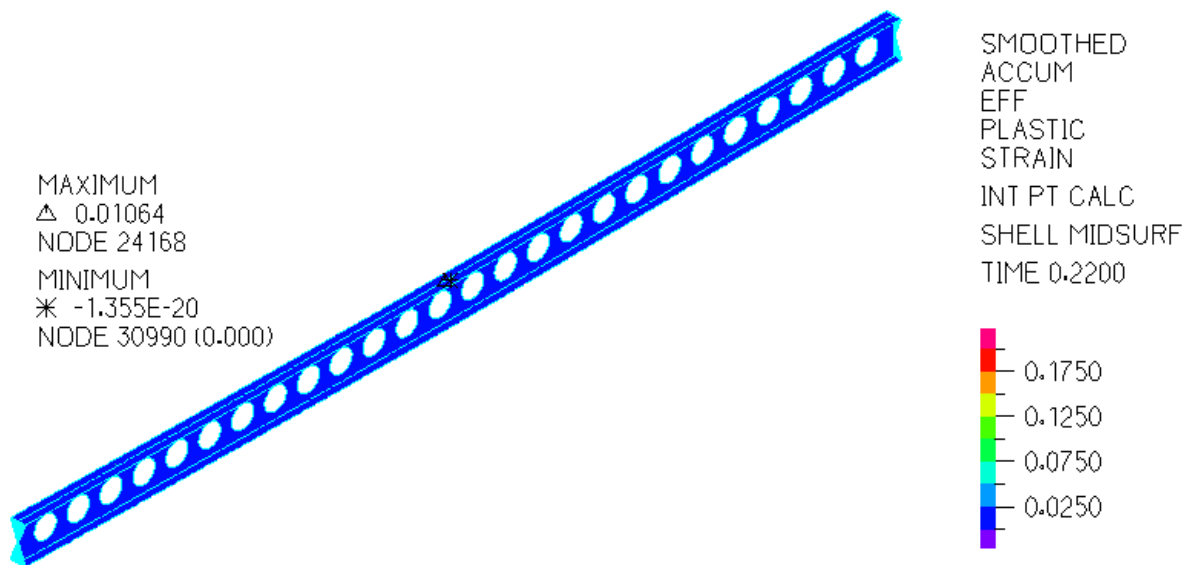
Σχήμα 8-31: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ



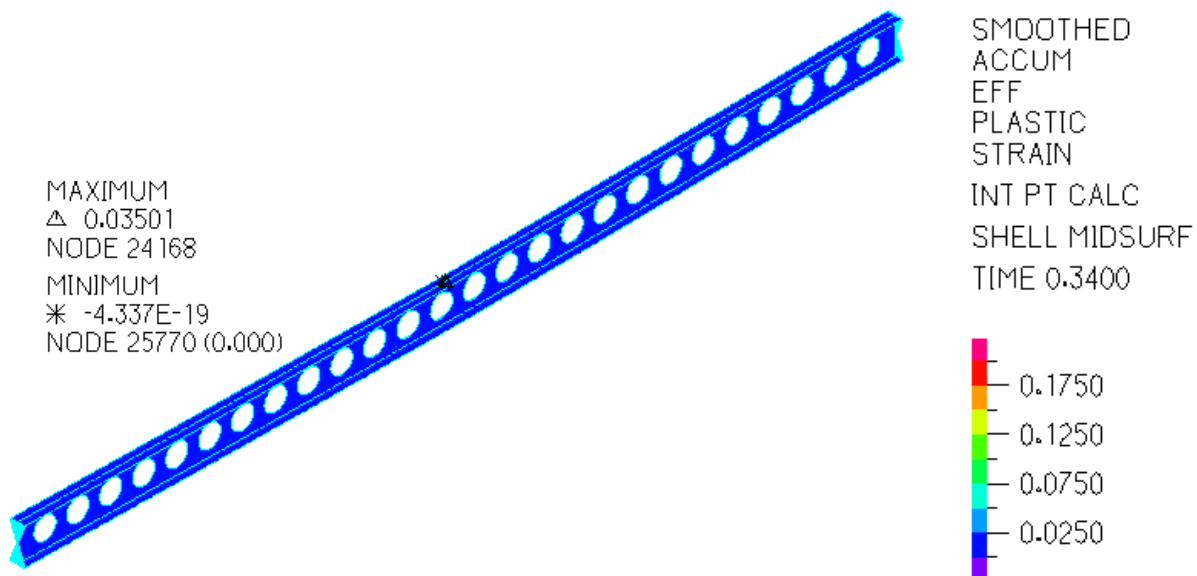
Σχήμα 8-32: Κατανομή τάσεων von Mises κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ



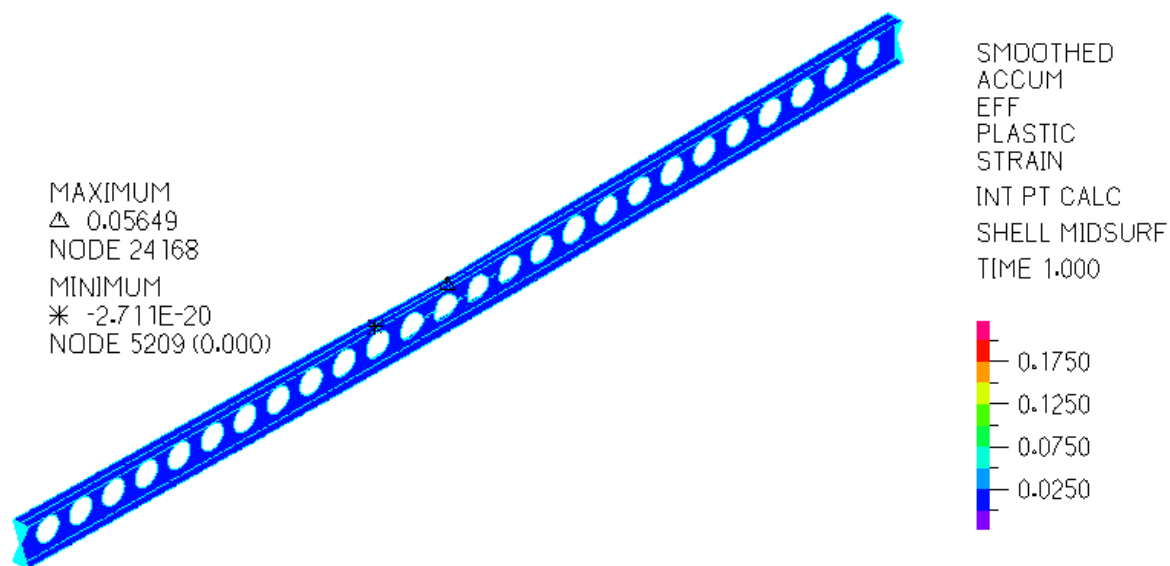
Σχήμα 8-33: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Α



Σχήμα 8-34: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Β

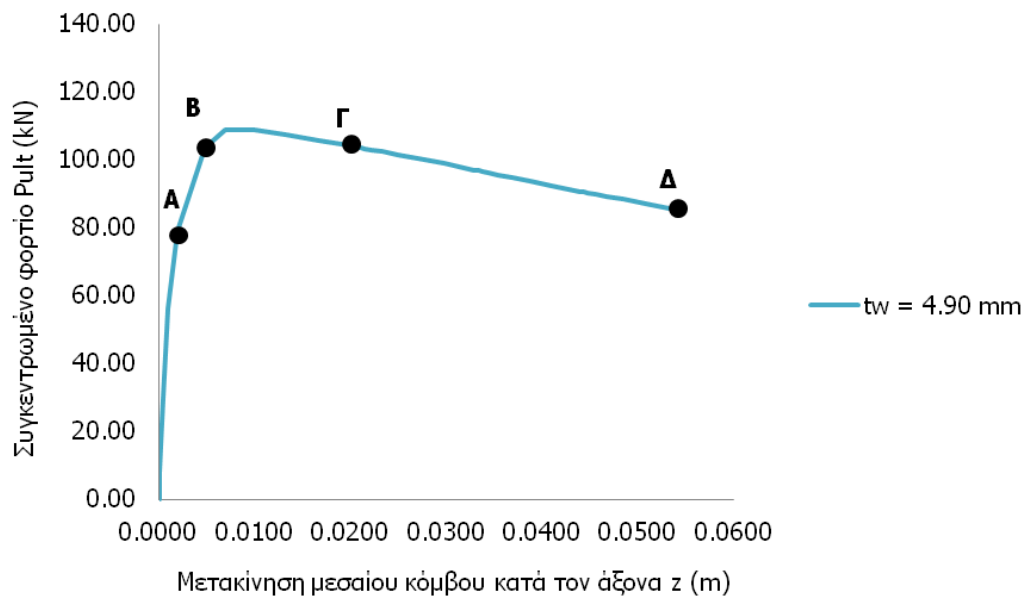


Σχήμα 8-35: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Γ

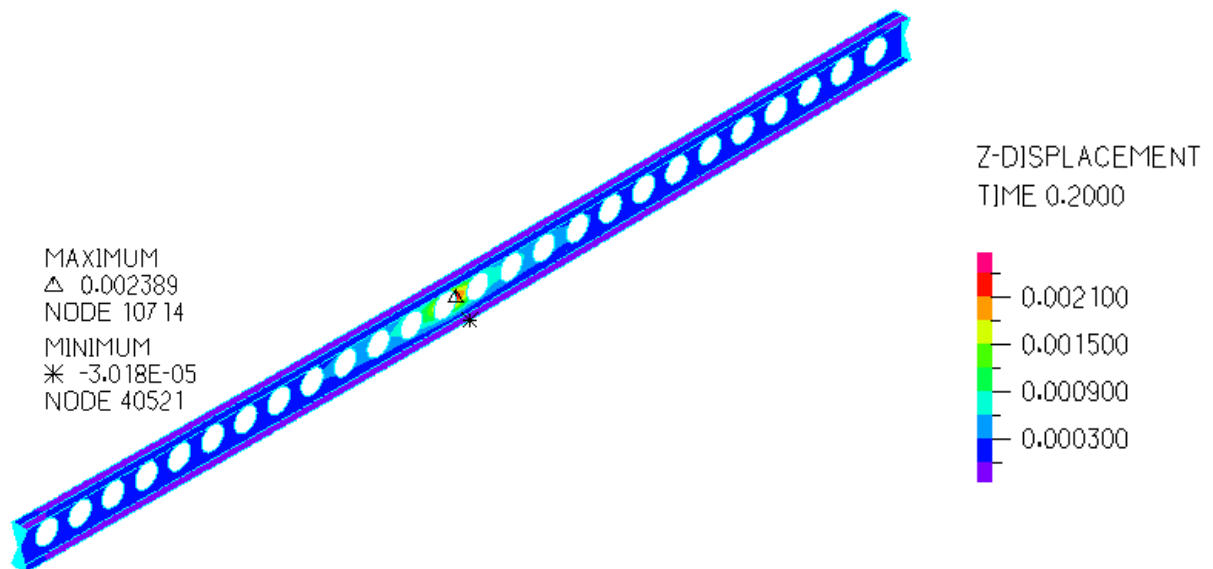


Σχήμα 8-36: Κατανομή παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού στο Σημείο Δ

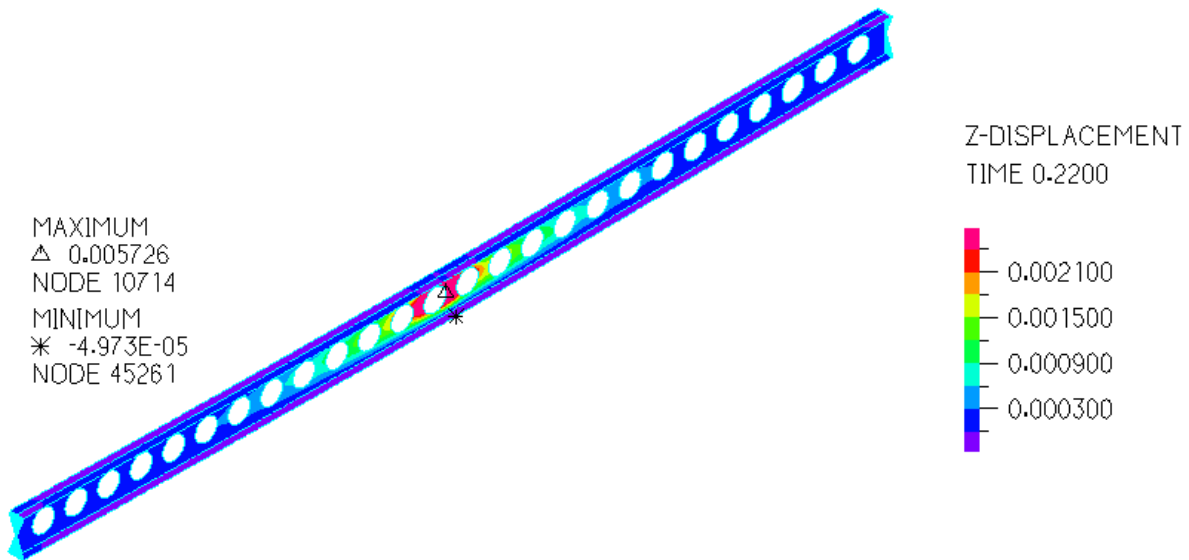
Στο Σχήμα 8-37 απεικονίζεται η μετακίνηση του μεσαίου κόμβου της δοκού με $t_w = 4.90$ mm κατά τον άξονα z συναρτήσει του συγκεντρωμένου φορτίου. Πριν τη διαρροή της δοκού παρατηρείται αλλαγή στη δυσκαμψία της η οποία οφείλεται στο λυγισμό του κορμού. Στο μέσο της δοκού εντοπίζονται αυξημένες μετατοπίσεις κατά τον άξονα z, οι οποίες υποδηλώνουν την ανάπτυξη διατμητικού λυγισμού του κορμού (Σχήμα 8-38). Αντίθετα, στη δοκό με $t_w = 7.50$ mm δεν εντοπίζονται υψηλές μετακινήσεις κατά τον άξονα z πριν τη διαρροή (Σχήμα 8-30 και Σχήμα 8-40) καθώς η δοκός λυγίζει αφού περάσει στη διαρροή (Σχήμα 8-41). Συνεπώς, το μειωμένο πάχος του κορμού αλλάζει τον τρόπο αστοχίας και κρίσιμη μορφή είναι ο διατμητικός λυγισμός του κορμού.



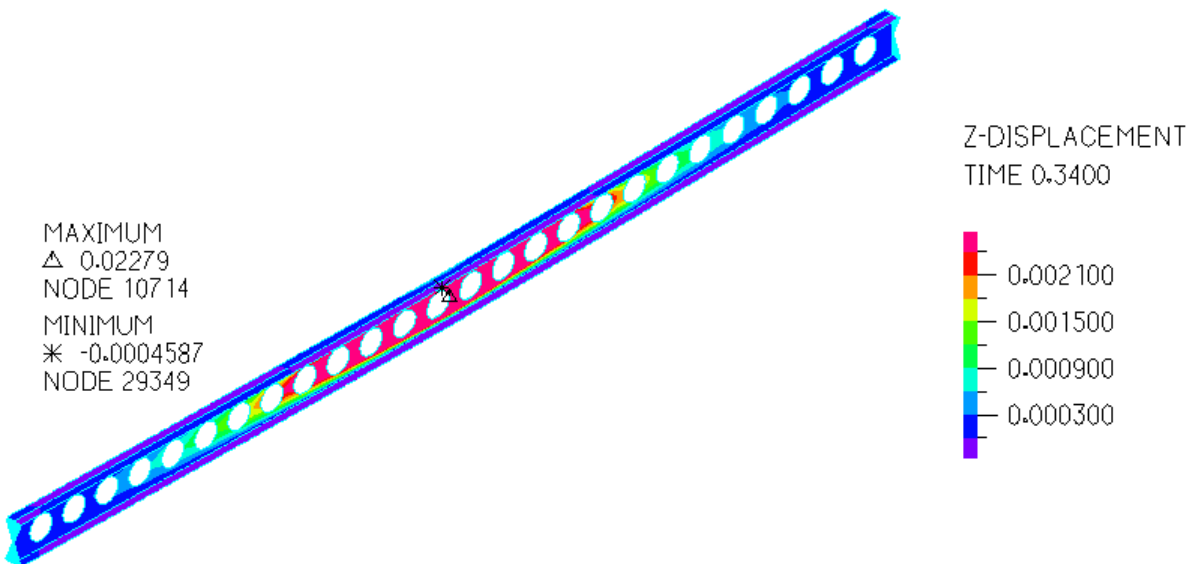
Σχήμα 8-37: Δρόμος ισορροπίας δοκού για μετακίνηση στον άξονα z με $t_w = 4.90$ mm



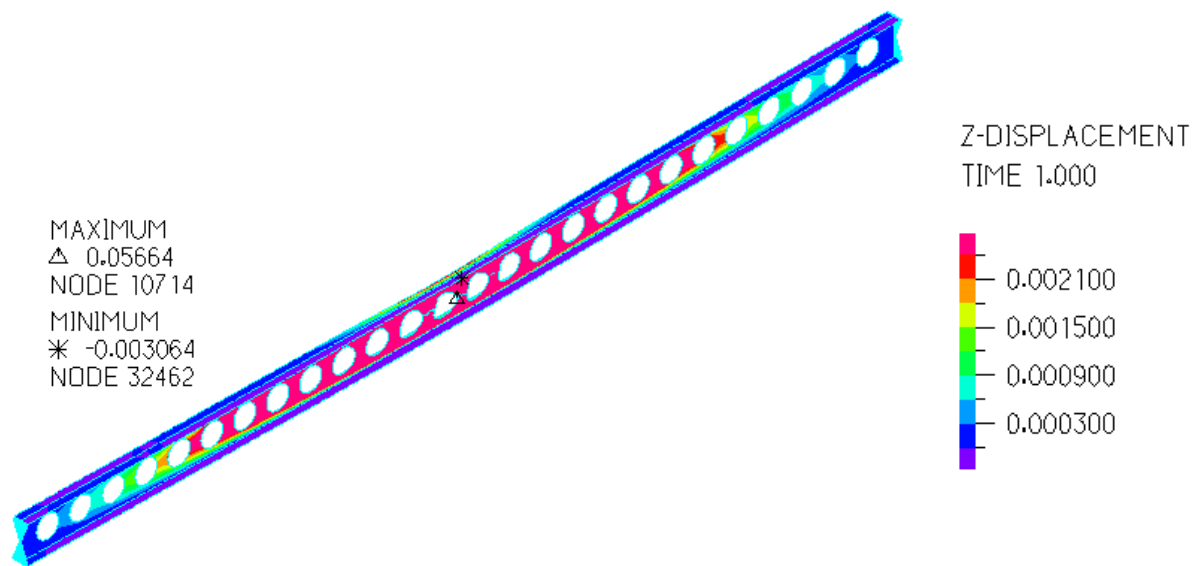
Σχήμα 8-38: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο A για $t_w = 4.90$ mm



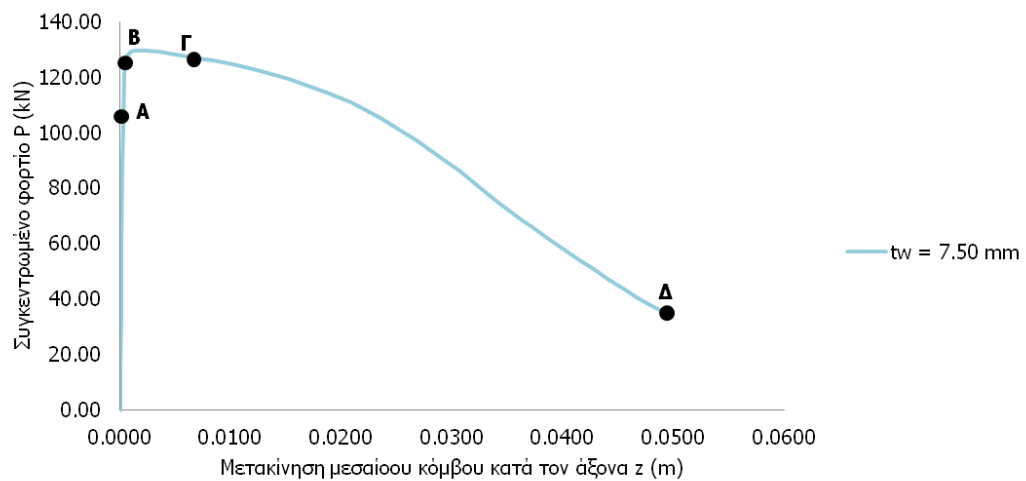
Σχήμα 8-39: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο Β για $t_w = 4.90$ mm



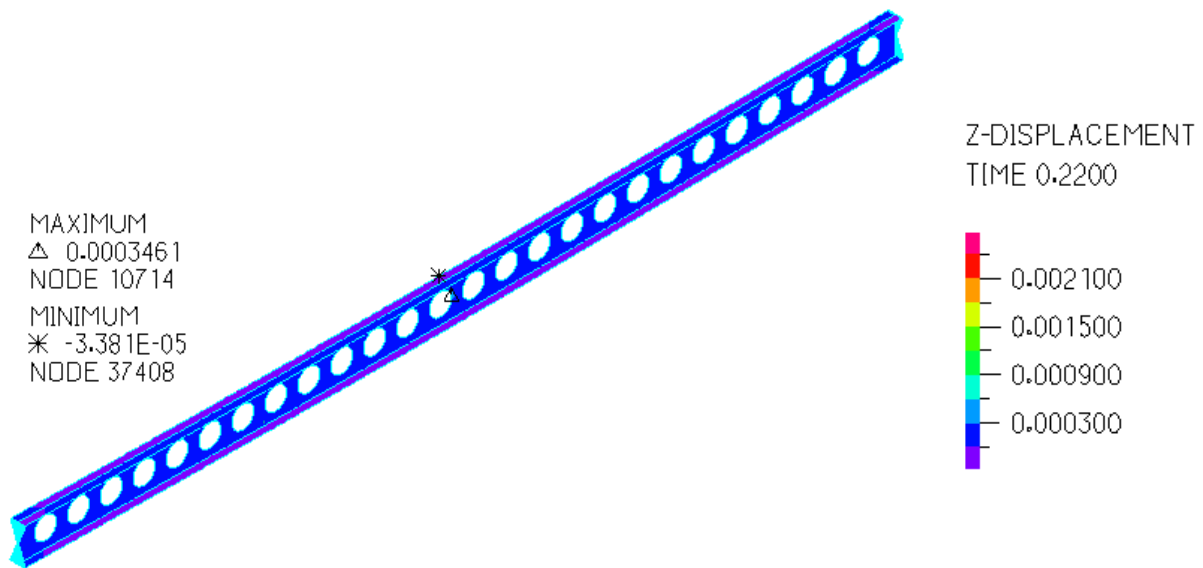
Σχήμα 8-40: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο Γ για $t_w = 4.90$ mm



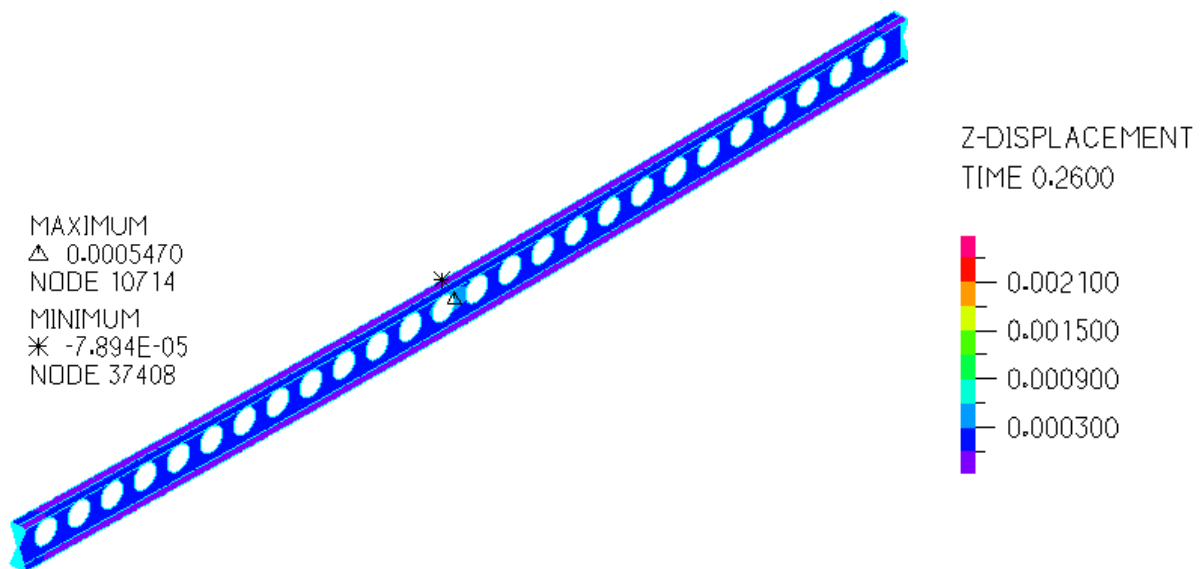
Σχήμα 8-41: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο Δ για $t_w = 4.90$ mm



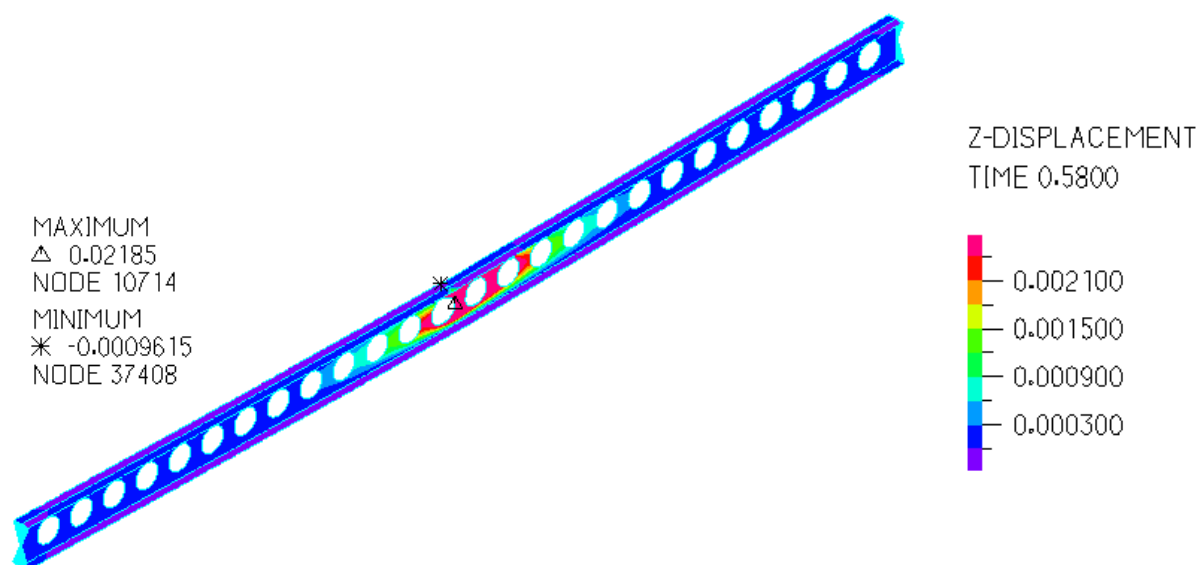
Σχήμα 8-42: Δρόμος ισορροπίας δοκού για μετακίνηση στον άξονα z με $t_w = 7.50$ mm



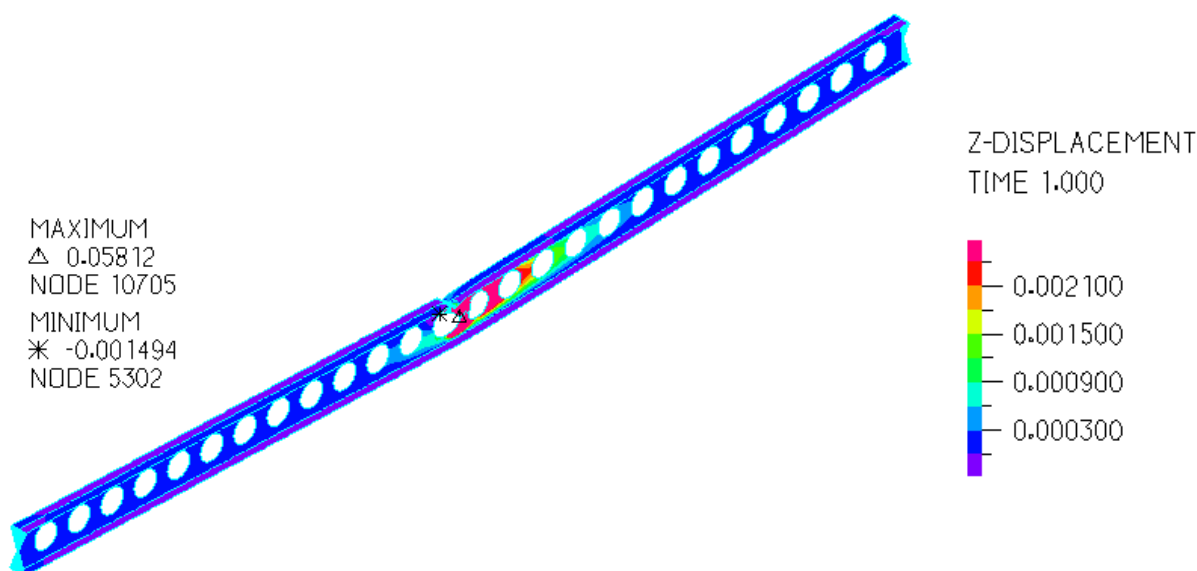
Σχήμα 8-43: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο A για $t_w = 7.50$ mm



Σχήμα 8-44: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο B για $t_w = 7.50$ mm

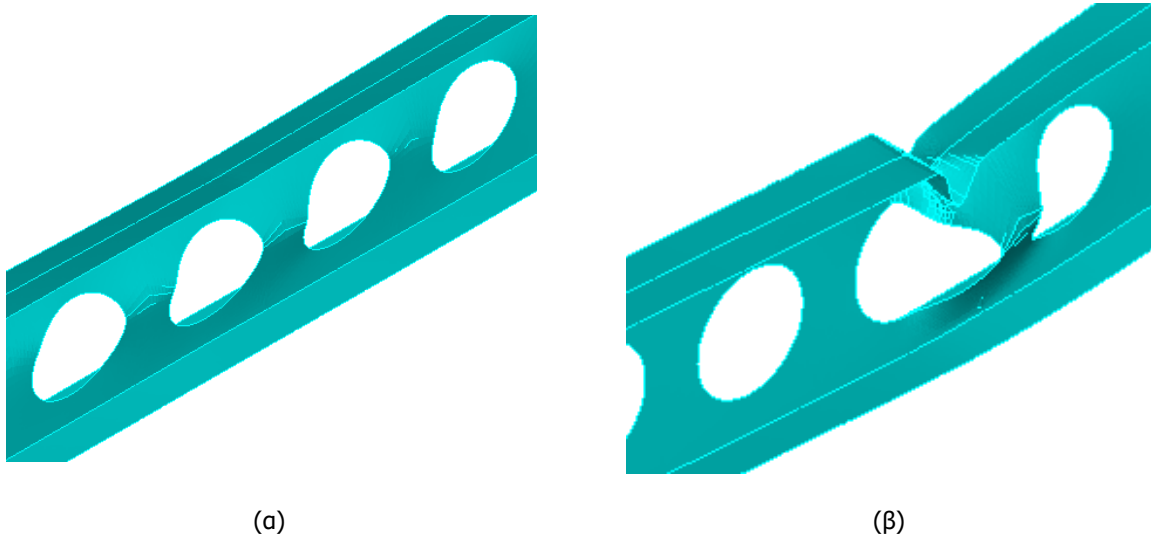


Σχήμα 8-45: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο Γ για $t_w = 7.50$ mm



Σχήμα 8-46: Μετακινήσεις δοκού κατά τον άξονα z στο Σημείο Δ για $t_w = 7.50$ mm

Στο σχήμα 8-47 (α) και (β) απεικονίζεται η παραμορφωμένη εικόνα της δοκού για $t_w = 4.90$ mm και $t_w = 7.50$ mm στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχήμα 8-47: Παραμορφωμένη εικόνα στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για (α) $t_w = 4.90$ mm και (β) $t_w = 7.50$ mm

9 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την κανονιστική και αριθμητική διερεύνηση χαλύβδινων δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Η δημιουργία διακένων κορμού εισάγει νέους τρόπους αστοχίας της δοκού και αναπτύσσονται πρόσθετα βέλη κάμψης. Ο έλεγχος δοκών με διάκενα κορμού σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του EN1993-1-13 αποτελεί μία νέα προτεινόμενη μέθοδο για την πρόληψη ενδεχομένων αστοχιών και διερευνάται η εγκυρότητα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή στη χρήση δοκών με διάκενα κορμού και περιγράφονται οι μέθοδοι κατασκευής που χρησιμοποιούνται, ενώ παρουσιάζεται η δυνατότητα δημιουργίας δοκών με διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους και καμπυλωμένης γεωμετρίας. Ακολούθως, παρατίθενται παραδείγματα χρήσης δοκών με διάκενα κορμού και τονίζονται τα πλεονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά δοκών με διάκενα κορμού και η προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης τους ως μία ισοδύναμη δοκός Vierendeel. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι μορφές αστοχίας των δοκών και τονίζεται η σημασία σωστού σχεδιασμού και ελέγχου για τη διαφύλαξη της ακεραιότητάς τους. Παρατίθενται γενικοί κανόνες σχεδιασμού δοκών με διάκενα κορμού και πιο αναλυτικά για κυκλικά και ορθογωνικά διάκενα. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους λόγους που οδηγούν στην ανάγκη ενίσχυσης των διακένων και παρατίθενται βασικοί κανόνες σχεδιασμού που προέκυψαν ύστερα από μελέτες.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του προσχεδίου του EN1993-1-13 που αναφέρεται στο σχεδιασμό δοκών με διάκενα κορμού. Αρχικά γίνεται αναφορά στο πεδίο εφαρμογής των κανονισμών και στους ορισμούς που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δοκών. Ακολούθως παρατίθενται οι γεωμετρικοί περιορισμοί δοκών με διάκενα κορμού και οι κανονισμοί για την κατηγοριοποίηση των διατομών. Περιγράφεται αναλυτικά ο υπολογισμός της αντοχής δοκών με διάκενα κορμού, μεμονωμένα ή πολλαπλά, στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και ο έλεγχος στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Με βάση το παραπάνω προσχέδιο γίνεται η επίλυση ενός παραδείγματος δοκού με διάκενα κορμού και σχεδιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνεται αριθμητικά η δοκός και διερευνάται ο

κατάλληλος τύπος μη γραμμικής ανάλυσης που θα υιοθετηθεί και το μέγεθος της αρχικής ατέλειας που εισάγεται. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ως προς το οριακό φορτίο της δοκού και το συνολικό βέλος που αναπτύσσεται. Με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών της δοκού εξετάζεται η δυνατότητα ανάπτυξης της πλαστικής και ελαστικής ροπής αντοχής και διερευνάται η αποτελεσματικότητα των κανονισμών ως προς την κατηγοριοποίηση της δοκού.

Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης μέσω μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού με αρχικές ατέλειες. Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της διαμέτρου (h_0) στην απόκριση της δοκού και συγκρίνεται με την απόκριση της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού, ενώ στο έκτο κεφάλαιο η επιρροή της απόστασης μεταξύ των κέντρων γειτονικών διακένων (s). Σε κάθε κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της αντίστοιχης παραμέτρου. Ακολούθως τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων. Στο τέλος του έκτου κεφαλαίου συγκρίνεται η επιρροή της διαμέτρου και της αποστάσεως των κέντρων γειτονικών διακένων μέσω του λόγου a στην απόκριση της δοκού.

Στο έβδομο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή του πάχους του κορμού στην απόκριση δοκών με διάκενα κορμού. Το πάχος του κορμού καθορίζει τη λυγηρότητά του και κατά συνέπεια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τοπική ευστάθεια της δοκού. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ως προς τη μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει του πάχους κορμού και τη μορφή αστοχίας.

Στο όγδοο κεφάλαιο εξετάζεται η επιρροή της θέσης επιβολής συγκεντρωμένου φορτίου σε δοκό με κυκλικά διάκενα κορμού. Οι κανονιστικές διατάξεις δεν αναφέρουν κάποιο κανόνα για τη θέση επιβολής του φορτίου και την αναμενόμενη αστοχία. Για το λόγο αυτό υιοθετείται ένας γενικός κανόνας που αναφέρεται σε ορθογωνικά διάκενα κορμού που προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα. Ακολούθως διερευνάται η επιρροή του πάχους κορμού στη μορφή αστοχίας δοκού με διάκενα κορμού που καταπονείται από συγκεντρωμένο φορτίο. Τέλος, στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της απόκρισης των δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού.

9.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση δοκών με διάκενα κορμού είναι ευρέως διαδεδομένη στις μεταλλικές κατασκευές. Η δημιουργία των διακένων εισάγει καινούργιες μορφές αστοχίας για τις οποίες πρέπει να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός και έλεγχος. Μία δοκός με διάκενα κορμού ελέγχεται σε αστοχία από καθολική κάμψη, κατακόρυφη διάτμηση, τοπική κάμψη *Vierendeel*, οριζόντια διάτμηση και λυγισμό των συμπαγών τμημάτων του κορμού, στρεπτοκαμπτικό λυγισμό της δοκού και θραύση του συγκολλημένου τμήματος.

Ο κατάλληλος τύπος αναλύσεων που υιοθετείται για την αριθμητική ανάλυση του προβλήματος είναι μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GMNIA). Το μέγεθος της αρχικής ατέλειας δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση της δοκού. Τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ταυτίζονται οριακά με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και η δοκός αστοχεί από ελαστοπλαστικό λυγισμό του πέλματος λόγω διαρροής από κάμψη, όπως αναμένεται από τον έλεγχο της δοκού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13. Η δοκός αναπτύσσει την πλαστική αντοχή της και σωστά κατατάσσεται ως Κατηγορία 2.

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση μίας δοκού με κυκλικά διάκενα κορμού είναι η διάμετρος (h_0) των διακένων, η απόσταση (s) των κέντρων γειτονικών διακένων και το πάχος κορμού (t_w). Στο κεφάλαιο 5 διερευνάται η επιρροή της διαμέτρου στη μηχανική συμπεριφορά των δοκών και

εξετάζονται 10 περιπτώσεις. Τα βασικότερα συμπεράσματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου συνοψίζονται ως εξής:

- Η αύξηση της διαμέτρου των διακένων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του οριακού φορτίου καθώς μειώνεται το εμβαδόν του συμπαγούς τμήματος του κορμού και η δοκός αστοχεί γρηγορότερα. Όσο αυξάνεται η διάμετρος η δοκός παύει να αστοχεί καμπτικά και η κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο διατμητικός λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού.
- Οι μέγιστες τάσεις Von-Mises υπερβαίνουν το όριο διαρροής του χάλυβα και παρατηρείται μείωση τους με την αύξηση της διαμέτρου, καθώς η μείωση του εμβαδού του συμπαγούς τμήματος του κορμού οδηγεί σε γρηγορότερη αστοχία που δεν οφείλεται στον ελαστοπλαστικό λυγισμό λόγω διαρροής από κάμψη. Στις περιπτώσεις $h_0 = 225 \text{ mm}$ έως $h_0 = 287.50 \text{ mm}$ η μέγιστη τάση εντοπίζεται στο μέσο της δοκού, ενώ για μεγαλύτερα μεγέθη διακένων εντοπίζεται στο άκρο της δοκού.
- Η συμπαγής δοκός αστοχεί από λυγισμό λόγω διαρροής από κάμψη και εμφανίζει αυξημένη αντοχή συγκριτικά με την αντίστοιχη δοκό με διάκενα κορμού.
- Με την αύξηση της διαμέτρου η δοκός από Κατηγορία 2 κατατάσσεται ως Κατηγορία 3 σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος διατμητικού λυγισμού.
- Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων ταυτίζονται οριακά με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων. Το προσχέδιο του EN1993-1-13 προτείνει ο σχεδιασμός δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού να γίνεται για μεγέθη διακένων $h_0 \leq 0.75 \cdot h$, ενώ από τις αριθμητικές αναλύσεις προτείνεται ο σχεδιασμός να γίνεται για $h_0 \leq 0.70 \cdot h$.

Στο κεφάλαιο 6 μελετάται η επιρροή της απόστασης s των κέντρων γειτονικών διακένων. Η παράμετρος s διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των δοκών αφού επηρεάζει την επιφάνεια του συμπαγούς τμήματος του κορμού και τον αριθμό των διακένων. Η παραμετρική διερεύνηση του συγκεκριμένου κεφαλαίου οδήγησε στα εξής συμπεράσματα:

- Η μείωση της αποστάσεως s έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του οριακού φορτίου της δοκού και συγκεκριμένα για τιμές $s = 300 \text{ mm}$ και έπειτα η αντοχή της είναι ιδιαίτερα μειωμένη.
- Με την αύξηση της αποστάσεως s μειώνεται ο αριθμός των διακένων κατά μήκος της δοκού, ενώ δεν επηρεάζει την κατηγοριοποίηση της.
- Η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων για $s = 290 \text{ mm}$ και $s = 300 \text{ mm}$ εντοπίζεται στο άκρο της δοκού και η μέγιστη τιμή δεν υπερβαίνει έντονα το όριο διαρροής. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η υπέρβαση είναι πιο έντονη και η μέγιστη συγκέντρωση εντοπίζεται στο μέσο της δοκού.
- Στην περίπτωση $s = 357.25 \text{ mm}$ σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις η δοκός αστοχεί από διάτμηση στο ακραίο συμπαγές τμήμα του κορμού λόγω της μείωσης του εμβαδού του. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις η μείωση της επιφάνειας του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού δεν διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αστοχία της δοκού, η οποία τελικά αστοχεί λόγω ελαστοπλαστικού λυγισμού των πελμάτων στο μέσο της.
- Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων ταυτίζονται οριακά με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων και προτείνεται η αποφυγή σχεδιασμού δοκών για απόσταση κέντρων διακένων $s \leq 0.75 \cdot h$.
- Σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις ο σχεδιασμός δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση $1.08 \leq a \leq 1.50$. Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η απόκριση της δοκού μειώνεται για $a \leq 1.25$.

- Η επιρροή της διαμέτρου του διάκενου διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στην απόκριση της δοκού συγκριτικά με την επιρροή της απόστασης των κέντρων γειτονικών διακένων.

Στο κεφάλαιο 7 εξετάζονται 8 περιπτώσεις του πάχους κορμού t_w και τα βασικότερα συμπεράσματα επιρροής της λυγηρότητας του κορμού στην απόκριση της δοκού συνοψίζονται ως εξής:

- Η μείωση του πάχους του κορμού έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του οριακού φορτίου καθώς όσο αυξάνεται η λυγηρότητά του τόσο η αστοχία από τοπική αστάθεια γίνεται κρίσιμη.
- Η αύξηση της λυγηρότητας του κορμού οδηγεί σε μειωμένη δυνατότητα ανάπτυξης παραμορφώσεων και η μέγιστη τιμή τους δεν εντοπίζεται πλέον στο μέσο της δοκού αλλά στα άκρα της.
- Τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ταυτίζονται οριακά με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, με εξαίρεση την πρόβλεψη της αναμενόμενης αστοχίας. Το προσχέδιο του EN1993-1-13 θεωρεί πως οι δοκοί με $t_w \leq 5.30$ mm αστοχούν λόγω διατμητικού λυγισμού του συμπαγούς τμήματος του κορμού, ενώ στην πραγματικότητα η αστοχία αυτή παρατηρείται για $t_w \leq 4.90$ mm και στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι δοκοί αστοχούν καμπτικά.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 μελετώνται 5 περιπτώσεις θέσης επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου όπου οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Η θέση επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση των δοκών.
- Η επιβολή συγκεντρωμένου φορτίου σε δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή συγκέντρωση τάσεων και ανάπτυξης μεγάλων παραμορφώσεων στη θέση επιβολής του φορτίου.
- Η αύξηση Κατηγορίας της διατομής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του οριακού φορτίου και αλλαγή στο μηχανισμό αστοχίας. Η δοκός Κατηγορίας 2 αστοχεί από διαρροή του υλικού και στη συνέχεια παρατηρείται λυγισμός της διατομής, ενώ η δοκός Κατηγορίας 3 αστοχεί από διατμητικό λυγισμό του κορμού.

9.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας περί την απόκριση δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού με βάση τις παραμετρικές αναλύσεις είναι ικανοποιητικά, καθώς οδηγούν σε συμπεράσματα για το σωστό σχεδιασμό των δοκών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση επιρροής της ταυτόχρονης μεταβολής της διαμέτρου h_o και της αποστάσεως s ώστε η απόσταση των άκρων γειτονικών διακένων ($s_o = s - h_o$) να διατηρείται σταθερή. Στη διερεύνηση αυτή η επιφάνεια του συμπαγούς τμήματος του κορμού θα είναι κοινή για όλες τις περιπτώσεις με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορετικών μορφών αστοχίας, όπως κάμψη των διατομών T . Επιπλέον, το προσχέδιο του EN1993-1-13 προτείνει ο σχεδιασμός δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού να ικανοποιεί τη σχέση $s_o \geq 0.10 \cdot h_o$ και θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η μελέτη επαλήθευσης αυτού του κανόνα με αριθμητικές αναλύσεις.

Στις κανονιστικές διατάξεις δεν γίνεται αναφορά για το γεωμετρικό περιορισμό του πλάτους της επιφάνειας του ακραίου συμπαγούς τμήματος του κορμού s_e στην περίπτωση δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Η διερεύνηση της επιρροής απαιτεί τη μελέτη ακραίων περιπτώσεων αποστάσεων s_e όταν τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (h_o , s και s_e) βρίσκονται εντός των κανονισμών. Η μείωση της αποστάσεως s_e αναμένεται να οδηγήσει σε αστοχία της δοκού από διάτμηση στο ακραίο συμπαγές τμήμα της και όχι πλέον από καμπτική αστοχία στο μέσο της.

Τέλος, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η κανονιστική και αριθμητική διερεύνηση της απόκρισης δοκών με ορθογωνικά διάκενα κορμού. Το προσχέδιο του EN1993-1-13 περιγράφει τη μέθοδο ελέγχου και

ανάλυσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για δοκούς με ορθογωνικά διάκενα κορμού και θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν οι αντίστοιχες μη γραμμικές αναλύσεις.

10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

10.1 Γενικά

Ο έλεγχος των δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε μέσω φύλλου excel που υπολογίζει και ελέγχει την απόκριση της δοκού. Ο μηχανικός εισάγει στο φύλλο δεδομένων, όπου γίνεται η κατηγοριοποίηση της διατομής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής και την ποιότητα του χάλυβα. Ακολούθως εισάγονται τα φορτία που ασκούνται στη δοκό και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη, με βάση τα οποία γίνεται ο έλεγχος της δοκού στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ). Ο μηχανικός μπορεί να δει συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα στο φύλλο εκτύπωσης.

10.2 Φύλλο δεδομένων

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΔΙΑΚΕΝΑ ΣΤΟΥΣ ΚΟΡΜΟΥΣ

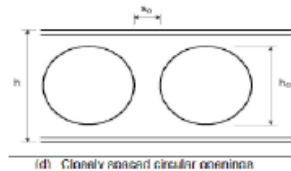
	δεδομένα (δίνονται από το χρήστη)
	δεδομένα (από κανονισμό) - ΝΑ ΕΛΕΓΧΟΝΤΑΙ
	αποτελέσματα
	έλεγχος αποτελεσμάτων

1. Υλικό δοκού με διάκενα στους κορμούς

Χάλυβας	S355		
Όριο διαρροής f_y	355000	kN/m ²	EC3 Μέρος 1-1 §3.2.3, Πιν.3.1
Όριο θραύσης f_u	510000	kN/m ²	EC3 Μέρος 1-1 §3.2.3, Πιν.3.1
Μέτρο ελαστικότητας E	210000000	kN/m ²	EC3 Μέρος 1-1 §3.2.6
ϵ	0.81		EC3 Μέρος 1-1 §5.5, Πιν.5.2α
γ_{M0}	1.00		EC3 Μέρος 1-1 §3.2.6
γ_{M1}	1.00		EC3 Μέρος 1-1 §3.2.6

2. Διατομή με διάκενα στους κορμούς

Είδος διατομής	IPE		
Διατομή	IPE330		
Συνολικό ύψος διατομής h	419.80	mm	
Ύψος κορμού διατομής h_w	306.80	mm	
Πλάτος διατομής b	160.00	mm	
Πάχος κορμού t_w	7.50	mm	
Πάχος πέλματος t_f	11.50	mm	
Διάμετρος οπής h_o	250.00	mm	
Απόσταση κέντρων γειτονικών οπών s	375.00	mm	
Απόσταση web-post s_o	125.00	mm	EC 3 Μέρος 1-13 §1
Λυγηρότητα web-post α	1.50		EC 3 Μέρος 1-13 §1
Απόσταση end web-posts $s_{e,l}=s_{e,r}$	187.50	mm	
Ροπή αδράνειας κατά y I_y	20295.00	cm ⁴	
Ροπή αδράνειας κατά z I_z	788.00	cm ⁴	
Ακτίνα συναρμογής r	18.00	mm	
Εμβαδόν διατομής A	6934.00	mm ²	
Ύψος ισοδύναμης ορθογωνικής διατομής h_{eq}	225.00	mm	EC 3 Μέρος 1-13 §3.1, Πίν.3.1
Μήκος ισοδύναμης ορθογωνικής διατομής l_e	112.50	mm	EC 3 Μέρος 1-13 §3.1, Πίν.3.1
Εμβαδόν διατομών T A_T	2623.25	mm ²	
Εμβαδόν διατομών T για πλαστική διατμητική αντοχή $A_{T,pl}$	2529.50	mm ²	
Ύψος διατομής T h_T	97.40	mm	
Ύψος κορμού διατομής T $h_{w,T}$	85.90	mm	
Εμβαδόν κορμού διατομής T $A_{w,T}$	644.25	mm ²	
Εμβαδόν πέλματος A_f	1840.00	mm ²	
Ύψος ουδέτερου ελαστικού άξονα της διατομής T από την εξωτερική ίνα του πέλματος z_{el}	17.41	mm	
Ύψος επιρροής μεταξύ των κέντρων των διατομών T h_{eff}	384.99	mm	
Μήκος επιρροής για κατηγοριοποίηση του κορμού της διατομής T $l_{o,eff}$	175.00	mm	EC 3 Μέρος 1-13 §4.1.1
Εμβαδόν διάτμησης A_v	939.63	mm ²	EC3 Μέρος 1-1 §6.2.6
Πλαστικός ουδέτερος άξονας της διατομής T από την εξωτερική ίνα του πέλματος z_{pl}	7.76	mm	



3. Κατάταξη διατομής δοκού με διάκενα στους κορμούς

A. Κατάταξη κορμού

EC3 Μέρος 1-13 §4.1.1

A1. Κατάταξη άνω διατομής T κορμού

$$l_{o,eff} = \begin{matrix} 175 \\ 2 \end{matrix} \text{ mm}$$

Κατηγορία άνω διατομής T κορμού

A2. Κατάταξη κάτω διατομής T κορμού

$$N_{Ed}/(A_{web} \cdot f_{yd}) = \begin{matrix} 2.12 \\ 2 \end{matrix}$$

Κατηγορία άνω διατομής T κορμού

B. Κατάταξη πέλματος

EC3 Μέρος 1-1 §5.5, Πιν.5.2β

$$c/t_f = \begin{matrix} 5.07 \\ 1 \end{matrix}$$

Κατηγορία πέλματος

B. Κατάταξη διατομής

Κατηγορία διατομής 2 OK

(το excel είναι στημένο για κατηγορία διατομής 1 ή 2)

10.3 Φύλλο εκτύπωσης

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΣΤΟΥΣ ΚΟΡΜΟΥΣ ΕΛΑΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Διαστασιολόγηση σύμφωνα με τα EN1993-1-1, EN1993-1-13

1. Δοκός με κυκλικά διάκενα στους κορμούς

Υλικό	S355	Απόσταση end web-post s_e	187.50	mm
Διατομή	IPE330	Εμβαδόν διατομής A	6934.00	mm ²
Συνολικό ύψος διατομής h	419.80	mm	Ροπή αδράνειας I_y	20295.00
Πλάτος διατομής b	160.00	mm	Ροπή αδράνειας I_z	788.00
Πάχος κορμού t_w	7.50	mm	Υψος διατομής T h_T	97.40
Πάχος πέλματος t_f	11.50	mm	Εμβαδόν διατομής T A_T	2623.25
Ακτίνα συναρμής r	18.00	mm	Τίδιο βάρος G_0	0.46
Διάμετρος οπής h_0	250.00	mm	Κατηγορία διατομής	2
Απόσταση κέντρων γεπονικών οπών s	375.00	mm	Στατικό σύστημα	αμφιέριστο
Απόσταση web-post s_0	125.00	mm	Μήκος ανοίγματος L	10
				m

2. Συντελεστές

$$\gamma_{M0} = \begin{matrix} 1.00 \\ 1.00 \end{matrix} \quad \gamma_{G0} = \begin{matrix} 1.35 \\ 1.50 \end{matrix}$$

3. Δράσεις

Κατακόρυφα Φορτία	Τίδιο βάρος δοκού (kN/m)	G_0	0.46
	Λοιπά μόνιμα φορτία (kN/m)	G	0
	Κινητά φορτία δοκού (kN/m)	Q	10.00
Συνδυασμοί Φόρτισης	U1	$\gamma_{G0} \cdot G + \gamma_{Q0} \cdot Q$	15.62

4. Εντατικά Μεγέθη

Συνδυασμός Φόρτισης 1	Μέγιστη Ροπή M_y	195.26	kNm
	Μέγιστη Τέμνουσα V_y	78.11	kN
	Άξονική Δύναμη N	485.25	kN

5. Έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)

Α. Έλεγχος δοκού σε ροπή κάμψης

Δράση $N_{b,T,Ed}$	485.25	kN
Αντοχή $N_{b,T,Rd}$	931.25	kN
$N_{b,T,Ed}/N_{b,T,Rd}$	0.52	
Έλεγχος	OK	

Β. Έλεγχος κορμού σε διάτμηση

Δράση V_{Ed}	78.11	kN
Αντοχή V_{Rd}	385.17	kN
V_{Ed}/V_{Rd}	0.20	
Έλεγχος	OK	

Γ. Έλεγχος σε κάμψη των διατομών T

Δράση $V_{Ed} \cdot l_e$	8.79	kNm
Αντοχή $2 \cdot M_{bT,N,Rd} + 2 \cdot M_{cT,N,Rd}$	44.20	kNm
$V_{Ed} \cdot l_e / (2 \cdot M_{bT,N,Rd} + 2 \cdot M_{cT,N,Rd})$	0.20	
Έλεγχος	OK	

Δ. Έλεγχος των web-posts

Δ1. Έλεγχος των web-posts σε ροπή κάμψης

Δράση $M_{wp,Ed}$	0	kNm
Αντοχή $M_{wp,Rd}$	6.93	kNm
$M_{wp,Ed}/M_{wp,Rd}$	0.00	
Έλεγχος	OK	

Δ2. Έλεγχος των web-posts σε διάτμηση

Δράση $V_{wp,Ed}$	68.47	kN
-------------------	-------	----

Δ3. Έλεγχος των web-posts σε λυγισμό

Ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$	0.85	
Καμπύλη λυγισμού	b	
Μειωτικός συντ. χ_{wp}	0.69	
Θλιπτική τάση $\sigma_{wp,Ed}$	73035.40	kN/m ²
Θλιπτ. τάση αντοχής $\sigma_{b,wp,Rd}$	245240.50	kN/m ²
$\sigma_{wp,Ed}/\sigma_{b,wp,Rd}$	0.30	
Έλεγχος	OK	

Δ4. Έλεγχος των end web-posts σε διάτμηση

Δράση $V_{wp,Ed}$	76.08	kN
Θλιπτική τάση $\sigma_{wp,Ed}$	54100.29	kN/m ²
Αντοχή $0.577 \cdot f_y$	204835.00	kN/m ²
$\sigma_{wp,Ed}/(0.577 \cdot f_y)$	0.26	
Έλεγχος	OK	

Δ5. Έλεγχος των end web-posts σε λυγισμό

Ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$	0.90	
Καμπύλη λυγισμού	b	
Μειωτικός συντ. χ_{wp}	0.66	
Θλιπτική τάση $\sigma_{wp,Ed}$	54100.29	kN/m ²
Θλιπτ. τάση αντοχής $\sigma_{b,wp,Rd}$	234745.76	kN/m ²
$\sigma_{wp,Ed}/\sigma_{b,wp,Rd}$	0.23	
Έλεγχος	OK	

11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S.G. Morkhade and L.M. Gupta, "Experimental study and rotational capacity of steel beams with web openings", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol.6, No. 1, 2015.
- [2] L. Amayreh and M.P. Saka, "Failure load prediction of castellated beams using artificial neural networks", *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 6, 2005.
- [3] R.M. Lawson and S.J. Hicks, "Design of Composite beams with large web openings", Steel Construction Institute (SCI).
- [4] Steel Construction Institute, "Beams with web openings", *Composite and Steel Construction Compendium*, part 11, 2014.
- [5] S. Durif and A. Bouchair, "Analytical model to predict the resistance of cellular beams with sinusoidal openings", *Journal of Constructional Steel Research*, 2016.
- [6] T.C.H Lin and K.F. Chung, "Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation", *Journal of Constructional Steel Research*, 2003.
- [7] Jihad Dokali Megharief, "Behavior of composite castellated beams", McGill University, 1997.
- [8] M.R. Soltani, A. Bouchair and M. Mimoune, "Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams", *Journal of Constructional Steel Research*, 2012.
- [9] R. Redwood and S.H. Cho, "Design of Steel and Composite beams with web openings", *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 25, 1993.
- [10] Eurocode 3, PART 1-13, "Steel beams with large web openings", working draft March 2016.
- [11] Eurocode 3, PART 1-1, "General rules and rules for buildings", 1998.
- [12] Eurocode 4, PART 1-1, "General rules and rules for buildings", 2009.
- [13] ADINA R & D Inc (2006), "Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA", Report ARD 06-7,

Watertown, USA, 2006

- [14] Ehab Ellabody, "Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes", Elsevier, 2011
- [15] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, "Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2008
- [16] Ι. Βάγιας, "Σιδηρές κατασκευές – Ανάλυση και διαστασιολόγηση", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2003
- [17] Ι. Βάγιας, Χ. Γαντές, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, "Παραδείγματα εφαρμογής σε ειδικά θέματα μεταλλικών κατασκευών", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2013

