

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

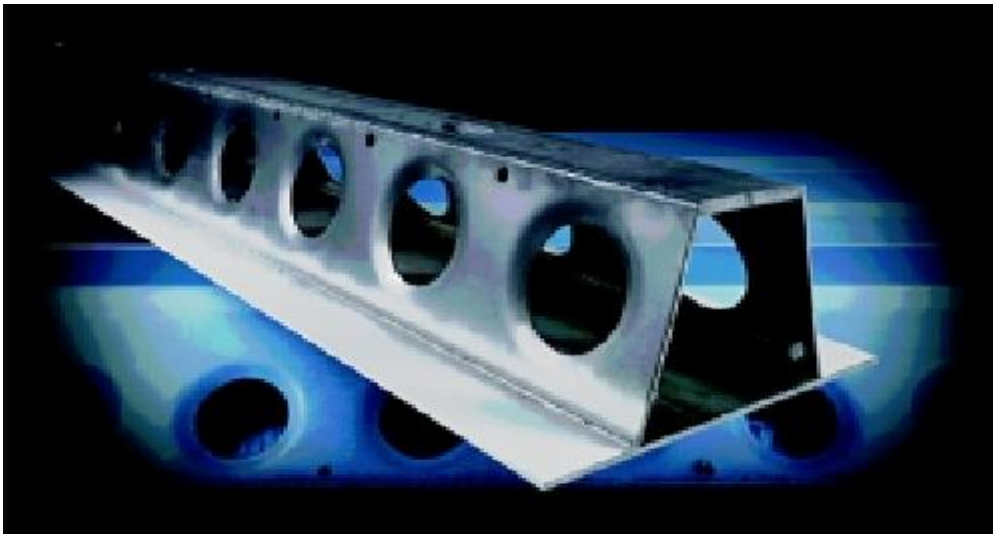
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING
STRUCTURAL ENGINEERING DIVISION
LABORATORY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΚΟΥ
ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (DELTA BEAM)**

ΣΙΦΙΝΟΥ ΧΑΡΟΥΛΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Κ. ΣΠΥΡΑΚΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

ΣΙΦΙΝΟΥ ΧΑΡΟΥΛΑ

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ
ΔΟΚΟΥ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ
(DELTA BEAM)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ε.Μ.Π.

ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην παρούσα εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Σπυράκο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο, καθώς και για την καθοδήγηση που μου παρείχε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Κυριακόπουλο για το ενδιαφέρον, την υπομονή, την επίλυση αποριών και την καθοριστική βοήθεια προκειμένου να έρθει σε πέρας αυτή η εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση δύο μεταλλικών δοκών τραπεζοειδούς διατομής γνωστές ως Delta Beams. Οι δοκοί θα εξεταστούν σύμφωνα με τη μέθοδο της απομειωμένης διατομής. Θα μελετηθούν με ελαστική και μη γραμμική ανάλυση. Ο σχεδιασμός, η προσομοίωση και η ανάλυση των δοκών έγιναν με χρήση των προγραμμάτων SAP2000 και Abaqus.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή για τις σύμμικτες κατασκευές. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η περιγραφή της πρότυπης δοκού Delta Beam και των χαρακτηριστικών της. Ακόμη, περιγράφονται τα κύρια σημεία της μεθόδου απομειωμένης διατομής δοκού (Reduced Beam Section) και επισυνάπτονται, σχετικές με τη μέθοδο, δημοσιευμένες εργασίες. Επίσης, περιγράφονται η μορφή και τα χαρακτηριστικά των δύο δοκών που θα αναλυθούν όπως οι διαστάσεις διατομών, το υλικό κατασκευής και τα γεωμετρικά μεγέθη της απομειωμένης διατομής.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων των δοκών στο πρόγραμμα SAP2000. Καθορίζονται το υλικό κατασκευής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών τους. Ακόμη, μελετάται πώς μεταβάλλονται τα διαγράμματα ροπών- καμπυλοτήτων καθώς αλλάζει το πλάτος της οπής στις απομειωμένες διατομές.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η περιγραφή των προσομοιώματων των δοκών και ο καθορισμός αυτών ως επιφανειακά στοιχεία. Οι δοκοί αναλύονται με την ελαστική μέθοδο σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μη γραμμική ανάλυση των δοκών στο πρόγραμμα Abaqus.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τις αναλύσεις.

ABSTRACT

This diploma thesis studies the analysis of two trapezoidal section steel beams, known as Delta Beams. The beams will be examined with the method of reduced beam section. The design, the simulation and the linear and nonlinear analysis were made using SAP2000 and Abaqus software.

Chapter 1 is an introduction on the composite structures. Chapter 2 is a description of the characteristics of the standard Delta Beam and Reduced Beam Section (RBS) method. Published papers related to RBS are enclosed. A description of the geometrical characteristics of RBS is included in this chapter.

Data input is described in Chapter 3, to simulate the beams in SAP2000 program. The material and the geometrical characteristics of sections are defined. The way that changes at the width of hole in reduced beam section affect the moment- curvature relationship, is also analyzed.

Chapter 4 is a description of the analytical models of beams as shell elements. The beams are analyzed elastically using the Von Mises yield criterion.

In Chapter 5 a non-linear analysis of the beams is performed using Abaqus finite element analysis program.

In chapter 6 the conclusions of this thesis are presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΜΜΙΚΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΚΟΙ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΕΛΤΑ (DELTA BEAM).....	6
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ DELTA BEAM.....	7
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ.....	11
2.2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	11
2.2.2 ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	13
2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΟΚΟΥ (REduced BEAM SECTION-RBS).....	14
2.4 ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΟΚΟΥ.....	22
2.4.1 CYCLIC PERFORMANCE OF STEEL MOMENT- RESISTING CONNECTIONS WITH REDUCED BEAM SECTIONS- EXPERIMENTAL ANALYSIS AND FINITE ELEMENT MODEL SIMULATION.....	22
2.4.2 LOCAL BUCKLING OF RBS BEAMS SUBJECTED TO CYCLIC LOADING.....	25
2.4.3 CYCLIC RESPONSE AND DESIGN RECOMMENDATIONS OF WEAK- AXIS.....	27
2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΟΚΩΝ D38/500 ΚΑΙ D22/200.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ.....	32
3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	33

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	41
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	42
4.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ VON MISES.....	47
4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΤΟ SAP2000.....	52
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	89
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	90
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΥΜΜΙΚΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Μία από τις εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών είναι η ανάπτυξη των σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα. Οι κατασκευές αυτές μορφώνονται από τα δύο δημοφιλέστερα υλικά, το δομικό χάλυβα και το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα υλικά αυτά είναι συμβατά μεταξύ τους και έχουν συμπληρωματικές ιδιότητες. Το σκυρόδεμα έχει μεγάλη αντοχή σε θλίψη και ο χάλυβας σε εφελκυσμό. Επίσης, το σκυρόδεμα περιορίζει την εμφάνιση φαινόμενων αστάθειας σε θλιβόμενα στοιχεία από χάλυβα, όπως τον τοπικό και πλευρικό λυγισμό.

Τα δύο αυτά υλικά συνδυάζονται με το βέλτιστο τρόπο ώστε να δώσουν ασφαλείς, λειτουργικές, ανθεκτικές στον χρόνο και οικονομικές κατασκευές. Έχουν μεγάλη φέρουσα ικανότητα, παρουσιάζουν καλή πυραντίσταση, ηχομόνωση και θερμομόνωση, ενώ είναι εύκολη η συναρμολόγηση και η αποσυναρμολόγηση τους. Η χρήση των σύμμικτων κατασκευών είναι πολύ διαδεδομένη στις περισσότερες προηγμένες χώρες του κόσμου. Επιπροσθέτως, η εξαιρετική αντισεισμική συμπεριφορά τους, τις καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς σε σεισμογενείς περιοχές.

Τα σύμμικτα δομικά στοιχεία εμφανίζονται για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1920 στην Ιαπωνία, όπου ηλωτές δικτυωτές δοκοί και ηλωτά υποστυλώματα σύνθετων διατομών από γωνιακά, εγκιβωτίζονταν σε σκυρόδεμα. Στην Ευρώπη, και για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, δεν γινόταν χρήση του χάλυβα σε οικοδομικά έργα. Οι κυριότερες αιτίες ήταν η έλλειψη χάλυβα, οι χαμηλές τιμές του σκυροδέματος και το υψηλό κόστος της πυροπροστασίας.

Το 1956 εκδόθηκε και ο πρώτος σχετικός κανονισμός DIN 4239 "Σύμμικτες δοκοί σε κτίρια" βασιζόμενος στην ελαστική θεωρία και τη μέθοδο των επιτρεπομένων τάσεων. Η χρήση σύμμικτων στοιχείων σε κτίρια, γνώρισε μεγάλη άνθηση κυρίως στη δεκαετία του '80 με την υιοθέτηση των αμερικάνικων μεθόδων διαχείρισης fast-track, με πρωτοπόρες την Αγγλία και τις σκανδιναβικές χώρες. Το μέγιστο ποσοστό απαντάται με 64% στην Ιαπωνία, όπου οι αντισεισμικές απαιτήσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Στην

Αμερική το αντίστοιχο ποσοστό είναι 50%, στην Αγγλία 60%, ενώ στην Ευρώπη κατά μέσον όρο 33%.

Σήμερα, έχει συνταχθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN), ο Ευροκώδικας 4, που αφορά αποκλειστικά στις σύμμικτες κατασκευές και στους οποίους περιέχονται οι κανόνες σχεδιασμού και εκτέλεσης δομικών έργων από σύμμικτα στοιχεία. Πρόκειται για ένα Κανονισμό, στον οποίο έχει ενσωματωθεί η γνώση και η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών, τεχνικών και επιστημόνων που έχουν ασχοληθεί με τέτοιου είδους κατασκευές.

Από τα πρώτα χρόνια της εφαρμογής τους, οι σύμμικτες κατασκευές διακρίνονταν για την οικονομικότητά τους σε μεγάλα έργα και κυρίως σε γέφυρες όπου σε σχέση με τις αντίστοιχες από οπλισμένο σκυρόδεμα, απαιτούνταν πολύ μικρότερες διατομές. Η μείωση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου υλικού οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους της κατασκευής. Τα ίδια ισχύουν ακόμη και σήμερα όπου οι σύμμικτες κατασκευές έχουν καθιερωθεί πλέον ως μακράν η καλύτερη λύση για γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων αλλά και κτήρια μεγάλου ύψους τα οποία απαιτούν πολύ μεγάλες διατομές για οπλισμένο σκυρόδεμα.

Ανεξάρτητα από την μορφή της, μια σύμμικτη κατασκευή έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με μια αντίστοιχη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι μικρότερες διατομές που προανέφερα, εκτός της εξοικονόμησης υλικού, οδηγούν και σε μια ελαφρύτερη κατασκευή η οποία έχει μια πολύ καλή αντισεισμική συμπεριφορά. Επίσης, η ανέγερση μιας σύμμικτης κατασκευής μπορεί να γίνει πολύ πιο εύκολα και γρήγορα καθώς όλα τα χαλύβδινα μέλη κατασκευάζονται στο εργοστάσιο και απλά συναρμολογούνται στο εργοτάξιο.

Οι σύμμικτες κατασκευές θεωρούνται σήμερα σύγχρονες, γρήγορες και οικονομικές κατασκευές. Στην Ελλάδα εμφάνισαν μια πραγματικά εντυπωσιακή εξέλιξη και σε σύντομο χρονικό διάστημα κατασκευάστηκαν πολλά έργα σε ένα δομικό περιβάλλον που κυριαρχείται από το σκυρόδεμα. Η εμφάνιση τους αποτελεί μια από τις σημαντικότερες καινοτομίες στον τομέα των κατασκευών.

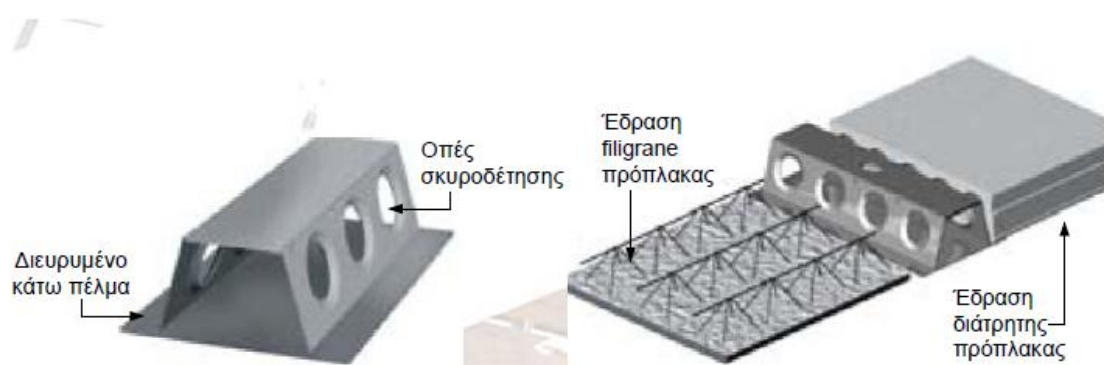
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΟΚΟΙ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΕΛΤΑ (DELTA BEAM)

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ DELTA BEAM

Η Deltabeam είναι σύμμικτη δοκός, η οποία χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία τα τελευταία χρόνια σε ολόκληρη την Ευρώπη. Η δοκός είναι τραπεζοειδούς διατομής με οπές στους κορμούς ανά 300 mm, απαραίτητες για την πλήρωση του εσωτερικού μέρους της δοκού με σκυρόδεμα και την διέλευση εγκάρσιων οπλισμών. Η συνήθης ποιότητα δομικού χάλυβα είναι S355J2+N σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 3. Σε ειδικές περιπτώσεις ανάληψης ισχυρών φορτίσεων χάλυβες υπερυψηλής αντοχής S420 και S460 δύναται να χρησιμοποιηθούν.

Το κάτω πέλμα της δοκού είναι διευρυμένο προς διευκόλυνση έδρασης προπλακών, πάνω στις οποίες πραγματοποιείται συμπληρωματική σκυροδέτηση. Η διατομή της Deltabeam είναι κατάλληλα σχεδιασμένη, ώστε να μπορεί να αναλάβει χωρίς υποστήριξη τα φορτία των προκατασκευασμένων στοιχείων και του νωπού σκυροδέματος κατά τη φάση της κατασκευής. Έτσι, αποφεύγονται οι ασφαλιστικές εισφορές λόγω καλουπώματος- ξεκαλουπώματος και η κατασκευή γίνεται ευκολότερα και ταχύτερα.



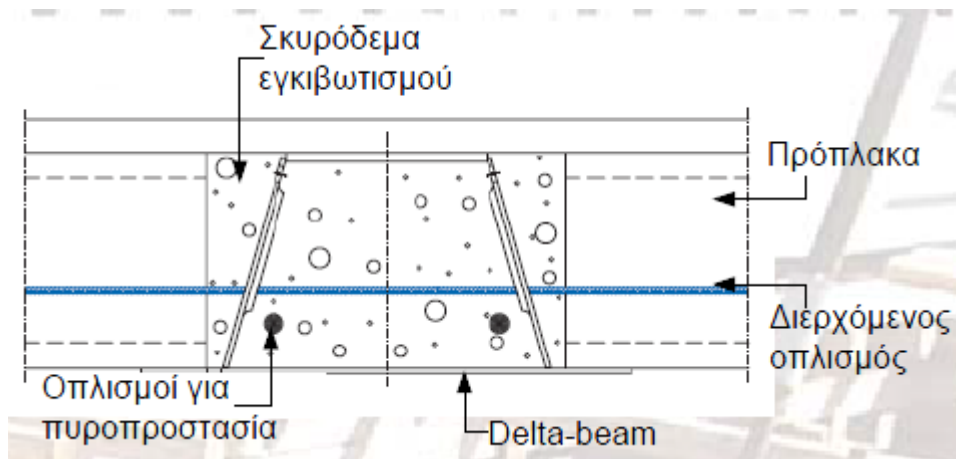
Σχήμα 2.1 - Deltabeam με Filigrane ή διάτρητες προεντεταμένες πρόπλακες

Η δοκός δύναται, επίσης, να σκυροδετηθεί και με τον κλασικό τρόπο μέσω ικριωμάτων. Μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος δημιουργείται μια σύμμικτη διατομή υψηλής δυσκαμψίας και αντοχής, κατάλληλη για την

κάλυψη εντυπωσιακά μεγάλων φατνωμάτων. Για λόγους αύξησης της πυροπροστασίας η δοκός παραδίδεται με διαμήκεις οπλισμούς στο εσωτερικό της.



Σχήμα 2.2 - Σκυροδέτηση Deltabeam μέσω υποστήριξης



Σχήμα 2.3 - Διατομή εγκιβωτισμένου Deltabeam

Η σύνδεση της δοκού σε υποστυλώματα είναι αρθρωτή και πραγματοποιείται μέσω ειδικού μεταλλικού τάκου, ο οποίος αγκυρώνεται μέσω διατμητικών ήλων εντός του σκυροδέματος. Η δοκός παραδίδεται με οπές στα άκρα της προς υποδοχή του τάκου. Η μόρφωση πλαισίων με συνδέσεις ροπής (πακτώσεις) προς ανάληψη σεισμικών καταπονήσεων δεν επιτρέπεται. Ο σεισμός θα πρέπει να αναληφθεί μέσω κατάλληλης διάταξης αντισεισμικών τοιχίων ή διαγώνιων συνδέσμων.



Σχήμα 2.4 - Σύνδεση δοκού delta σε υποστύλωμα

Τα πλεονεκτήματα της δοκού είναι ποικίλα. Η δοκός εγκιβωτίζεται πλήρως στο σκυρόδεμα και δημιουργεί επίπεδες οροφές με υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται το ελεύθερο ύψος των ορόφων και εξοικονομείται χώρος. Η δοκός καλύπτει μεγάλα ανοίγματα ως και 22 m χωρίς να παρεμβάλλονται υποστυλώματα και η διέλευση των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων γίνεται απρόσκοπτα. Η σύνδεση της δοκού με στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα και δομικό χάλυβα γίνεται πολύ εύκολα και γρήγορα. Λόγω των προκατασκευασμένων στοιχείων η κατασκευή χτίζεται σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς, απουσιάζουν οι πολύπλοκες λεπτομέρειες όπλισης.



Σχήμα 2.5 - Δημιουργία επίπεδων οροφών

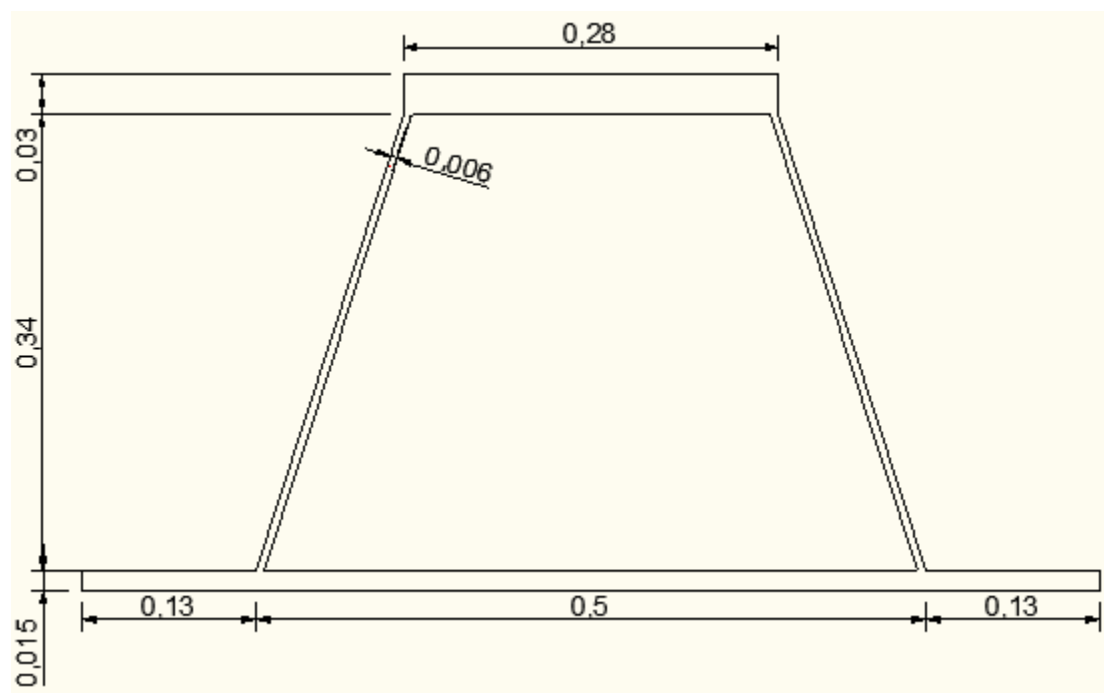
Πρόσθετο χαρακτηριστικό της δοκού είναι η δυνατότητα μόρφωσης ορόφων χαμηλού ιδίου βάρους λόγω των διάτρητων πλακών. Κατά συνέπεια, οι σεισμικές δυνάμεις που προκύπτουν είναι μειωμένες και οι απαιτήσεις όπλισης των δομικών στοιχείων είναι σημαντικά μικρότερες. Έτσι, μεταφέρονται στο έδαφος μειωμένα φορτία και η καταπόνηση της θεμελίωσης είναι σημαντικά μικρότερη. Γεγονός που καθιστά την Deltabeam ικανή για χρήση σε κακής ποιότητας εδάφη. Επίσης, διαθέτει πυροπροστασία ως 120 λεπτά και αντιδιαβρωτική ικανότητα λόγω εγκιβωτισμού του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Η κλειστή τραπεζοειδής της διατομή δίνει παράλληλα τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραλαβής στρεπτικών εντάσεων, ιδιαίτερα επιθυμητών σε περιπτώσεις ακραίων δοκών.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

2.2.1. ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Η πρώτη μεταλλική δοκός έχει μήκος 7 m και διαστάσεις μιας τυπικής σύνηθης διατομής δοκού Deltabeam. Η δοκός αυτή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα συμβολίζεται με D38/500. Τα χαρακτηριστικά της διατομής είναι τα εξής :

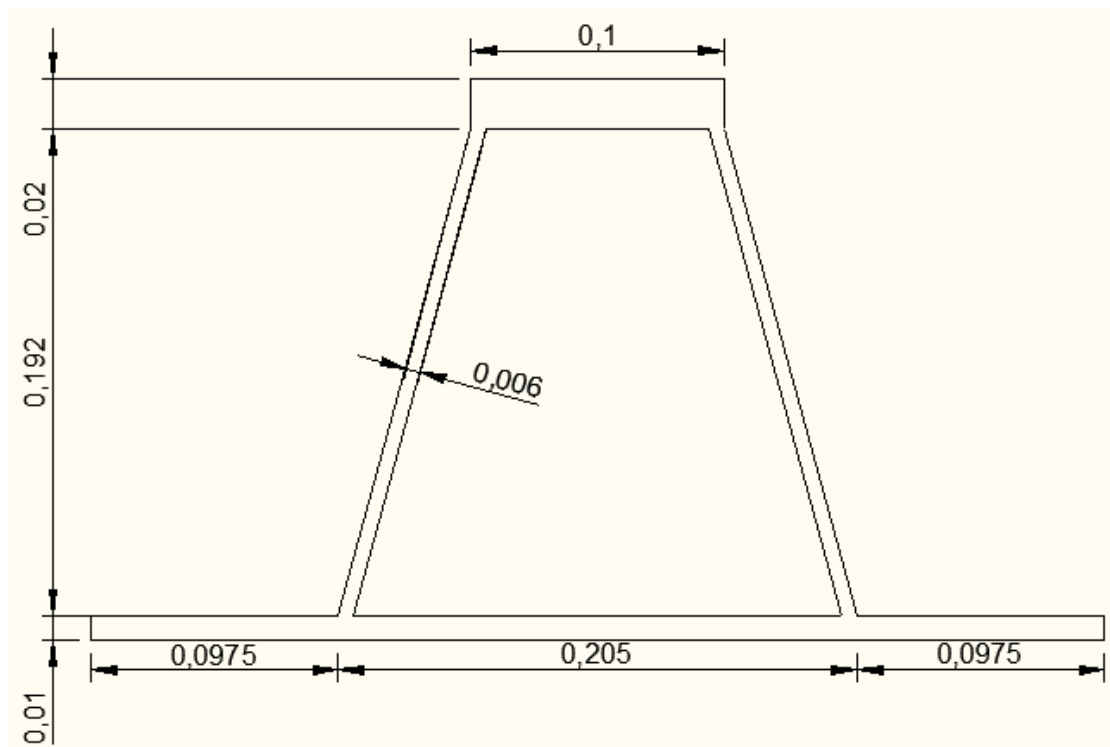
<u>Άνω πέλμα :</u>	Μήκος $l_f = 0,28$ m Πλάτος $t_f = 0,03$ m
<u>Κάτω πέλμα :</u>	Μήκος $l_f = 0,76$ m Πλάτος $t_f = 0,015$ m
<u>Κορμός :</u>	Ύψος $h_w = 0,34$ m Πλάτος $t_w = 0,006$ m



Σχήμα 2.6 - Διατομή δοκού D38/500

Η δεύτερη μεταλλική δοκός έχει και αυτή μήκος 7 m και οι διαστάσεις της διατομής της είναι οι ελάχιστες που μπορεί να αντέξει μία Deltabeam. Δηλαδή, αναφερόμαστε στην minimum Deltabeam. Η δοκός αυτή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα συμβολίζεται με D22/200. Τα χαρακτηριστικά της διατομής είναι τα εξής :

- Άνω πέλμα : Μήκος $l_f = 0,28$ m
Πλάτος $t_f = 0,03$ m
- Κάτω πέλμα : Μήκος $l_f = 0,76$ m
Πλάτος $t_f = 0,015$ m
- Κορμός : Ύψος $h_w = 0,34$ m
Πλάτος $t_w = 0,006$ m



Σχήμα 2.7 - Διατομή δοκού D22/200

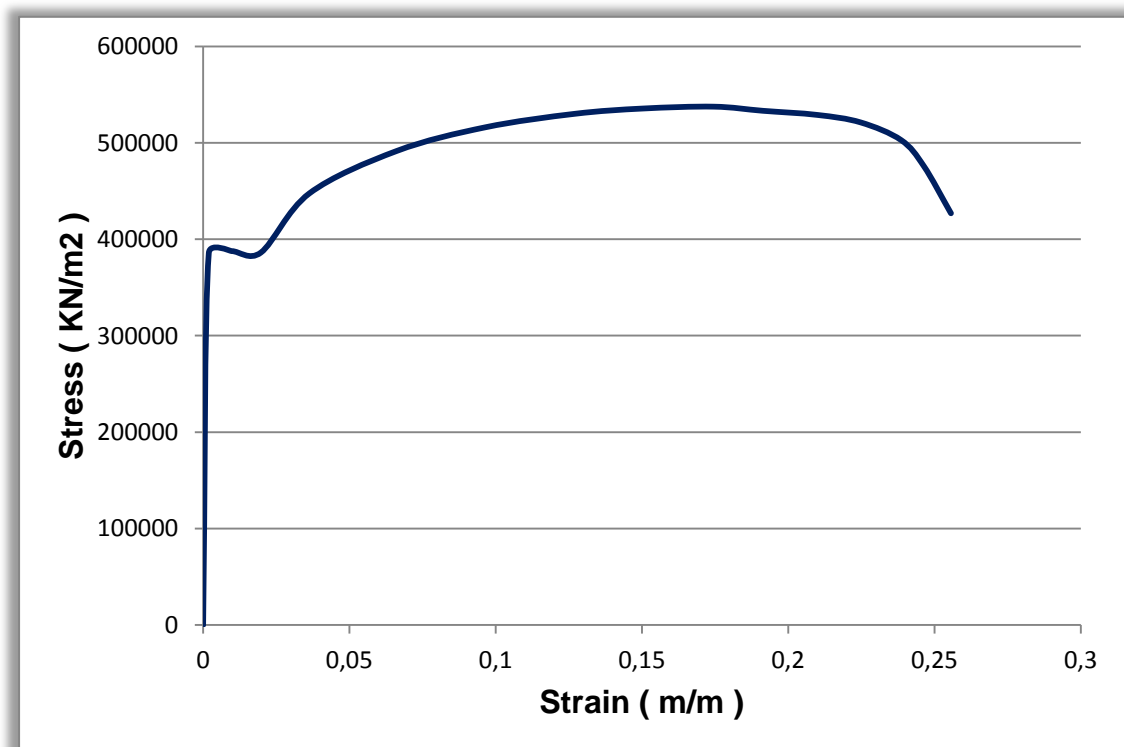
2.2.2 ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΚΕΥΗΣ

Το υλικό κατασκευής και των δυο δοκών είναι ο χάλυβας ποιότητας S355N2+J. Οι ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται στη συνέχεια :

Χάλυβας δομικός S355

- Ισοτροπικό υλικό (Isotropic)
- Μέτρο Ελαστικότητας : $E = 210 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0,3$
- Τάση διαρροής : $f_y = 355 \text{ MPa}$
- Τάση θραύσης : $f_u = 537 \text{ MPa}$

Παρακάτω δίνεται και το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων όπως αυτό ορίζεται από τους αντίστοιχους κανονισμούς:



Σχήμα 2.8 - Διάγραμμα σ - ϵ δομικού χάλυβα S355J2

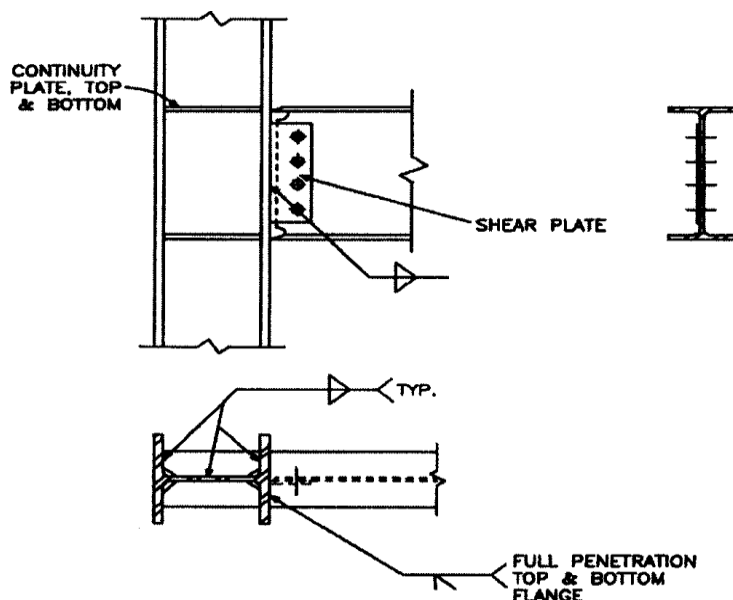
2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΟΚΟΥ (REDUCED BEAM SECTION- RBS)

Ο σεισμός του Northridge στην Αμερική το 1994 και του Kobe στην Ιαπωνία το 1995 και οι καταστρεπτικές τους συνέπειες φανέρωσαν τη ζήτηση μιας πιο εμπειριστατωμένης επανεξέτασης του αντισεισμικού σχεδιασμού και των κατασκευών γενικότερα. Μία μοναδική πτυχή των δύο αυτών σεισμών ήταν η ταυτοποίηση της άγνωστης μέχρι τότε ευαισθησίας των συγκολλητών μεταλλικών πλαισίων στη ψαθυρή θραύση. Συγκεκριμένα, οι ζημιές του χάλυβα από το σεισμό του Northridge, ο οποίος ήταν 6,8 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ και είχε μια εδαφική κίνηση μόνο 10 sec, δημιούργησαν τοπικές και στη συνέχεια, εθνικές ανησυχίες. Βασικές ερωτήσεις δημιουργήθηκαν που αφορούσαν τις αιτίες, τη φύση, τις επιπτώσεις των ζημιών από ψαθυρή αστοχία σε συνδέσεις μεταλλικών πλαισίων σε πολυάριθμα μεταλλικά κτίρια στην περιοχή του Λος Άντζελες. Ακόμα κι αν δεν υπήρχαν μεταλλικά πλαίσια ή μέλη που κατέρρευσαν ή ακόμη και θανατηφόρα περιστατικά κατά τη διάρκεια του σεισμού ή μετά το σεισμό του '94, η τρέχουσα πρακτική σχεδιασμού για τη συγκεκριμένη συγκολλητή λεπτομέρεια στην σύνδεση δοκού- υποστυλώματος είχε αμέσως ανασταλλεί. Βελτιωμένες εναλλακτικές λύσεις/ τροποποιήσεις για τα καινούργια μεταλλικά κτίρια έγινε επιτακτική ανάγκη.

Αυτή η εκπληκτική μείωση της ολκιμότητας στον κόμβο, και κατά συνέπεια, η μερική απώλεια της αντοχής και της ακαμψίας του αρχικού πλευρικού πλαισίου, δημιούργησε πολλά σοβαρά θέματα σχετικά με τα κτίρια που είχαν υποστεί ζημιές και άλλα υφιστάμενα κτίρια, όπως το πώς να επιθεωρήσουν αυτά τα κτίρια για τις ζημιές, πώς να εκτιμήσουν την αντοχή και τη δυσκαμψία που τους απέμεινε, πώς να τα επισκεύασουν εάν οι ζημιές έχουν εντοπιστεί και πώς να επανεξετάσουν το πόσο ευπαθή είναι τα υφιστάμενα κτίρια σε σεισμικές περιοχές.

Μετά το σεισμό του '94 στο Northridge, η έρευνα επικεντρώθηκε γύρω από τους χάλυβες σε συγκολλητά πλαίσια με την κοινή προ-1994 λεπτομέρεια στον κόμβο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7. Μια αναταραχή των τεχνικών δραστηριοτήτων σε πολλά μέτωπα ξεκίνησε το 1994- 1995, που πρόσφατα

έληξε. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, απελευθερώθηκε η δημιουργικότητα ολόκληρης της κοινότητας σε θέματα που αφορούσαν το χάλυβα. Η American Institute of Steel Construction, η χαλυβουργική βιομηχανία, οι κυβερνητικοί οργανισμοί (Πολιτείες της Καλιφόρνιας, Federal Emergency Management Agency, National Science Foundation), οι ακαδημαϊκοί και οι επαγγελματίες σχεδιαστές, όλοι συνέβαλαν με διάφορους τρόπους με την εμπειρογνωμοσύνη τους σε αυτή τη συλλογική προσπάθεια έρευνας. Διάφορες αναθεωρήσεις και προσθήκες έχουν γίνει στο ANSI/AISC Seismic Provisions και σε συναφή έγγραφα, πολλές από τις οποίες είναι αντανάκλαση των ευρημάτων της έρευνας μετά το σεισμό του Northridge.



Σχήμα 2.9 - Λεπτομέρεια κόμβου πριν το σεισμό του 1994 στο Northridge

Η κοινή πριν το 1994 κατασκευαστική λογική για τις συγκολλητές συνδέσεις, που παρουσίασαν μεγάλες ζημιές από ρηγματώσεις κατά τη διάρκεια του Northridge, έχει αφαιρεθεί από το AISC Seismic Provision και άλλους κώδικες κατασκευής κτιρίων. Έχει αντικατασταθεί από κατασκευαστικές απαιτήσεις αντοχής και ολκιμότητας. Μετά από χρόνια έρευνας έχουν επιλεγεί με επιτυχία μια σειρά από εναλλακτικές συνδέσεις χάλυβα, οι οποίες είναι :

- Μεταλλικά ελάσματα συγκολλητά στα πέλματα της δοκού
- Μέθοδος απομειωμένης διατομής (RBS)
- Κοχλιωτά κομβοελάσματα
- Πλευρικά ελάσματα
- Κοχλιωτά ελάσματα στα πέλματα της δοκού

Όλες αυτές οι λεπτομερείς τροποποιήσεις αποσκοπούν στο να αυξήσουν την πλαστικότητα- ολκιμότητα στο σημείο σύνδεσης της δοκού και του υποστηλώματος. Αυτά τα σεισμικά στοιχεία μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο ευρείες ομάδες ενίσχυσης ή απομείωσης δοκού. Εκτός από την RBS, όλες οι άλλες είναι μέθοδοι ενίσχυσης της δοκού.



Σχήμα 2.10 - Απομειωμένο τμήμα διατομής δοκού

Η έρευνα έχει αποδείξει ότι η χρήση της μεθόδου RBS, γνωστή και ως dogbone λόγω του σχήματος του απομειωμένου πέλματος, στη σύνδεση της δοκού με το υποστήλωμα είναι ένα αξιόπιστο και αποτελεσματικό μέσο για να αντιμετωπίσουμε τις δυναμικές καταπονήσεις από σεισμό στα μεταλλικά πλαίσια. Στη μέθοδο αυτή, ένα τμήμα της δοκού έχει εκ προθέσεως απομειωμένη διατομή σε συγκεκριμένη απόσταση από το υποστήλωμα. Σκοπός είναι να μεταφερθεί η διαρροή, δηλαδή η πλαστική άρθρωση, από την άκρη της δοκού στο απομειωμένο τμήμα της δοκού και ταυτόχρονα να μειωθεί η καταπόνηση λόγω κάμψης και η συγκέντρωση τάσεων στον κόμβο δοκού- υποστηλώματος.

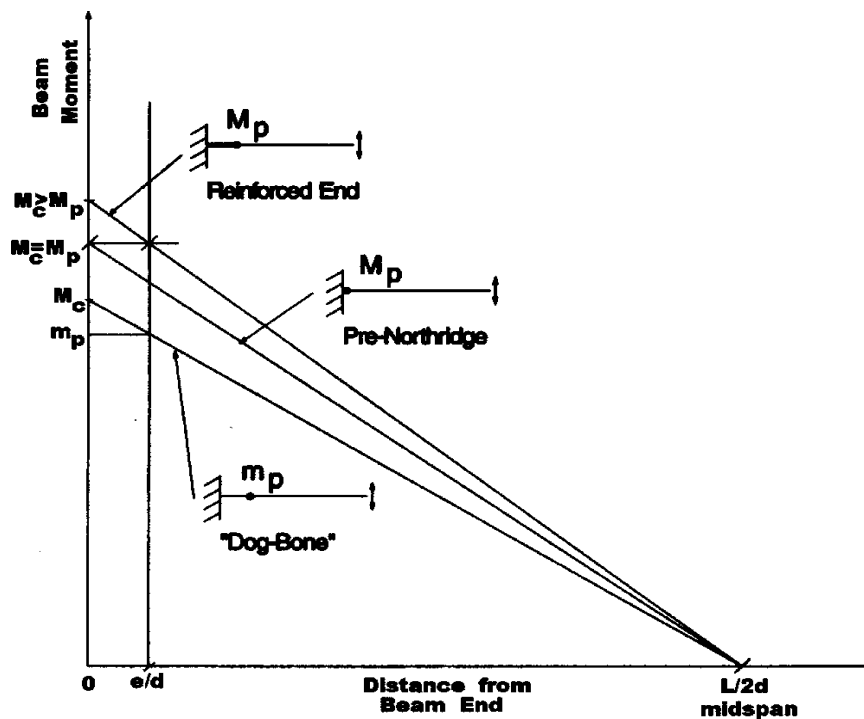
Το συμπέρασμα αυτό εξηγείται κι από την αρχή St. Venant, που αναφέρει ότι τα εντατικά μεγέθη στην άκρη του μέλους διαχέονται σε μια σχετικά ομοιόμορφη κατάσταση σε απόσταση που είναι περίπου ίση με το πλάτος του μέλους. Αυτή η απόσταση είναι περίπου το $1/3$ ως το $1/2$ του ύψους του μέλους για τις διατομές με πλατιά πέλματα. Επιπλέον, αυτή η απόσταση είναι συνήθως αρκετά μικρή ώστε να αποφύγουμε την ανάπτυξη ισχυρής διατμητικής δύναμης.

Η θεμελιώδης αλλαγή στη μέθοδο αυτή είναι η ανάπτυξη μιας εσωτερικής πλαστικής άρθρωσης που θα εξυπηρετεί ως «όλκιμη σεισμική ασφάλεια», σε αντίθεση με την προηγούμενη τυπική κατάσταση της πλαστικής άρθρωσης στον κόμβο δοκού- υποστηλώματος. Τα άκρα της δοκού και τα συνδετικά στοιχεία αναμένεται να παραμείνουν σε ελαστικά επίπεδα τάσεων.

Η επιλογή σχεδιασμού της θέσης της πλαστικής άρθρωσης του μέλους επηρεάζει τη μεταφορά της ροπής στο υποστύλωμα. Στη μέθοδο ενίσχυσης η ροπή του υποστυλώματος είναι μεγαλύτερη από την πλαστική ροπή αντοχής της τυπικής δοκού, ενώ στην μέθοδο απομειωμένης διατομής (RBS) είναι μικρότερη. Η συνέχεια των ροπών της δοκού παρέχει τις αναγκαίες οριακές συνθήκες για το σχεδιασμό της εσωτερικής πλαστικής άρθρωσης και της ροπής M_C στην άκρη της δοκού.

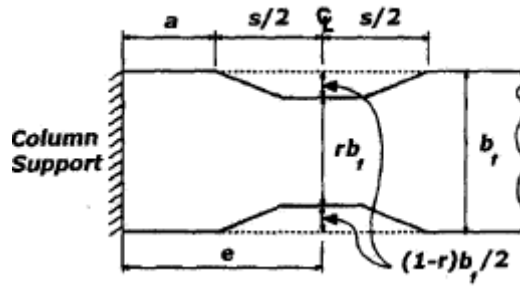
Το σχήμα 2.11 δείχνει τη διακύμανση της ροπής κάμψης κατά μήκος του μισού ανοίγματος της δοκού, σύμφωνα με την παραδοχή ότι το σημείο κάμψης παρουσιάζεται στο μέσο του ανοίγματος. Η άνω γραμμή αναπαριστά μια ενισχυμένη σύνδεση, η οποία αναπτύσσει την πλήρως πλαστική ροπή M_p , με αποτέλεσμα να αυξάνει τη ροπή M_C στην άκρη της δοκού, $M_C > M_p$. Η κάτω γραμμή αναπαριστά μια σύνδεση RBS με καμπτική δύναμη $m_p < M_p$, που οδηγεί σε μια ροπή $M_C < M_p$. Η ενδιάμεση γραμμή αναπαριστά την τυπική πριν το σεισμό του Northridge κατάσταση της πλαστικής άρθρωσης στην άκρη της δοκού $M_C = M_p$. Αυτή η γραμμική καμπτική ισοροπία παρουσιάζει τη θεμελιώδη συμπεριφορά της μεθόδου RBS στον έλεγχο του ποσού της ροπής που μεταφέρεται στην άκρη της δοκού. Η εκκεντρότητα e του τμήματος της δοκού και η κλίση της ροπής είναι οι δυο βασικές μεταβλητές σχεδιασμού του διαγράμματος.

Το σχήμα 2.11 δείχνει επίσης ότι η αύξηση του λόγου e/d μειώνει την απαιτούμενη πλαστική ροπή m_p του RBS, κρατώντας όλα τα άλλα σταθερά. Ισχύει και το αντίστροφο. Ως εκ τούτου, οι μικρότερες μειώσεις της δοκού είναι απαραίτητες όταν η εσωτερική πλαστική άρθρωση είναι πιο κοντά στην άκρη της δοκού (μικρότερη e/d απόσταση). Από την άλλη πλευρά, η απότομη κλίση ροπής (μικρότερα L/d) αυξάνει την ροπή της δοκού που μεταφέρεται στο υποστύλωμα για σταθερό e/d και m_p .



Σχήμα 2.11 - Κλίση καμπτικής ροπής για σεισμικά φορτία

Αυτή η καινοτόμος ιδέα, που εκ προθέσεως μειώνεται η διατομή της δοκού δίπλα στον κόμβο, παρέχει μία προκαθορισμένη και αξιόπιστη ασφάλεια στο κύριο μέλος του οποίου οι πλαστικές αρθρώσεις υπερφορτώνονταν από την ίδια την σύνδεση. Αρχικά το σχήμα της απομειωμένης διατομής στο πέλμα ήταν ένα γραμμικό τραπεζοειδές περίγραμμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12

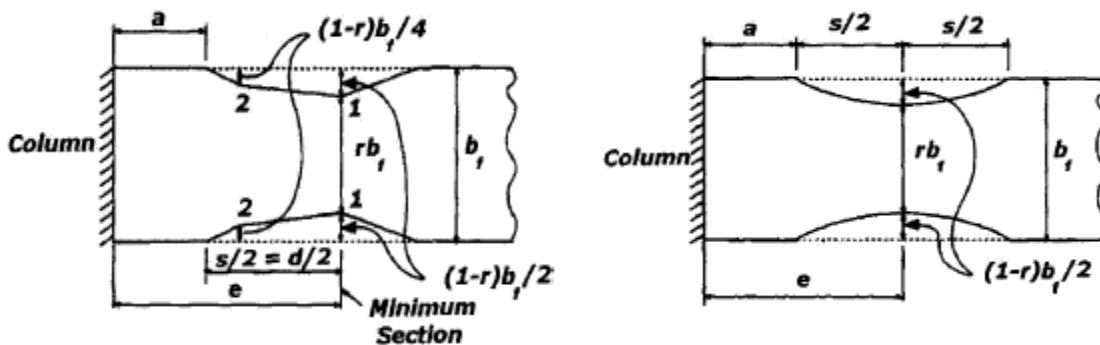


Σχήμα 2.12 - Γραμμική τραπεζοειδής απομειωμένη διατομή

Πριν το 1994-95, η μέθοδος dog-bone ήταν μια απομακρυσμένη έννοια που δεν είχε τεθεί σε χρήση πουθενά. Είχε συλληφθεί στην Ευρώπη στα τέλη της δεκαετίας του '80 ως υποπροϊόν κάποιων πειραμάτων και στη συνέχεια κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1992. Ωστόσο, δεν έχει σαφή μεθοδολογία σχεδιασμού ούτε πρακτική εμπειρία για τη γενικότερη χρήση της σε ένα κτίριο. Εντυπωσιακό αυτής της μεθόδου είναι η αρχική σκέψη- ιδέα απομάκρυνσης υλικού, σε αντίθεση με τις άλλες ενισχυτικές μεθόδους.

Ως εκ τούτου, από πολλές απόψεις υπήρχε ένα μεγάλο κενό αξιοπιστίας που έπρεπε να ξεπεραστεί μέχρι η μέθοδος RBS να επαληθευτεί και να γίνει αποδεκτή ως μια βιώσιμη σύνδεση μεταλλικών μελών εναλλακτικού σχεδιασμού στις ΗΠΑ. Η RBS ήταν μια εναλλακτική λύση, η οποία μείωσε τόσο την αντοχή όσο και την ακαμψία του μέλους.

Μεταγενέστερες έρευνες επιβεβαίωσαν τη μέθοδο και δημιούργησαν δυο νέα σχήματα απομειωμένης διατομής. Το πρώτο σχήμα είναι σταδιακή γραμμική μείωση και το δεύτερο, το οποίο είναι προτιμότερο, είναι το κυκλικό.



Σχήμα 2.13 - Γραμμική κωνική και κυκλική απομειωμένη διατομή πέλματος

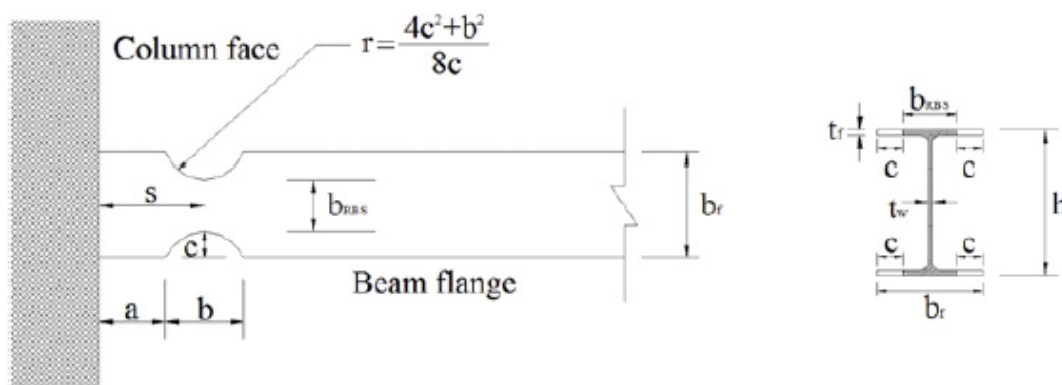
Εν ολίγοις, το μήκος από την άκρη της δοκού έως την αρχή της απομείωσης πρόκειται να παραμείνει ελαστικό με την ελάχιστη διατομή να βρίσκεται σε μια επιπλέον απόσταση $s/2$ προς το άνοιγμα (συνολική απόσταση $e=a+s/2$ από την άκρη της δοκού). Η προτεινόμενη περιοχή για το e είναι $0.75d \leq e \leq 1d$.

Μερικοί από τους κύριους περιορισμούς σχεδιασμού του απομειωμένου τμήματος της δοκού είναι :

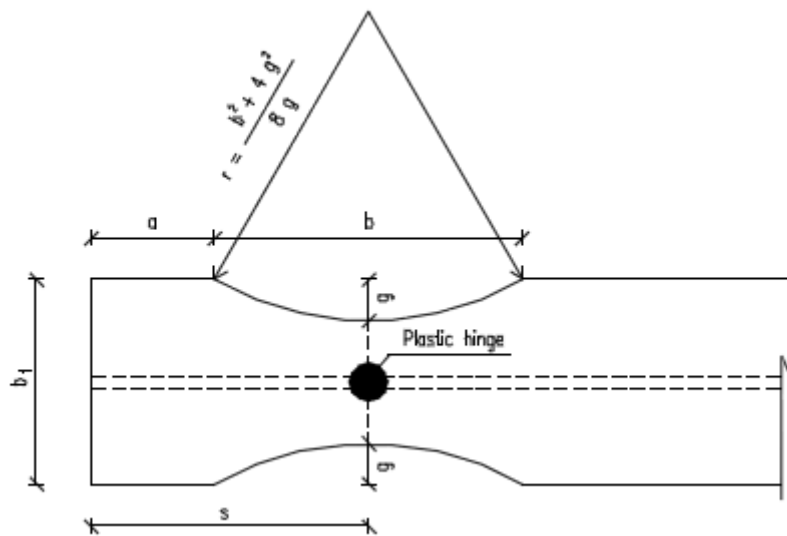
- Να χρησιμοποιείται μόνο όταν ο λόγος του μήκους προς το ύψος της δοκού είναι μεγαλύτερος από πέντε
- Η μείωση του πέλματος της δοκού να μην ξεπερνά το μισό του πλάτους της
- Να χρησιμοποιείται σε δοκούς με πλατιά πέλματα
- Το τμήμα της απομειωμένης διατομής να είναι συμμετρικό

Οι ελάχιστες στροφές που αναπτύσσονται σε κάθε οριακή κατάσταση είναι

DL	SD	NC
0,01	0,025	0,04



Σχήμα 2.14 - Τυπική γεωμετρία του απομειωμένου τμήματος δοκού κατά FEMA



Σχήμα 2.15 - Τυπική γεωμετρία του απομειωμένου τμήματος δοκού κατά τον Ευρωκώδικα 8 , Μέρος 3

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του απομειωμένου τμήματος της δοκού όπως είναι καθορισμένα στους κανονισμούς FEMA 350 και στον Ευρωκώδικα 8, Μέρος 3.

FEMA 350 [1]/351 [12]	EC 8, Part 3 [13]
$a = 0.50 - 0.75b_f$	$a = 0.60b_f$
$b = 0.65 - 0.85d_b$	$b = 0.75d_b$
$c \leq 0.25b_f$	$g \leq 0.25b_f$
$s = a + b/2$	$s = a + b/2$
$r = (4c^2 + b^2) / 8c$	$r = (4g^2 + b^2) / 8g$

Σχήμα 2.16 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά απομειωμένου τμήματος δοκού

Η εναλλακτική θεωρία RBS προσφέρει μια αποτελεσματική και πιο αξιόπιστη λεπτομέρεια για τις απαιτήσεις της υψηλής ολκιμότητας. Εξαιτίας της οικονομικότητας και της αποδεδειγμένης εμφάνισης της, η μέθοδος RBS έχει γίνει μια διάσημη μέθοδος για προστασία έναντι του σεισμού. Μέχρι σήμερα, αποτελεί τον βασικό τρόπο για την βελτιστοποίηση της σεισμικής συμπεριφοράς των συνδέσεων δοκού- υποστηλώματος μεταλλικών κατασκευών σε Αμερική και Ιαπωνία.

2.4 ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΟΚΟΥ

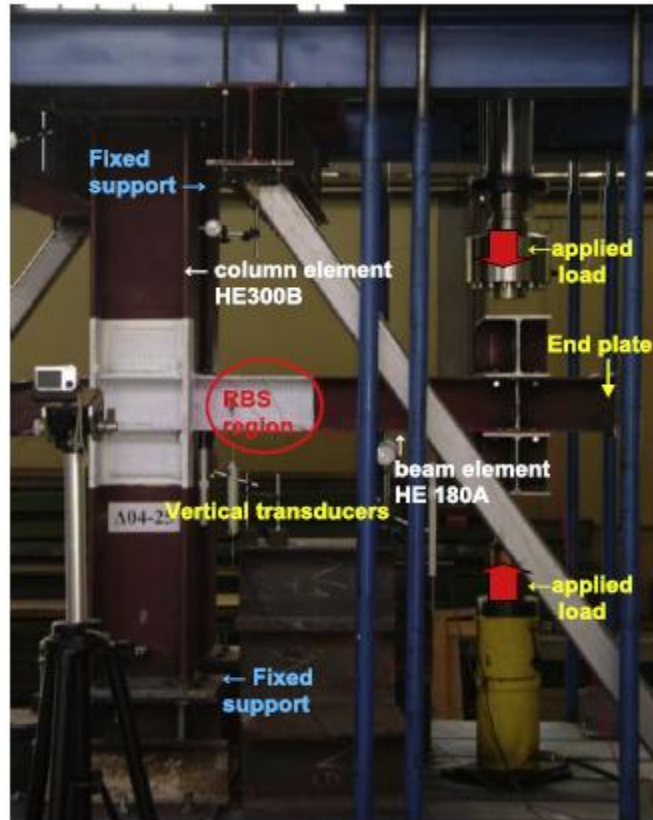
2.4.1 Cyclic performance of steel moment- resisting connections with reduced beam sections- Experimental analysis and finite element model simulation

(D.T. Pachoumis, E.G.Galoussis, C.N. Kalfas, I.Z. Efthimiou)

Η μέθοδος του απομειωμένου τμήματος δοκού (dogbone- RBS) στις συνδέσεις παραλαβής ροπών έχει αναπτυχθεί προκειμένου να παρέχει στην δοκό υψηλή ολκιμότητα. Ένα πειραματικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση των προτεινόμενων τιμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του απομειωμένου τμήματος και παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο. Δύο πλήρεις κλίμακας δείγματα RBSa και RBSb δοκιμάστηκαν υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με εκείνα που λαμβάνονται από το θεωρητικό πρότυπο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Και τα δύο δείγματα αποτελούνται από υποσύλωμα πρότυπης διατομής HEB300 και δοκό πρότυπης διατομής HEA180. Μια ισχυρή ζώνη έχει δημιουργηθεί με τη χρήση ελασμάτων ίδιου πάχους με το πάχος του πέλματος της δοκού. Το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με $E=209$ GPa, το όριο διαρροής είναι ίσο με $f_y=310$ MPa και το όριο θραύσης είναι ίσο με $f_u=430$ MPa. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομειωμένης διατομής των δειγμάτων, σύμφωνα με FEMA, είναι

	bf (mm)	db (mm)	a		b		g		s (mm)	r (mm)
			%bf	(mm)	%db	(mm)	%bf	(mm)		
RSBa	180	171	80	144	75	128,3	40	36	208,1	75,11
RSBb	180	171	40	72	60	102,6	25	22,5	123,3	69,73



Σχήμα 2.17 - Πειραματική διάταξη

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι το Abaqus. Δύο τύποι αναλύσεων διεξήχθησαν έχοντας σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Το πρώτο είναι S4R με επιφανειακά στοιχεία και το δεύτερο είναι C3D8R με συμπαγή στοιχεία.

Τα πειράματα έγιναν με την εφαρμογή κυκλικής μεταβλητής μετατόπισης της κορυφής της δοκού σε απόσταση 1m από το υποστύλωμα. Το εύρος της κυκλικής μετατόπισης που ακολουθήθηκε είναι σύμφωνα με το πρωτόκολλο φόρτισης της AICS.

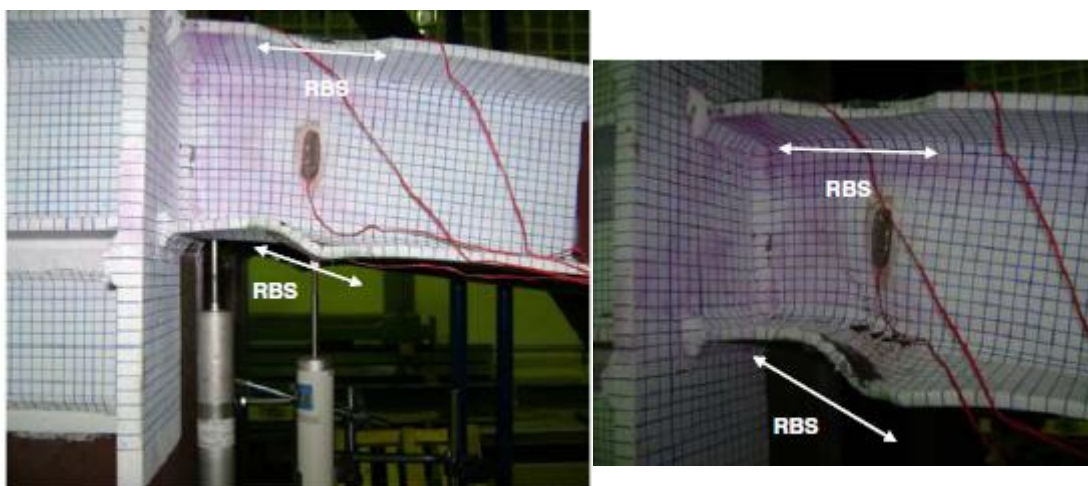


Σχήμα 2.18 - Σχεδιασμένος κάναβος στο στοιχείο

Τόσο η πειραματική όσο και η αριθμητική διαδικασία εμφάνισαν ικανοποιητικά επίπεδα ολκιμότητας στη σύνδεση. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων δεν ήταν σύμφωνα με τις προτεινόμενες υποδείξεις, η πλαστική καμπυλότητα υπέρβασε τα ανεκτά όρια των 0,03 rad χωρίς να γίνει θραύση της συγκόλλησης ή καταπόνηση του μετώπου του στύλου και στα δύο δείγματα.

Η μέθοδος της απομειωμένης διατομής μπορεί να θεωρηθεί ως μια «ασφάλεια ολκιμότητας» που αναγκάζει τη διαρροή να συμβεί στο απομειωμένο τμήμα, μια περιοχή που μπορεί να αντέξει μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις, ενώ την ίδια στιγμή περιορίζει τις τάσεις στην λιγότερο ολκιμη περιοχή κοντά στο μέτωπο του υποστυλώματος.

Τα δύο δείγματα παρουσίασαν εξαιρετική συμπεριφορά όταν υποβλήθηκαν υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι βασικές παράμετροι για το σχεδιασμό ενός απομειωμένου τμήματος δοκού που έχουν εγκριθεί από τον Ευρωκώδικα 8 πρέπει να αναπροσαρμοστούν ώστε να εφαρμόζονται με ασφάλεια στα ευρωπαϊκά πρότυπα.

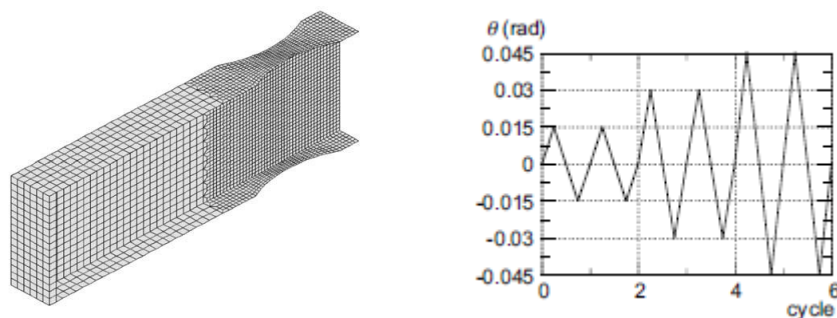


Σχήμα 2.19 - Αστοχία απομειωμένης διατομής

2.4.2 Local buckling of RBS beams subjected to cyclic loading (Feng-Xiang Li, Iori Kanao, Jun Li, Kiyotaka Morisako)

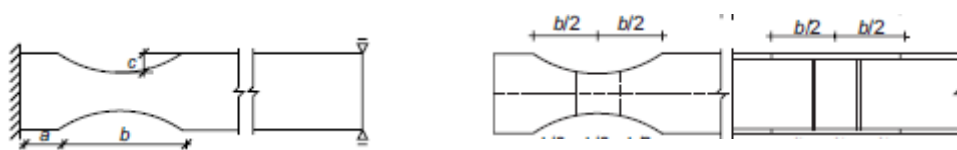
Η εργασία αυτή παρουσιάζει μία αναλυτική μελέτη της συμπεριφοράς των τοπικών ασταθειών μιας δοκού απομειωμένης διατομής που υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για αριθμητικά πειράματα χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

Το δείγμα αποτελείται από δοκό διατομής W36x150 και υποστύλωμα διατομής W14x426. Η ανάλυσή του έγινε με την εφαρμογή κυκλικής μεταβλητής μετατόπισης και χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά στοιχεία.



Σχήμα 2.20 - Μοντέλο ανάλυσης και χρονιοιστορία φόρτισης

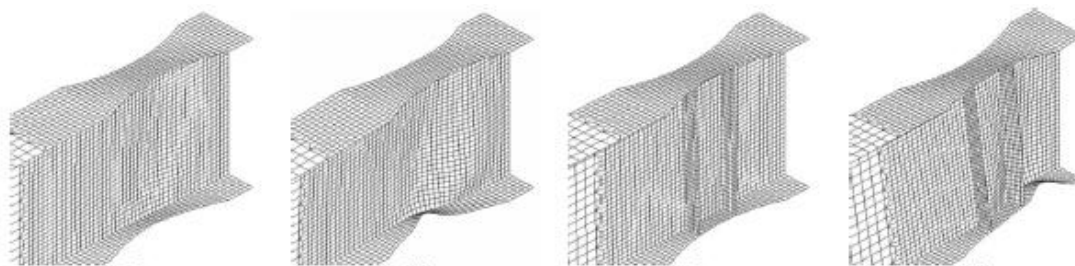
Για την αντιμετώπιση του πλευρικού λυγισμού έγινε διερεύνηση για την ενίσχυση της απομειωμένης διατομής με ελάσματα.



Σχήμα 2.21 - Κάτοψη απομειωμένης διατομής και διατομής με δύο ενισχυτικά ελάσματα

Στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση εμφανίστηκε το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής της δοκού. Αυτό δείχνει ότι ο τοπικός λυγισμός προκαλεί μείωση της αντοχής ακόμα και αν ο πλευρικός λυγισμός έχει ελαχιστοποιηθεί.

Τα ενισχυτικά ελάσματα, που τοποθετήθηκαν στο απομειωμένο τμήμα της δοκού, μπορούν αποτελεσματικά να καθυστερήσουν τον τοπικό λυγισμό και να αυξήσουν την αντοχή της δοκού.



Σχήμα 2.22 - Τοπικές παραμορφώσεις απομειωμένου τμήματος διατομής χωρίς και με ενισχυτικά ελάσματα

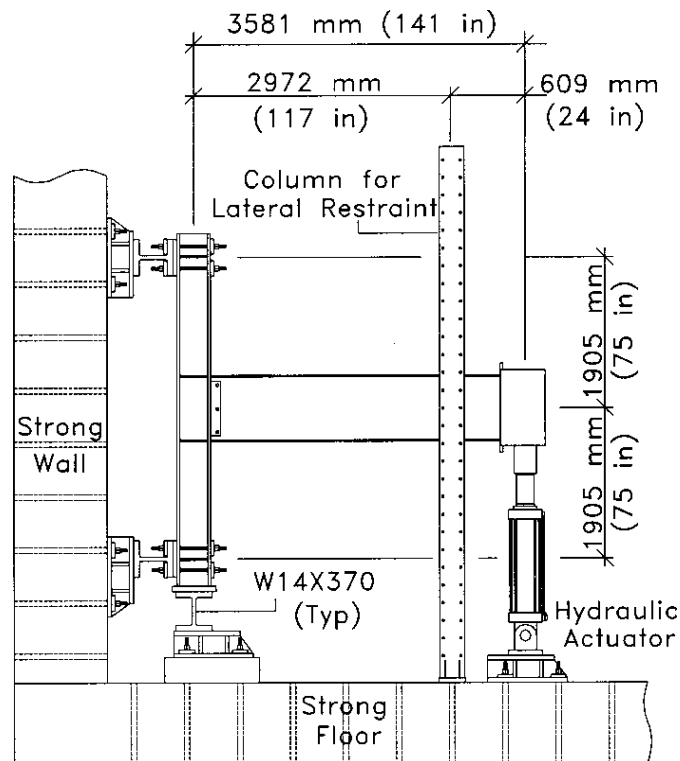
Οι δοκοί με ένα ή δύο ζευγάρια ενισχυτικών ελασμάτων αντέχουν $0,8M_p$ ενώ η δοκός με τα τρία ζευγάρια ελασμάτων παρέμεινε πάνω από $0,8M_p$ καθ' όλη την διάρκεια της φόρτισης. Το πάχος των ελασμάτων απαιτείται να είναι ίσο με το πάχος του κορμού της δοκού.

Η μέγιστη τάση των δοκών RBS με ενισχυτικά ελάσματα στο πακτωμένο άκρο είναι σχεδόν η ίδια με εκείνη των δοκών χωρίς ενίσχυση. Από την άλλη πλευρά όμως, η μέγιστη τάση των δοκών RBS με ενισχυτικά ελάσματα στο απομειωμένο τμήμα είναι μεγαλύτερη από εκείνη των δοκών χωρίς ενίσχυση. Επιπλέον, η ζώνη RBS είναι πολύ ευαίσθητη και οι δοκοί RBS με ενισχυτικά ελάσματα είναι πιθανόν να αστοχήσουν σε ψαθυρή θραύση στη περιοχή των συγκολλήσεων.

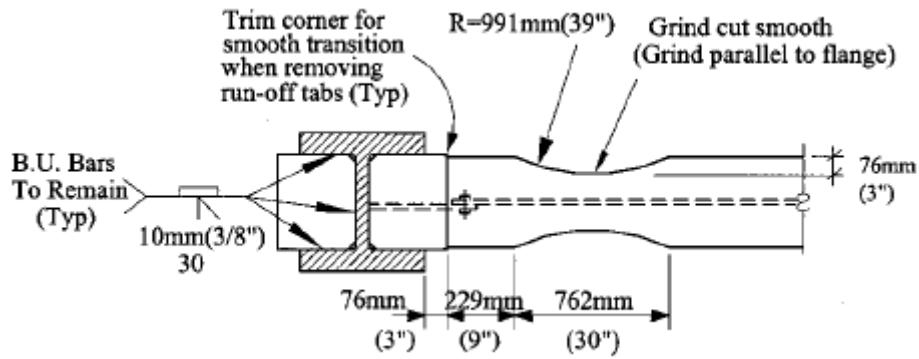
Οι αναλύσεις αυτές δείχνουν ότι μία δοκός με απομειωμένη διατομή μπορεί να ενισχυθεί αρκετά τοποθετώντας δύο ενισχυτικά ελάσματα στα όρια που χωρίζουν το απομειωμένο τμήμα σε τρεις ίσες περιοχές.

2.4.3 Cyclic response and design recommendations of weak- axis Reduced Beam Section moment connections (Chad S. Gilton, Chia- Ming Uang)

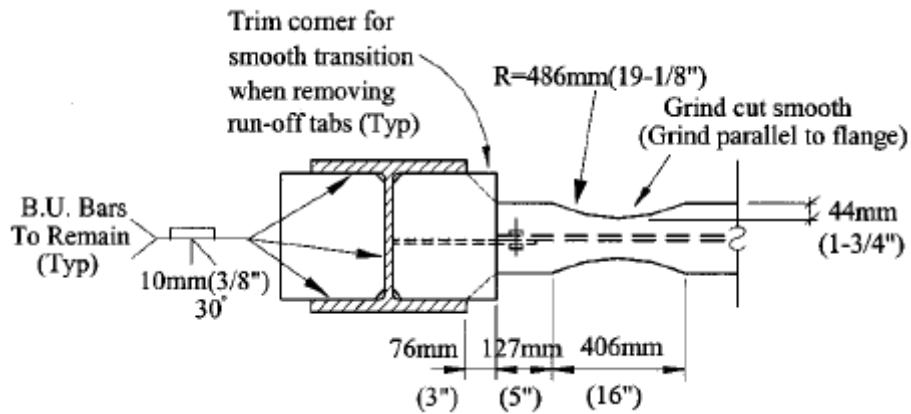
Σε προηγούμενα πειράματα σε συνδέσεις δοκών- υποστυλωμάτων παρατηρήθηκε ότι ο πιο συνηθισμένος τρόπος αστοχίας των συνδέσεων ήταν η φαθυρή αστοχία κοντά στις άκρες του πέλματος της δοκού στο σημείο της συγκόλλησης. Η αιτία ήταν η συγκέντρωση μεγάλων τάσεων εξαιτίας της δύναμης ροής προς τα δύσκαμπτα πέλματα του υποστυλώματος. Για αυτό το σκοπό, σχεδιάστηκαν δύο δείγματα, CW1 και CW2, όπως φαίνονται στα σχήματα 2.24 και 2.25. Το κάθε δείγμα υποβλήθηκε σε χρονοιστορία φόρτισης σύμφωνα με το πρωτόκολλο SAC. Μια μη γραμμική ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος της έρευνας ήταν να αναπτυχθεί μια διαδικασία σχεδιασμού για συνδέσεις δοκού- υποστυλώματος στον αδύναμο άξονα με απομείωση της διατομής της δοκού.



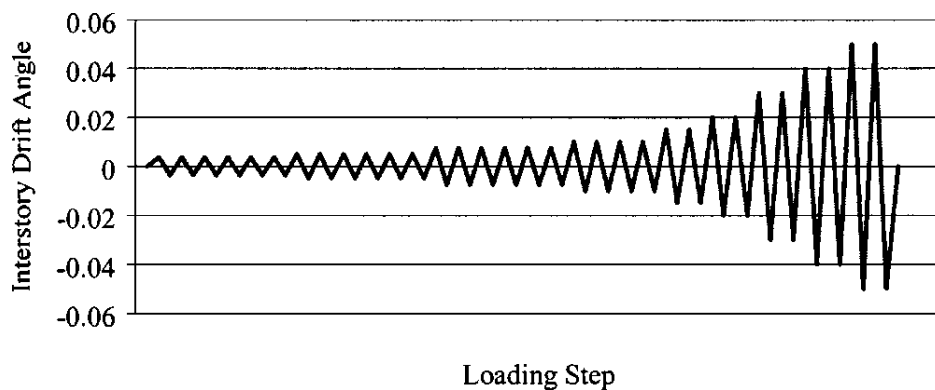
Σχήμα 2.23 - Μοντέλο ανάλυσης- Προσομοιωτής



Σχήμα 2.24 - Κάτοψη δείγματος CW1



Σχήμα 2.25 - Κάτοψη δείγματος CW2

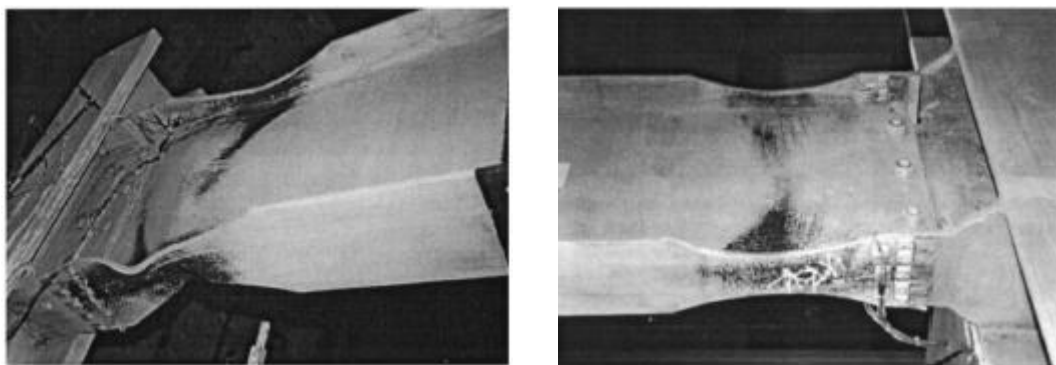


Σχήμα 2.26 - Χρονοιστορία φόρτισης

Η μέθοδος της απομειωμένης διατομής ήταν ικανή να αποτρέψει την φαθυρή αστοχία στην περιοχή των συγκολλήσεων και στις δύο συνδέσεις που εξετάζονται. Μέσα από τα αποτελέσματα της ανάλυσης διαπιστώθηκε ότι η

μέθοδος αυτή είχε τη δυνατότητα να μειώσει τη συγκέντρωση παραμορφώσεων στην άκρη του πέλματος της δοκού κοντά στο σημείο συγκόλλησης.

Τα δείγματα CW1 και CW2 έφτασαν την απαιτούμενη πλαστική καμπυλότητα των 0,03rad. Το μεγαλύτερο μέρος της διαρροής και της ανελαστικής καμπυλότητας συνέβη στην περιοχή της απομειωμένης διατομής.



Σχήμα 2.27 - Αστοχία απομειωμένου τμήματος δοκού στο δείγμα CW1 και στο CW2

Αναλυτικές μελέτες έδειξαν ότι η παρουσία ενός πλατιού ελάσματος συνέχειας είναι αναποτελεσματική στη μείωση συγκέντρωσης τάσεων στο συγκολλητό πέλμα της δοκού.

Μεταβάλλοντας το μήκος του ελάσματος, διαπιστώθηκε ότι χρειάζεται μεγαλύτερη απόσταση για τη μείωση της εφελκυστικής δύναμης που ασκείται στο πέλμα της δοκού. Έτσι, συνιστάται το έλασμα να προεξέχει τουλάχιστον 76mm από τα πέλματα του στύλου.

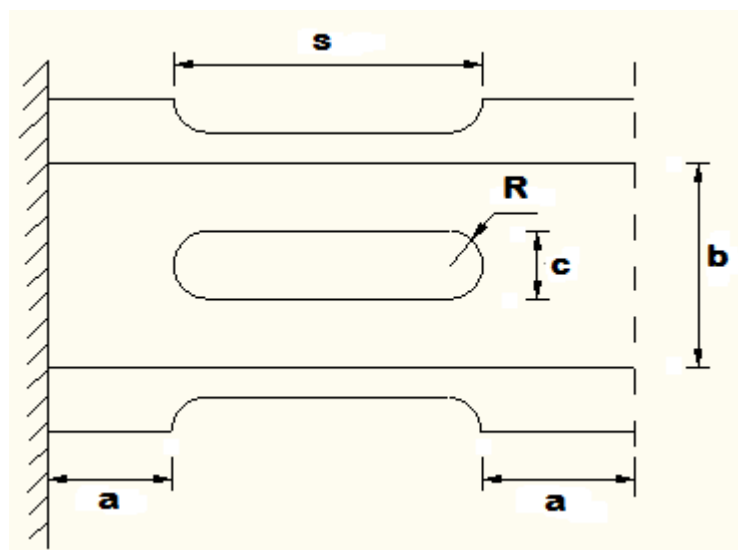
Όταν το πλάτος του πέλματος της δοκού είναι πολύ πιο στενό από το έλασμα, διαπιστώθηκε ότι κόβοντας τις γωνίες του ελάσματος για να διαμορφωθεί μία ομαλή μετάβαση στο πέλμα της δοκού, η συγκέντρωση παραμορφώσεων στην άκρη του πέλματος της δοκού στο σημείο της συγκόλλησης μειώνεται ελαφρά. Ως εκ τούτου, συνιστάται ότι, αν το πλάτος του πέλματος της δοκού είναι μικρότερο από το πλάτος του ελάσματος οι γωνίες του ελάσματος να κόβονται.

Τα αναλυτικά προσομοιώματα έδειξαν ότι το μεγαλύτερο μέρος της διάτμησης παραλαμβάνεται απο τον κορμό της δοκού. Το διάγραμμα διάτμησης της δοκού μπορεί να θεωρηθεί ως μια παραβολή που τα μέγιστα σημεία της βρίσκονται κοντά στα πέλματα της δοκού.

2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΟΚΩΝ D38/500 και D22/200

Οι δοκοί D38/500 και D22/200 θα εξεταστούν για διάφορες περιπτώσεις απομείωσης της διατομής των δοκών. Η οπή στο απομειωμένο τμήμα είναι κυκλικής μορφής και σχηματίζεται συμμετρικά στη μέση του άνω πέλματος και συμμετρικά στις δύο άκρες του κάτω πέλματος για κατασκευαστικούς λόγους όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι γεωμετρικοί περιορισμοί για τη διάνοιξη των οπών είναι οι εξής:

- $0.1b \leq c \leq 0.4b$
- $R = 0.2b$
- $b/2 \leq a \leq 3b/4$
- $0.65h \leq s \leq 0.85h$



Σχήμα 2.28 - Κάτοψη απομειωμένου τμήματος δοκού

Το κρίσιμο μήκος είναι ίσο με $L_{cr} = a + s + a$

Στην πρώτη περίπτωση θα μελετήσουμε την δοκό για μήκος οπής $s=0.65h$, στην δεύτερη περίπτωση για $s=0.75h$ και στην τρίτη για $s=0.85h$.

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της μεθόδου RBS και τους γεωμετρικούς περιορισμούς κατασκευάσαμε συνολικά τρεις διαφορετικές δοκούς. Το πλάτος της ζώνης χωρίς οπή a το παίρνουμε ίσο με $3b/4$.

Για τη δοκό **D38/500**, τα χαρακτηριστικά μεγέθη της απομειωμένης διατομής και του απομειωμένου τμήματος είναι:

	s=0.65h	s=0.75h	s=0.85h
Πλάτος άνω πέλματος b	0,280	0,280	0,280
Ζώνη χωρίς οπή a	0,200	0,200	0,200
Πλάτος της οπής c	0,112	0,112	0,112
Ακτίνα της οπής R	0,056	0,056	0,056
Μήκος της οπής s	0,231	0,266	0,302
Κρίσιμο μήκος Lcr	0,631	0,666	0,703

Πίνακας 2.1 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομειωμένης διατομής της δοκού D38/500

Για τη δοκό **D22/200**, τα χαρακτηριστικά μεγέθη της απομειωμένης διατομής και του απομειωμένου τμήματος είναι:

	s=0.65h	s=0.75h	s=0.85h
Πλάτος άνω πέλματος b	0,100	0,100	0,100
Ζώνη χωρίς οπή a	0,069	0,069	0,069
Πλάτος της οπής c	0,037	0,037	0,037
Ακτίνα της οπής R	0,018	0,018	0,018
Μήκος της οπής s	0,129	0,149	0,169
Κρίσιμο μήκος Lcr	0,267	0,287	0,307

Πίνακας 2.2 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομειωμένης διατομής της δοκού D22/200

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Αρχικά, καθορίζουμε το υλικό κατασκευής, δηλαδή το χάλυβα ποιότητας **S355J2+N** μέσω της εντολής **Define Materials**. Ονομάζουμε το υλικό S355 και καθορίζουμε τα χαρακτηριστικά του:

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: S355

Material Type: Steel

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 78,5

Mass per Unit Volume: 8,0048

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,100E+08

Poisson's Ratio, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 80769231

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 355000

Minimum Tensile Stress, Fu: 537000

Effective Yield Stress, Fye: 355000

Effective Tensile Stress, Fue: 537000

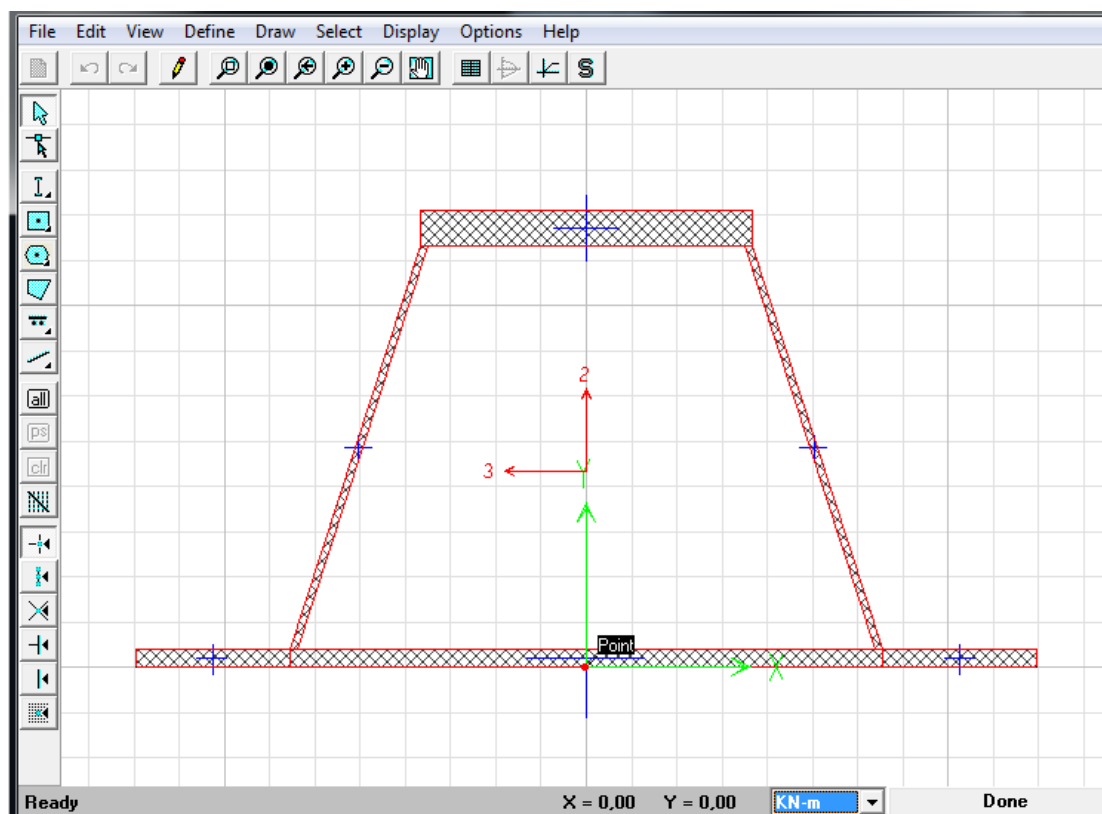
Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

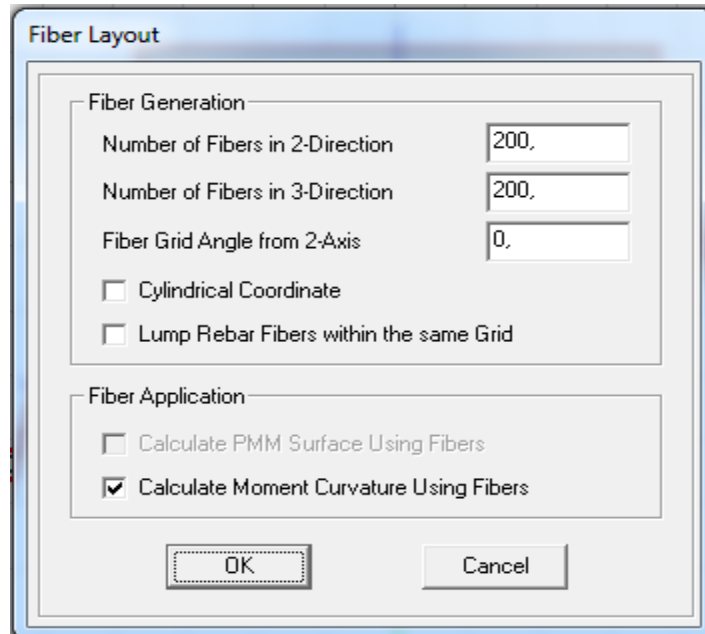
Σχήμα 3.1 - Ορισμός γραμμικού υλικού

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Αφού έχουμε καθορίσει το υλικό, καθορίζουμε και τις διατομές των δοκών. Το πρόγραμμα παρέχει κάποιες πρότυπες διατομές χάλυβα. Αυτές όμως, δεν επαρκούν για την περιγραφή των delta δοκών. Έτσι, οι διατομές ορίστηκαν με τη χρήση του υποπρογράμματος **Section Designer** του SAP2000, με το οποίο έχουμε δυνατότητα να σχεδιάσουμε διατομή οποιασδήποτε μορφής. Στο υποπρόγραμμα, οι διατομές χωρίστηκαν σε 40000 στοιχεία (200 στην κατεύθυνση 2 και 200 στην κατεύθυνση 3) μέσω της εντολής **Define -> Fiber Layout**, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2 - Σχεδιασμός διατομής στο Section Designer

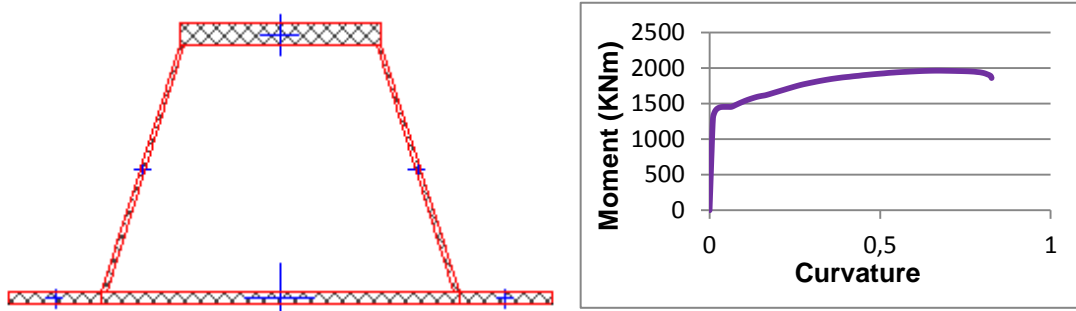


Σχήμα 3.3 - Ορισμός στοιχείων διατομής στο Section Designer

Θα εξετάσουμε την διατομή για τέσσερα διαφορετικά πλάτη οπής: $c=0.1b$, $c=0.2b$, $c=0.3b$ και $c=0.4b$. Καθώς μεγαλώνει το πλάτος της, τόσο και μειώνεται η ροπή αντοχής. Παρακάτω παρατίθενται οι διατομές όπως αυτές ορίστηκαν στο Section Designer και ακριβώς δίπλα τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων.

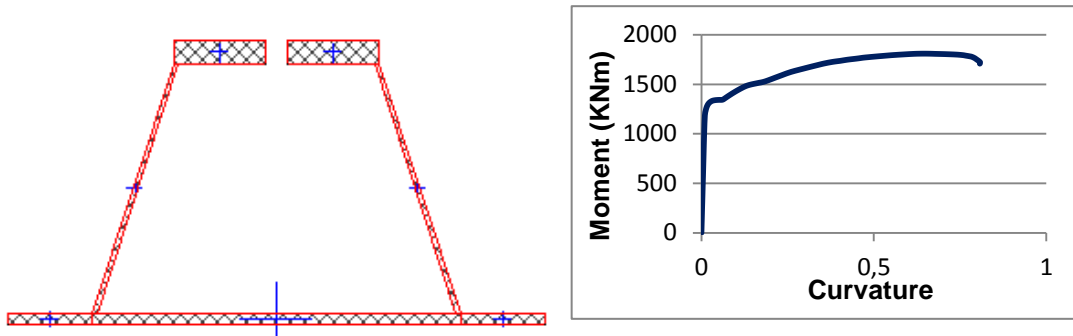
Για την δοκό **D38/500** έχουμε:

Διατομή χωρίς οπή:



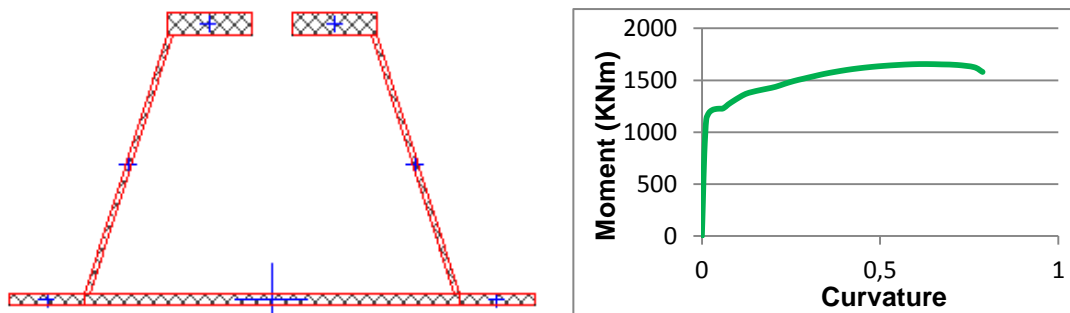
Σχήμα 3.4 - Διατομή χωρίς οπή $c=0.0b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.1b$:



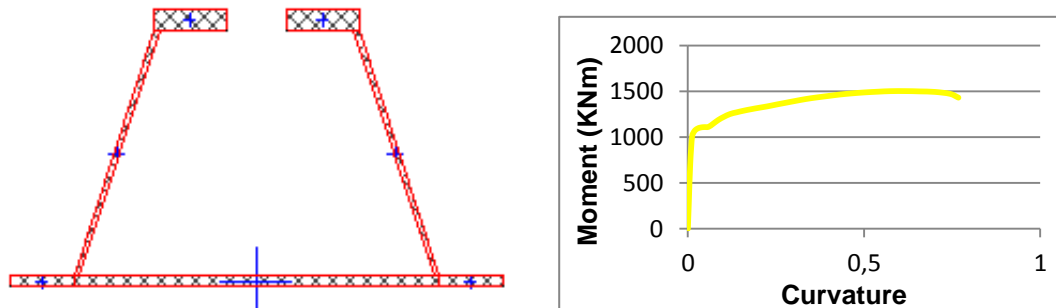
Σχήμα 3.5 - Διατομή με πλάτος οπής $c=0.1b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.2b$:



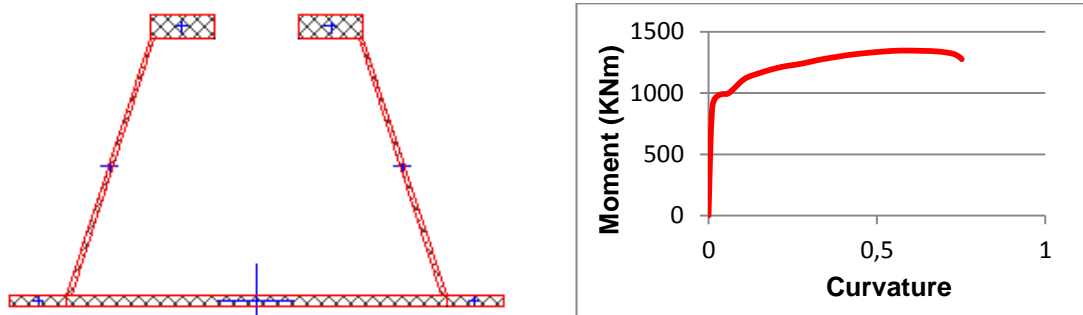
Σχήμα 3.6 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.2b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.3b$:



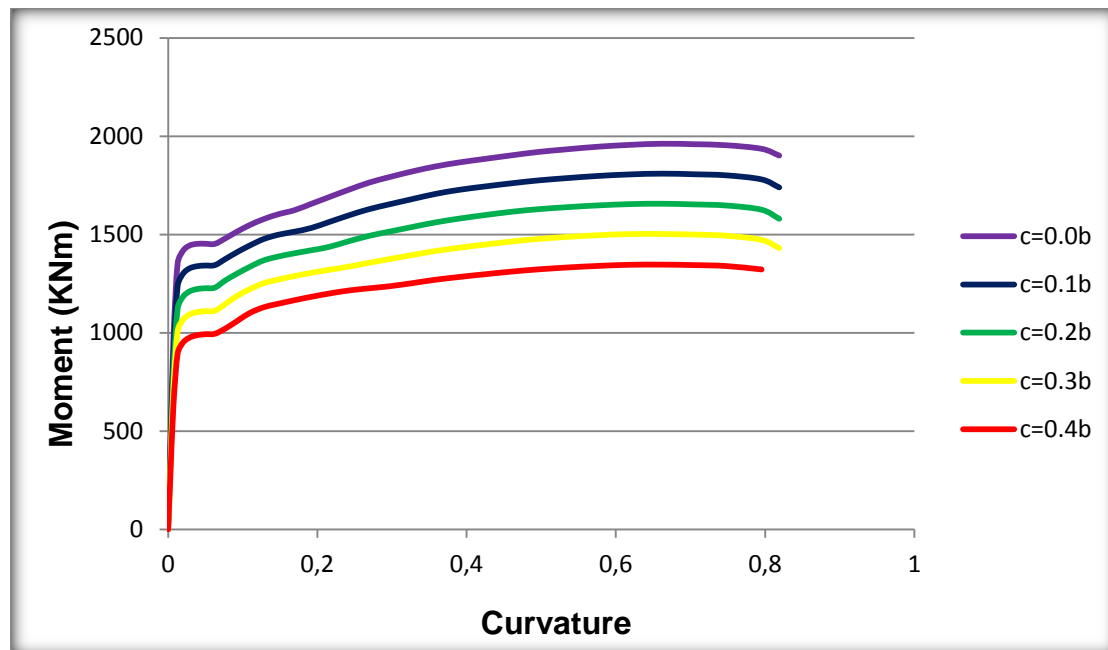
Σχήμα 3.7 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.3b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.4b$:



Σχήμα 3.8 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.4b$ και διάγραμμα M-φ

Στο σχήμα 3.9 απεικονίζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων για τη δοκό D38/500. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το μέγεθος της οπής στα πέλματα της δοκού, τόσο μικραίνει η ροπή αντοχής της δοκού.



Σχήμα 3.9 - Συγκεντρωτικό διάγραμμα M-φ για δοκό D38/500

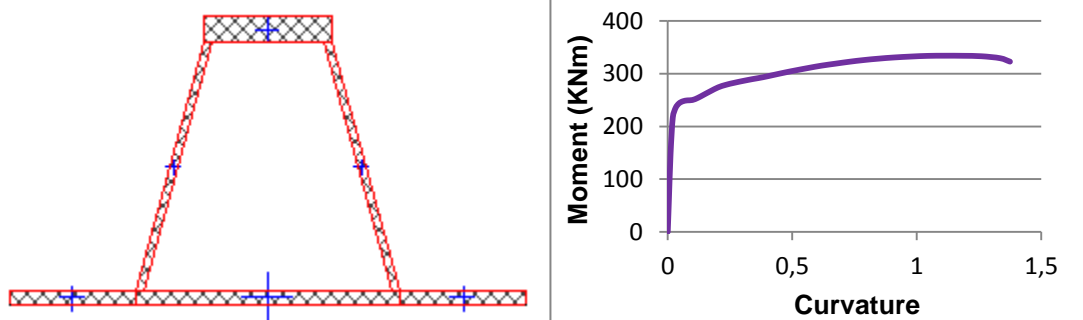
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται, για τη δοκό D38/500 τα ζεύγη τιμών ροπών-καμπυλοτήτων για τα σημεία όπου έχουμε μέγιστη ροπή. Παρουσιάζονται ακόμη οι τιμές της μέγιστης καμπυλότητας στα σημεία αστοχίας και για τις πέντε διαφορετικές διατομές.

	Μέγιστη ροπή Mmax (KNm)	Καμπυλότητα φ για Mmax (rad)	Μέγιστη καμπυλότητα φmax (rad)
c=0.0b	1961,6	0,67	0,83
c=0.1b	1809,4	0,65	0,81
c=0.2b	1656,4	0,63	0,79
c=0.3b	1502,6	0,62	0,77
c=0.4b	1346,8	0,60	0,75

Πίνακας 3.1 – Τιμές ροπών- καμπυλοτήτων για τα διαφορετικά είδη ροπών

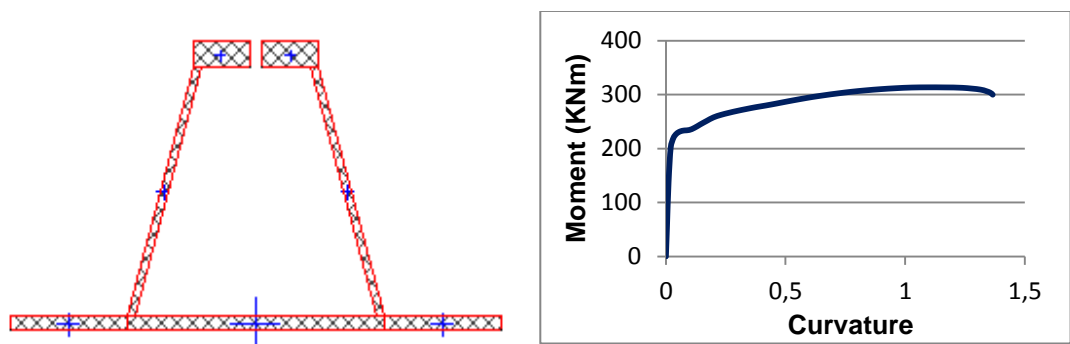
Για τη δοκό **D22/200** έχουμε:

Διατομή χωρίς οπή:



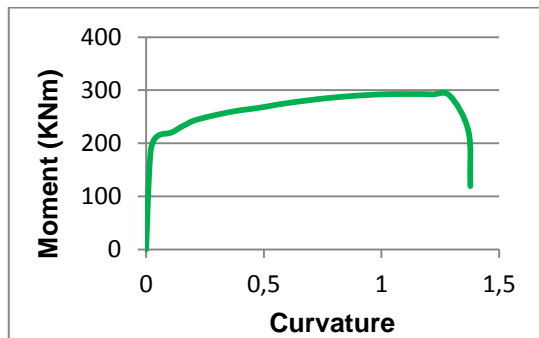
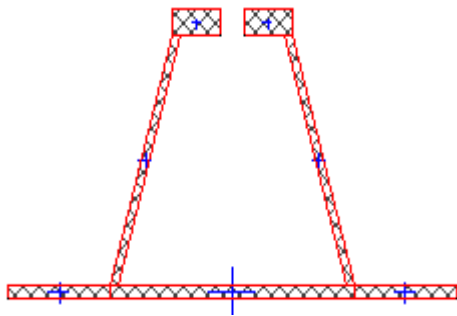
Σχήμα 3.10 - Διατομή χωρίς οπή $c=0.0b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.1b$:



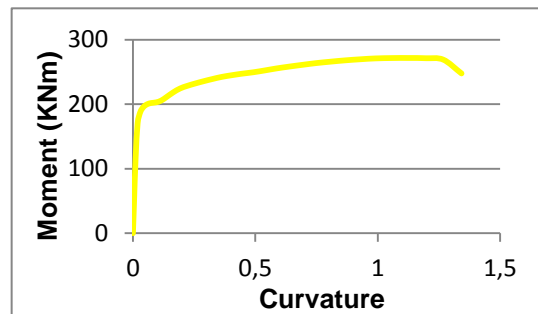
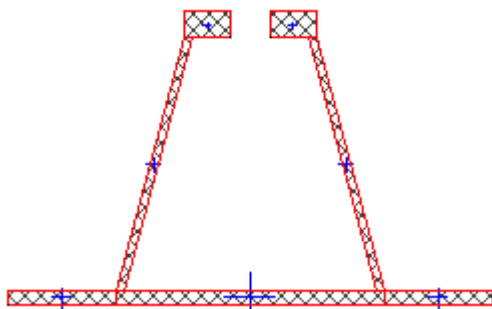
Σχήμα 3.11 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.1b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.2b$:



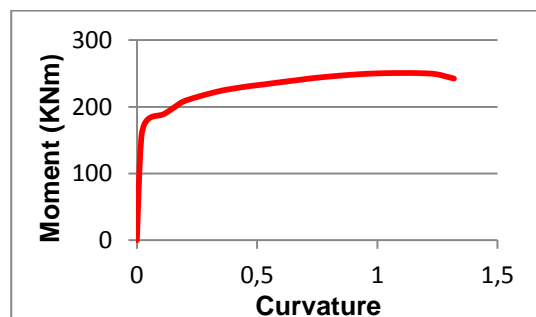
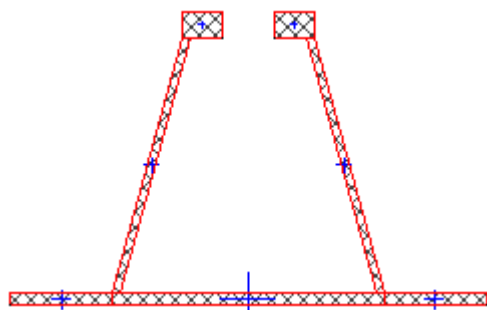
Σχήμα 3.12 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.2b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.3b$:



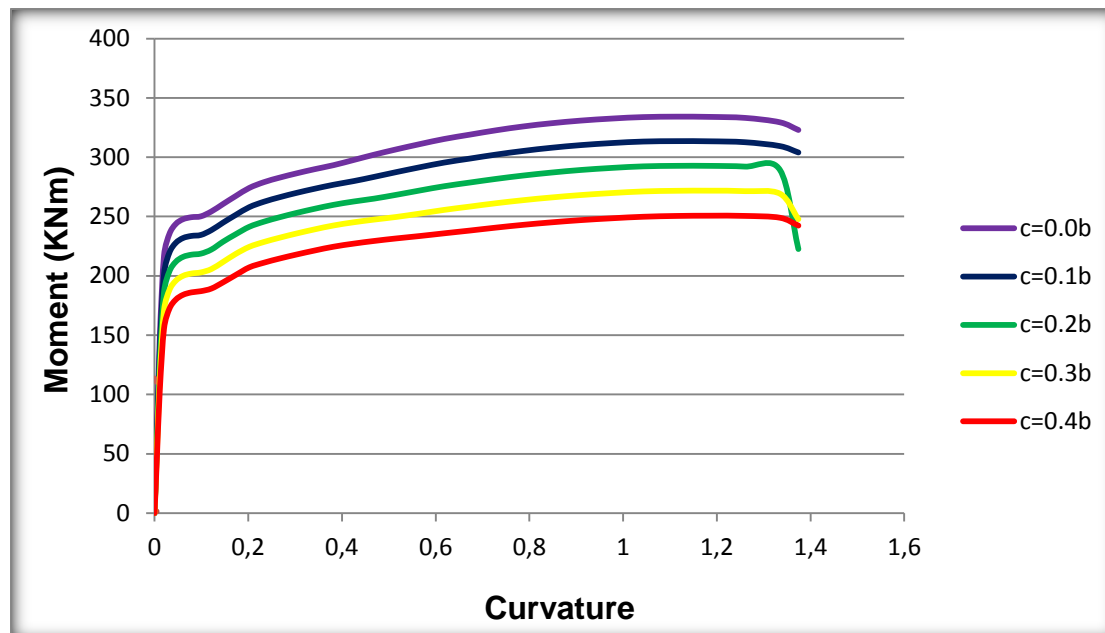
Σχήμα 3.13 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.3b$ και διάγραμμα M-φ

Απομειωμένη διατομή με πλάτος οπής $c=0.4b$:



Σχήμα 3.14 - Διατομή πλάτος οπής $c=0.4b$ και διάγραμμα M-φ

Στο σχήμα 3.15 απεικονίζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων για τη δοκό D22/200. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το μέγεθος της οπής στα πέλματα της δοκού, τόσο μικραίνει η ροπή αντοχής της δοκού.



Σχήμα 3.15 - Συγκεντρωτικό διάγραμμα M-φ για δοκό D22/200

Στον παρακάτω πίνακα, αντίστοιχα, παρουσιάζονται, για τη δοκό D22/200, τα ζεύγη τιμών ροπών-καμπυλοτήτων για τα σημεία όπου έχουμε μέγιστη ροπή. Παρουσιάζονται ακόμη οι τιμές της μέγιστης καμπυλότητας στα σημεία αστοχίας και για τις πέντε διαφορετικές διατομές.

	Μέγιστη ροπή Mmax (KNm)	Καμπυλότητα φ για Mmax (rad)	Μέγιστη καμπυλότητα φmax (rad)
c=0.0b	334,2	1,11	1,37
c=0.1b	313,5	1,09	1,35
c=0.2b	292,7	1,07	1,37
c=0.3b	271,8	1,13	1,34
c=0.4b	250,7	1,11	1,32

Πίνακας 3.2 - Τιμές ροπών-καμπυλοτήτων για τα διαφορετικά είδη ροπών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

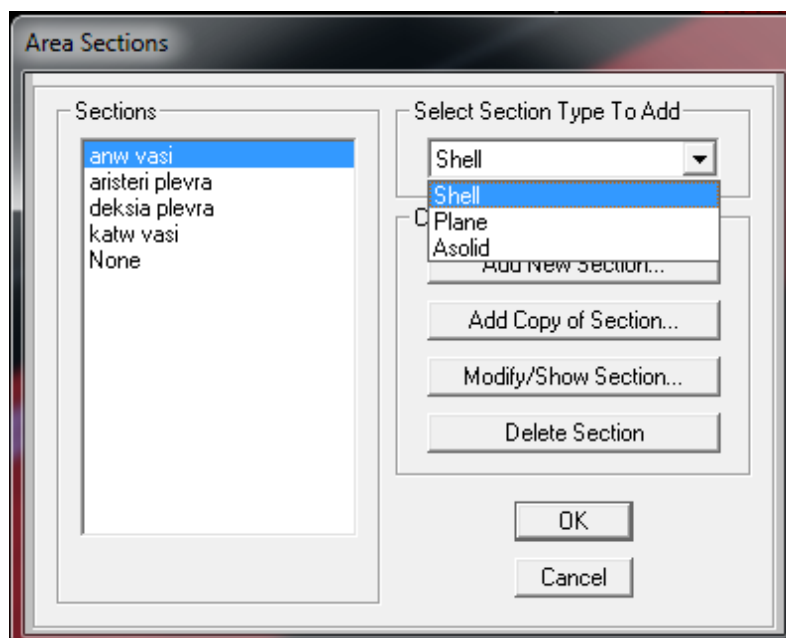
ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Αρχικά, θα ασχοληθούμε με τη δοκό D38/500, που θα μελετηθεί για τέσσερις περιπτώσεις. Η πρώτη δοκός είναι χωρίς οπές στο κρίσιμο μήκος, η δεύτερη δοκός είναι με οπή μήκους $s=0.65h$, η τρίτη είναι με οπή μήκους $s=0.75h$ και η τέταρτη με οπή $s=0.85h$.

Εισάγουμε τα τέσσερα προσομοιώματα των δοκών στο πρόγραμμα SAP2000 της CSI Berkeley, υπό την μορφή επιφανειακών στοιχείων. Η πρώτη δοκός αποτελείται από 2094 επιφανειακά στοιχεία (shell elements) και 2222 κόμβους. Η δεύτερη δοκός ($s=0.65h$) αποτελείται κι αυτή από 2094 επιφανειακά στοιχεία και 2222 κόμβους. Η τρίτη δοκός ($s=0.75h$) αποτελείται από 2040 επιφανειακά στοιχεία και 2166 κόμβους. Τέλος, η τέταρτη ($s=0.85h$) αποτελείται από 2064 επιφανειακά στοιχεία και 2191 κόμβους.

Ο καθορισμός των στοιχείων ως επιφανειακών γίνεται μέσω της εντολής **Define -> Section Properties -> Area Sections**. Επιλέγουμε ως section type το **shell** όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 - Ορισμός area sections στο SAP

Καθορίζουμε για κάθε Section (δηλαδή την άνω βάση, την κάτω βάση, την αριστερή και δεξιά πλευρά) το τύπο του Shell ως **Shell- Thin**, το υλικό και το πάχος κάθε section, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Οι τέσσερις δοκοί πακτώνονται στο ένα άκρο και λειτουργούν πλέον ως πρόβολοι. Το μήκος του κάθε προβόλου είναι 3,5m, δηλαδή το μισό της συνολικής δοκού, για λόγους οικονομίας στην ανάλυση.

The image shows a software dialog box titled "Shell Section Data". It contains the following fields and controls:

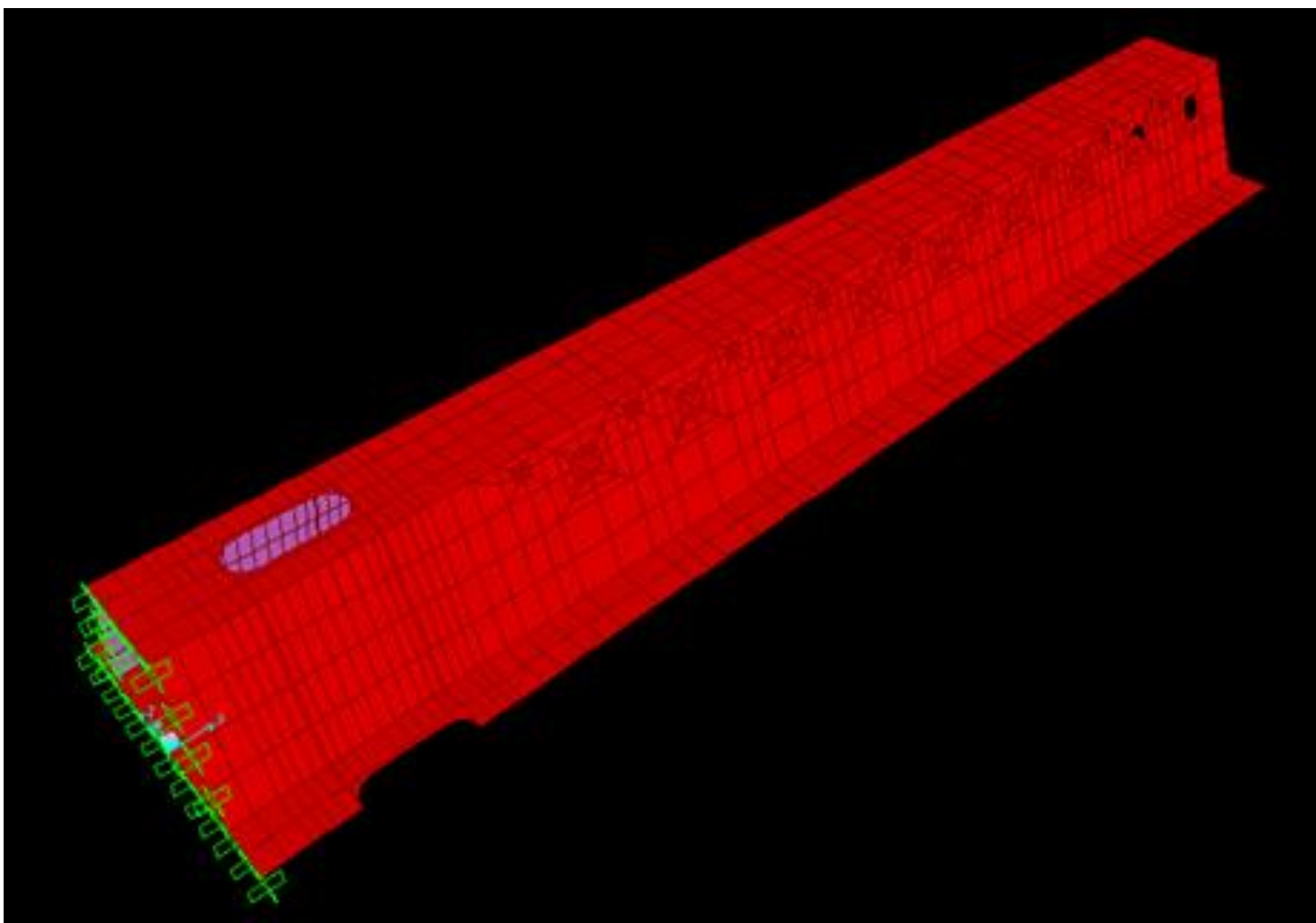
- Section Name:** Text input field containing "anw vasi".
- Section Notes:** Button labeled "Modify/Show...".
- Display Color:** A green square indicator.
- Type:** Radio button group with options: Shell - Thin (selected), Shell - Thick, Plate - Thin, Plate Thick, Membrane, and Shell - Layered/Nonlinear. Below the group is a button labeled "Modify/Show Layer Definition...".
- Material:** "Material Name" dropdown menu showing "S355" with a "+" icon to its left. "Material Angle" text input field containing "0".
- Thickness:** "Membrane" text input field containing "0,03". "Bending" text input field containing "0,03".
- Concrete Shell Section Design Parameters:** Button labeled "Modify/Show Shell Design Parameters...".
- Stiffness Modifiers:** Button labeled "Set Modifiers...".
- Temp Dependent Properties:** Button labeled "Thermal Properties...".
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons at the bottom.

Σχήμα 4.2 - Ορισμός shell section στο SAP

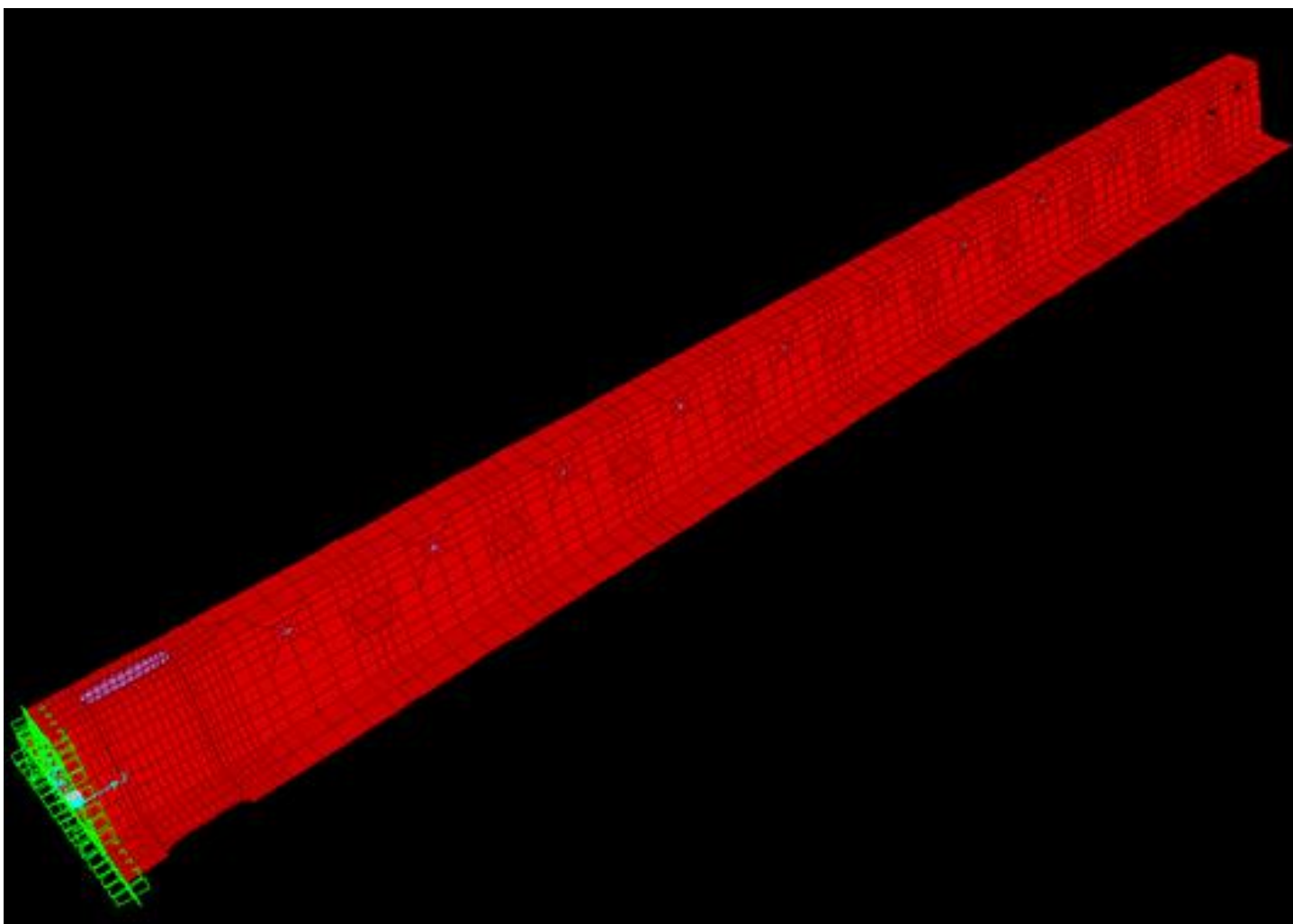
Στη συνέχεια, κάνουμε ελαστική ανάλυση των δοκών εφαρμόζοντας το κριτήριο διαρροής Von Mises. Φορτίζουμε το ελεύθερο άκρο κάθε δοκού με ένα συγκεντρωμένο αρχικό φορτίο. Ορίζουμε την τάση διαρροής ίση με 355 MPa και σταδιακά αυξάνουμε το φορτίο μέχρι να διαρρεύσει μεγάλο τμήμα της δοκού, δηλαδή οι τάσεις Von Mises να ξεπεράσουν το όριο διαρροής. Από εκείνο το φορτίο και έπειτα η ελαστική ανάλυση δεν είναι αξιόπιστη.

Ομοίως, η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την μικρότερη δοκό D22/200. Θα μελετηθεί κι αυτή για τέσσερα διαφορετικά μήκη οπών: την δοκό χωρίς οπές στο κρίσιμο μήκος, την απομειωμένη δοκό με μήκος οπής $s=0.65h$, την απομειωμένη δοκό με μήκος οπής $s=0.75h$ και την δοκό με οπή $s=0.85h$. Η πρώτη δοκός αποτελείται από 3424 επιφανειακά στοιχεία και 3528 κόμβους, η δεύτερη αποτελείται από 3414 επιφανειακά στοιχεία, η τρίτη από 3424 επιφανειακά στοιχεία και 3541 κόμβους και τέλος, η τέταρτη από 3496 επιφανειακά στοιχεία και 3615 κόμβους. Οι τέσσερις δοκοί πακτώνονται στο ένα άκρο λειτουργώντας ως πρόβολοι. Ορίζονται τα επιφανειακά στοιχεία τους ως shell-thin, όπως ακριβώς έγινε με τη δοκό D38/500.

Στα σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο τύποι δοκών.



Σχήμα 4.3 - Προσομοίωμα δοκού D38/500 με σπή $s=0.75h$



Σχήμα 4.4 - Προσομοίωμα δοκού D38/500 με σπή $s=0.75h$

4.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ VON MISES

Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας είναι αυτό του Von Mises. Το κριτήριο διαρροής Von Mises (1909) λέει ότι η διαρροή των υλικών αρχίζει όταν η δεύτερη αναλλοίωτη του αποκλίνοντα τανυστή τάσεων J_2 πάρει μια κρίσιμη τιμή k . Για αυτό το λόγο, μερικές φορές ονομάζεται θεωρία της J_2 πλαστιμότητας. Είναι μέρος μιας θεωρίας που ισχύει για τα όλκιμα υλικά, όπως τα μέταλλα. Πριν την αστοχία, το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων του υλικού θεωρείται ότι είναι ελαστικό.

Στην επιστήμη των υλικών και της μηχανικής το κριτήριο διαρροής Von Mises μπορεί επίσης να διατυπωθεί ως Von Mises τάση ή ως ισοδύναμη εφελκυστική τάση, σ_v , ένα βαθμωτό μέγεθος που μπορεί να υπολογιστεί από τον τανυστή τάσης. Σε αυτή την περίπτωση, ένα υλικό αρχίζει να διαρρέει όταν η τάση σ_v φτάσει μια κρίσιμη τιμή, ονομαζόμενη ως αντοχή διαρροής, σ_y .

Η τάση σ_v χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαρροή των υλικών υπό μονοαξονικό εφελκυσμό κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες φόρτισης. Επειδή το κριτήριο διαρροής Von Mises είναι ανεξάρτητο από την πρώτη αμετάβλητη τάση I_1 , εφαρμόζεται για μη γραμμικές αναλύσεις όλκιμων υλικών όπως τα μέταλλα. Η αρχή της διαρροής γι' αυτά τα μέταλλα δεν εξαρτάται από την υδροστατική συνιστώσα του τανυστή τάσης.

Αναλυτικά η συνάρτηση διαρροής κατά Von Mises εκφράζεται ως:

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - k = 0$$

Μία εναλλακτική μορφή είναι η εξής:

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0$$

,όπου k το όριο ελαστικότητας του υλικού σε καθαρή διάτμηση. Το μέγεθος της διατμητικής τάσης κατά την αστοχία σε καθαρή διάτμηση είναι $\sqrt{3}$ φορές μικρότερη από την τάση εφελκυσμού κατά την αστοχία σε περίπτωση των απλών εντάσεων. Έτσι, έχουμε

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

Επιπλέον, αν ορίσουμε την τάση von Mises, ως $\sigma_v = \sqrt{3J_2}$

το von Mises κριτήριο διαρροής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned} f(J_2) &= \sqrt{3J_2} - \sigma_y \\ &= \sigma_v - \sigma_y = 0 \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας το J_2 , όσον αφορά τις κύριες τάσεις στην εξίσωση του κριτηρίου von Mises έχουμε

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 6k^2 = 2\sigma_y^2$$

ή

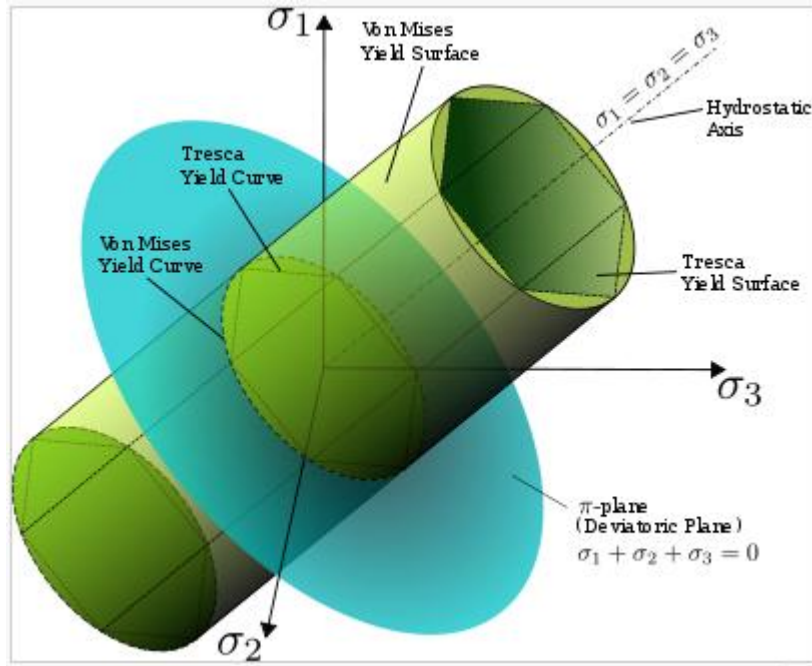
$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3 = 3k^2 = \sigma_y^2$$

ή σε συνάρτηση με τις συνιστώσες του τανυστή τάσεων

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) = 6k^2 = 2\sigma_y^2$$

Η εξίσωση αυτή καθορίζει την επιφάνεια διαρροής ως ένα κυκλικό κύλινδρο (βλ. Σχήμα 4.4) του οποίου η καμπύλη διαρροής είναι ένας κύκλος με ακτίνα $\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y$ ή $\sqrt{2}k$

Αυτό σημαίνει ότι η κατάσταση διαρροής είναι ανεξάρτητη από τις υδροστατικές τάσεις.



Σχήμα 4.5 - Η επιφάνεια διαρροής Von Mises

- **Κριτήριο Von Mises για διαφορετικές συνθήκες τάσεων**

Στην περίπτωση μονοαξονικών τάσεων ή απλών εντάσεων, $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$, το κριτήριο von Mises μειώνει σε $\sigma_1 = \sigma_y$. Επομένως, το υλικό αρχίζει να διαρρέει, όταν η σ_1 φτάσει το όριο ελαστικότητας σ_y , το οποίο είναι χαρακτηριστικό του υλικού. Στην πράξη, αυτή η παράμετρος προσδιορίζεται πειραματικά με το υλικό να υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Επίσης, είναι εύκολο για να καθορίσουμε την ισοδύναμη εφελκυστική τάση ή αλλιώς την τάση von Mises, σ_v , η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαρροή των υλικών υπό συνθήκες πολυαξονικής φόρτισης χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα απλού μονοαξονικού εφελκυσμού.

Έτσι, ορίζεται

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \sqrt{3J_2} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij}s_{ji}}\end{aligned}$$

,όπου s_{ij} είναι τα στοιχεία του τανυστή τάσεων σ^{dev}

$$\sigma^{dev} = \sigma - \frac{1}{3} (\sigma \cdot \mathbf{I}) \mathbf{I}$$

Στην περίπτωση αυτή, η διαρροή συμβαίνει όταν η αντίστοιχη τάση, σ_v , φτάνει το όριο της ελαστικότητας του υλικού υπό απλή ένταση, σ_y . Για παράδειγμα, η κατάσταση των τάσεων μιας μεταλλικής δοκού σε συμπίεση διαφέρει από την κατάσταση των τάσεων ενός μεταλλικού άξονα υπό στρέψη, έστω και αν τα δύο δείγματα είναι από το ίδιο υλικό. Στον τανυστή τάσεων, ο οποίος περιγράφει πλήρως την κατάσταση των τάσεων, η διαφορά αυτή εκδηλώνεται σε έξι βαθμούς ελευθερίας γιατί ο τανυστής τάσεων έχει έξι ανεξάρτητες συνιστώσες. Συνεπώς, είναι δύσκολο να πει κανείς ποιο από τα δύο δείγματα είναι πιο κοντά στο όριο διαρροής ή ακόμη και να το έχει φτάσει. Ωστόσο, με τη βοήθεια του κριτηρίου Von Mises, το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή των μονοδιάστατων τάσεων Von Mises, δηλαδή ενός βαθμού ελευθερίας, η σύγκριση είναι απλή: Μια μεγαλύτερη τιμή von Mises σημαίνει ότι το υλικό είναι πιο κοντά στο σημείο διαρροής.

Στην περίπτωση καθαρής διάτμησης, $\sigma_{12} = \sigma_{21} \neq 0$

ενώ όλες οι άλλες $s_{ij} = 0$, το κριτήριο von Mises γίνεται: $\sigma_{12} = k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$

Αυτό σημαίνει ότι, κατά την εκδήλωση της διαρροής, το μέγεθος της διατμητικής τάσης σε καθαρή διάτμηση είναι χαμηλότερο από την τάση εφελκυσμού στην περίπτωση της απλής έντασης.

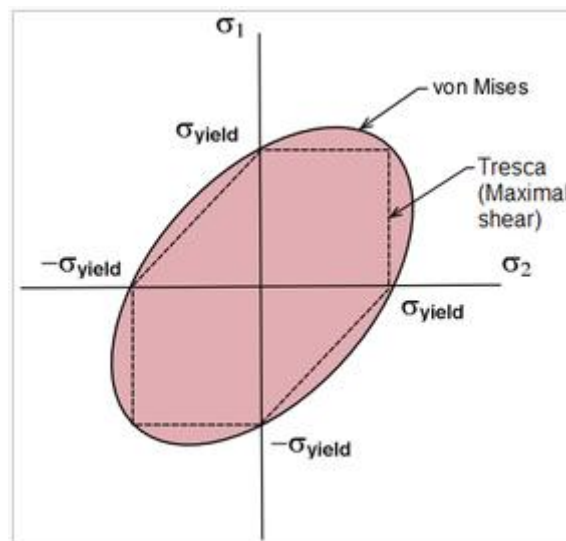
Το κριτήριο διαρροής Von Mises για την καθαρή διατμητική τάση, εκφράζεται σε κύριες τάσεις, οι οποίες είναι:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 6\sigma_{12}^2$$

Στην περίπτωση του επιπέδου των τάσεων, $\sigma_3 = 0$, το κριτήριο Von Mises γίνεται:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = 3k^2 = \sigma_y^2$$

Η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει μια έλλειψη εντός του επιπέδου $\sigma_1 - \sigma_2$, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.6 - Κριτήριο διαρροής Von Mises στο επίπεδο σ_1 - σ_2

- **Φυσική ερμηνεία του κριτηρίου διαρροής Von Mises**

Ο Hencky, το 1994, προσέφερε μια φυσική ερμηνεία του κριτηρίου Von Mises υποδεικνύοντας ότι η διαρροή ξεκινάει όταν η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή. Γι' αυτό, το κριτήριο του Von Mises είναι επίσης γνωστό ως το ανώτερο κριτήριο ενέργειας παραμορφώσεως. Αυτό προέρχεται από τη σχέση μεταξύ του J_2 και της ελαστικής ενέργειας παραμορφώσεως των στρεβλώσεων W_D :

$$W_D = \frac{J_2}{2G}$$

, όπου το ελαστικό μέτρο διάτμησης είναι ίσο με

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

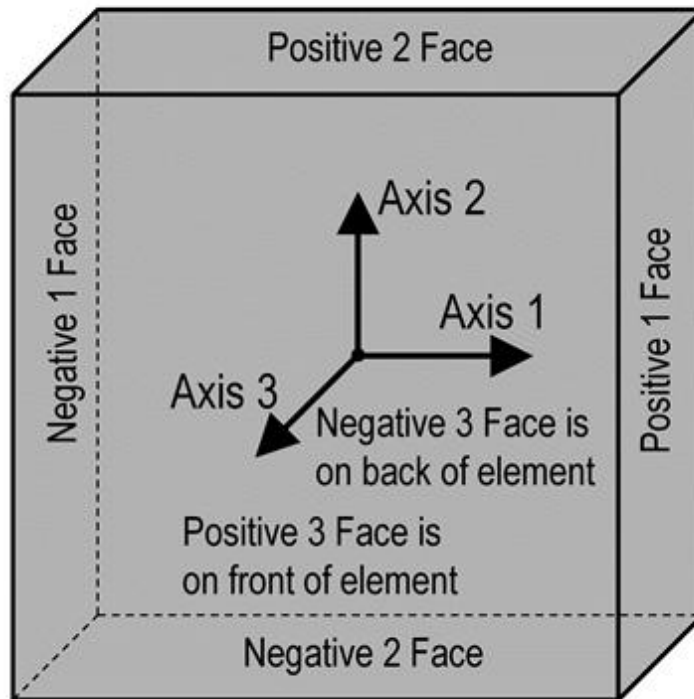
Το 1937 ο Arpad L. Nadai πρότεινε ότι η διαρροή αρχίζει όταν η οκταεδρική διατμητική τάση φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή. Σε αυτή την περίπτωση, το κριτήριο διαρροής Von Mises είναι επίσης γνωστό ως το ανώτερο οκταεδρικό κριτήριο διατμητικής τάσης λόγω της άμεσης αναλογικότητας που υπάρχει μεταξύ του J_2 και της οκταεδρικής διατμητικής τάσης, τ_{oct} που ορίζεται ως

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}J_2}$$

Έτσι έχουμε: $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_y$

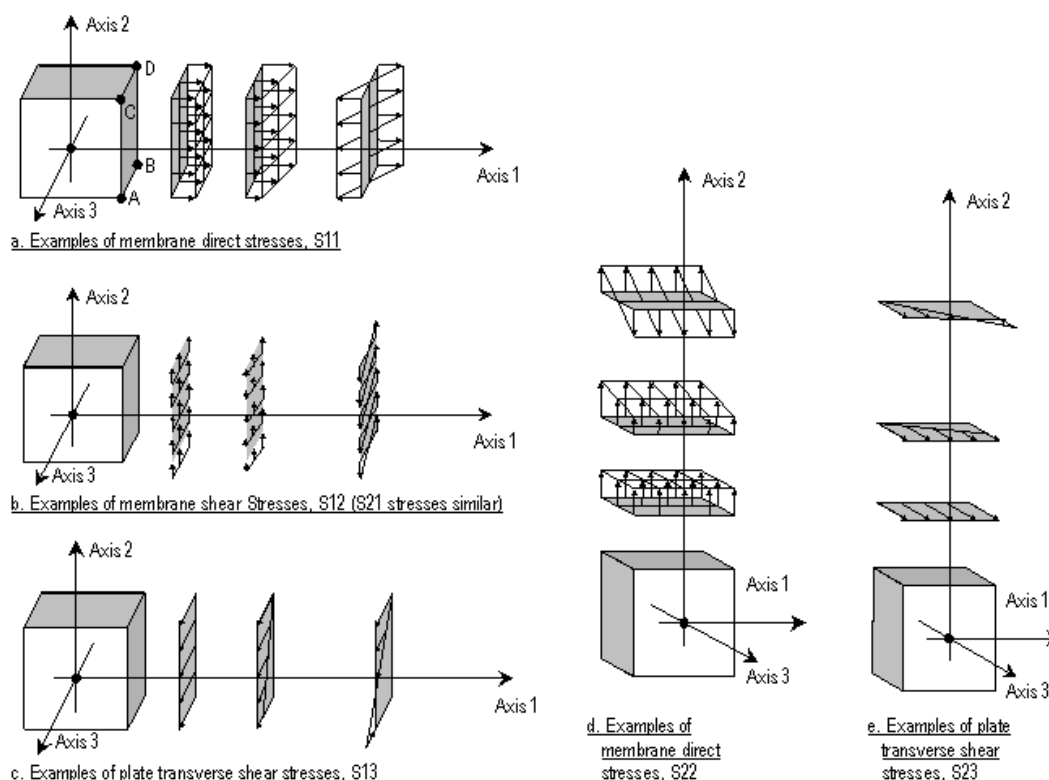
4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΤΟ SAP2000

Στο πρόγραμμα SAP2000 οι έξι πλευρές με τις θετικές και τις αρνητικές τους φορές καθορίζονται όπως φαίνονται στο σχήμα 4.7. Οι αριθμοί 1, 2, 3 αντιστοιχούν στους τοπικούς άξονες του επιφανειακού στοιχείου. Σημειώνεται ότι η θετική πλευρά 3 αποκαλείται μερικές φορές ως το άνω μέρος του επιφανειακού στοιχείου, ενώ η αρνητική πλευρά 3 το κάτω μέρος του στοιχείου.



Σχήμα 4.7 - Τοπικοί άξονες του επιφανειακού στοιχείου

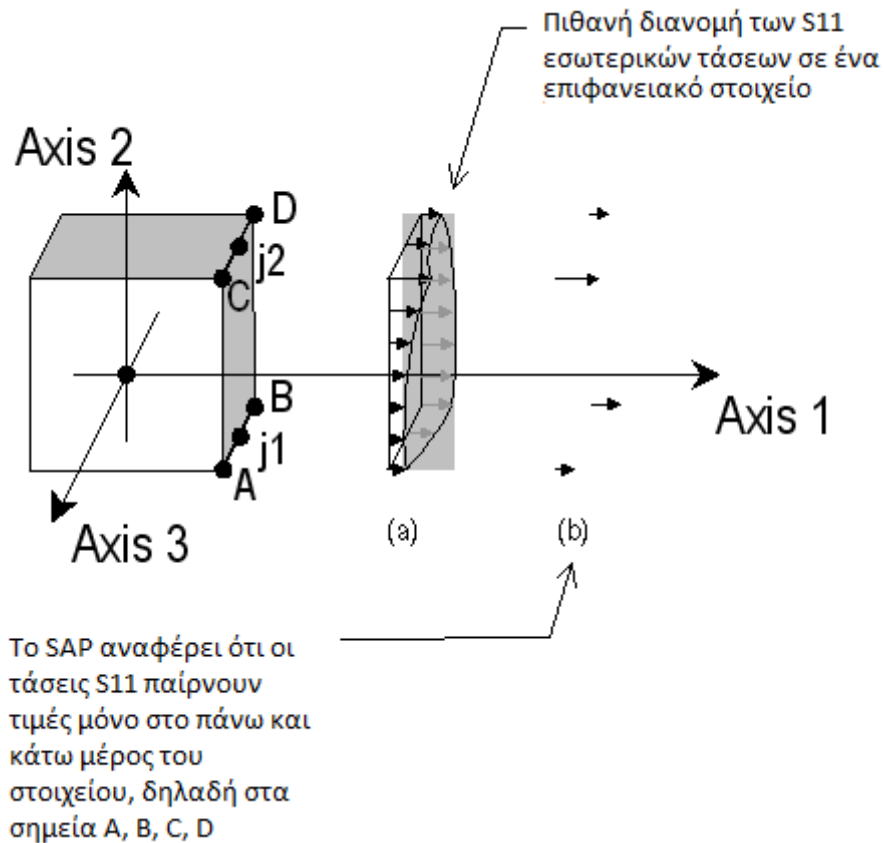
Οι βασικές τάσεις του επιφανειακού στοιχείου ορίζονται ως: S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{13} και S_{23} . Οι τάσεις S_{ij} , όπου το i είναι ίσο με 1 ή 2 και το j είναι ίσο με 1, 2 ή 3, είναι τάσεις που εμφανίζονται στην πλευρά i ενός επιφανειακού στοιχείου στην κατεύθυνση j . Η κατεύθυνση j αναφέρεται στην κατεύθυνση του τοπικού άξονα του στοιχείου. Έτσι, οι τάσεις S_{11} εμφανίζονται στην πλευρά 1 του στοιχείου και δρουν στην κατεύθυνση που είναι παράλληλη στον άξονα 1. Ένα άλλο παράδειγμα, οι τάσεις S_{12} εμφανίζονται στην πλευρά 1 και δρουν στην κατεύθυνση που είναι παράλληλη στον τοπικό άξονα 2. Το παρακάτω σχήμα δείχνει παραδείγματα για καθένα από τις βασικές τάσεις ενός επιφανειακού στοιχείου.



Σχήμα 4.8 - Βασικές τάσεις ενός επιφανειακού στοιχείου

Το πρόγραμμα SAP2000 ορίζει τις εσωτερικές τάσεις στις τέσσερις κορυφές της αντίστοιχης πλευράς του επιφανειακού στοιχείου. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.8 στην θετική πλευρά 1 οι εσωτερικές τάσεις ορίζονται από το SAP στις κορυφές A, B, C και D.

Εσωτερικές επιφανειακές τάσεις ορίζονται τόσο για το άνω όσο και για το κάτω μέρος του επιφανειακού στοιχείου. Το άνω και το κάτω μέρος ορίζονται σε σχέση με τον τοπικό άξονα 3 του στοιχείου. Η θετική πλευρά 3 του στοιχείου θεωρείται ότι είναι το άνω μέρος. Έτσι οι εσωτερικές τάσεις στο άνω μέρος του επιφανειακού στοιχείου περιλαμβάνουν τις τάσεις στις κορυφές A και C και στο κάτω μέρος περιλαμβάνουν τις τάσεις στις κορυφές B και D. Το σχήμα 4.9 δείχνει καθαρά τα σημεία όπου το SAP ορίζει τις εσωτερικές τάσεις.



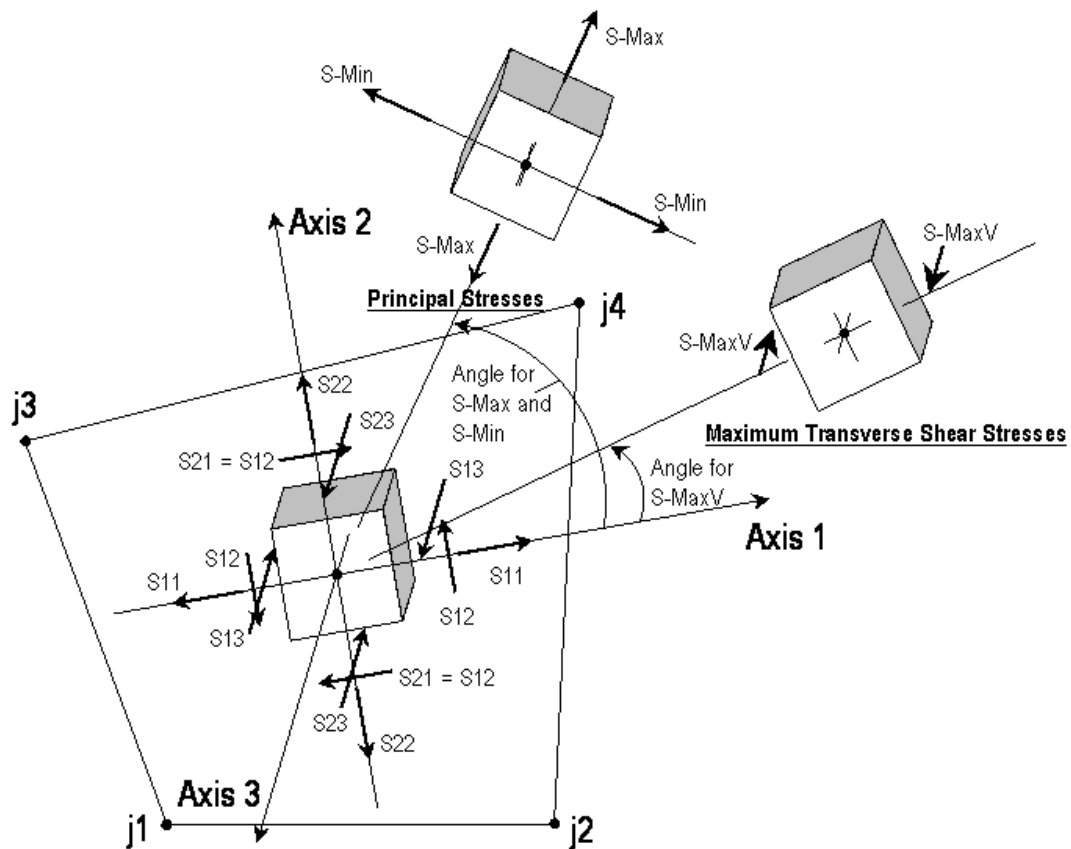
Σχήμα 4.9 - Ορισμός τάσεων στις κορυφές της πλευράς του επιφανειακού στοιχείου

Οι εγκάρσιες διατμητικές τάσεις S13 και S23 που υπολογίζονται από το SAP είναι μέσες τιμές. Η διανομή της πραγματικής εγκάρσιας διατμητικής τάσης έχει παραβολικό σχήμα. Εμφανίζει μηδενική τιμή στην άνω και κάτω επιφάνεια και μέγιστη και ελάχιστη τιμή εμφανίζει στη μέση της επιφάνειας του στοιχείου. Στο SAP2000 ορίζεται η μέση εγκάρσια διατμητική τιμή. Μια προσέγγιση της μέγιστης ή της ελάχιστης διατμητικής τάσης είναι περίπου 1,5 φορές τη μέση διατμητική τάση.

Το σχήμα 4.10 απεικονίζει τις θετικές κατευθύνσεις των τάσεων των επιφανειακών στοιχείων S11, S22, S12, S13 και S23. Επίσης, εμφανίζονται οι θετικές κατευθύνσεις για τις κύριες τάσεις SMax, SMin και για τις μέγιστες εγκάρσιες διατμητικές τάσεις S-MaxV.

Γνωρίζοντας τις τάσεις S13 και S23, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη εγκάρσια διατμητική τάση από τον τύπο

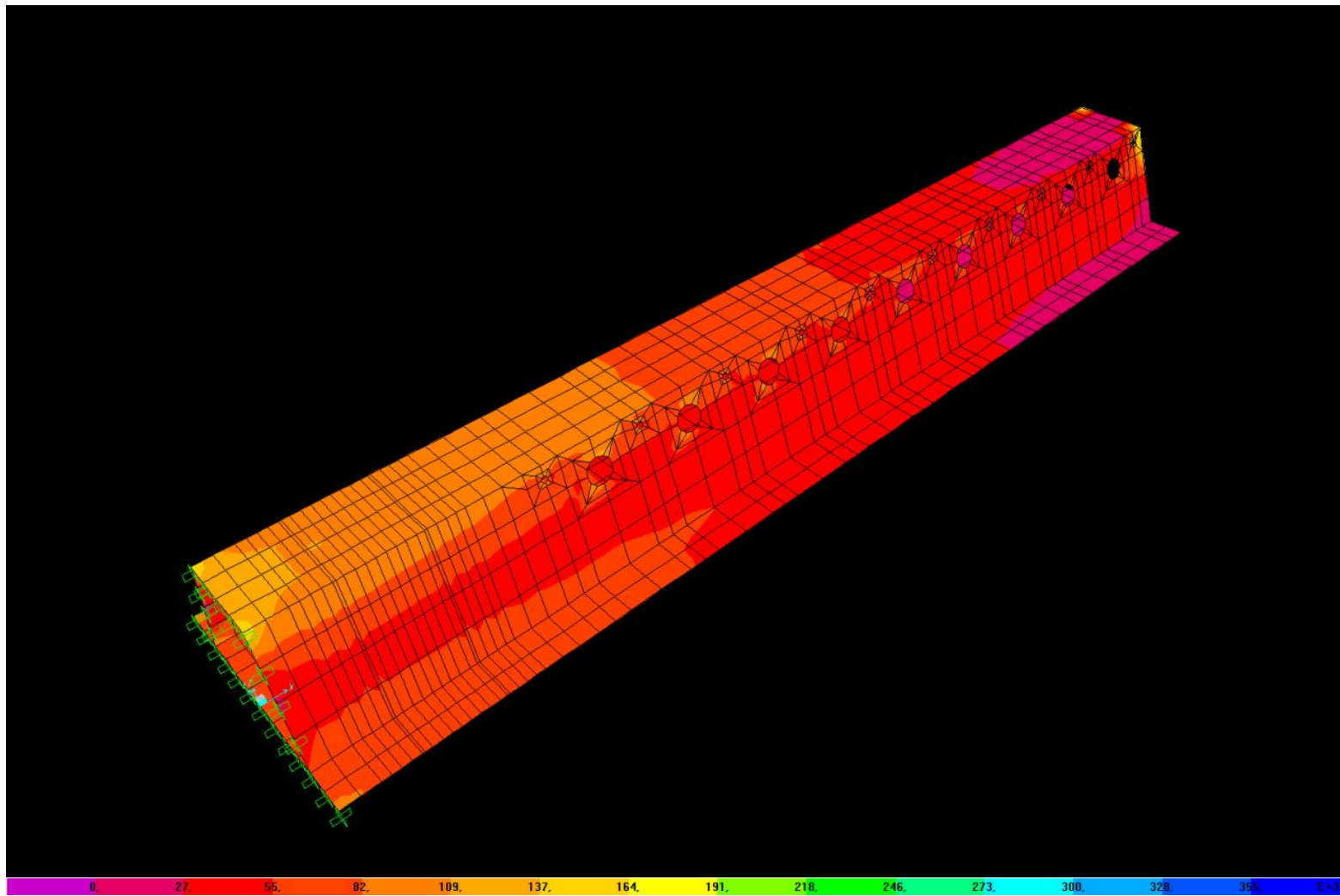
$$S\text{-MaxV} = \sqrt{S_{13}^2 + S_{23}^2}$$



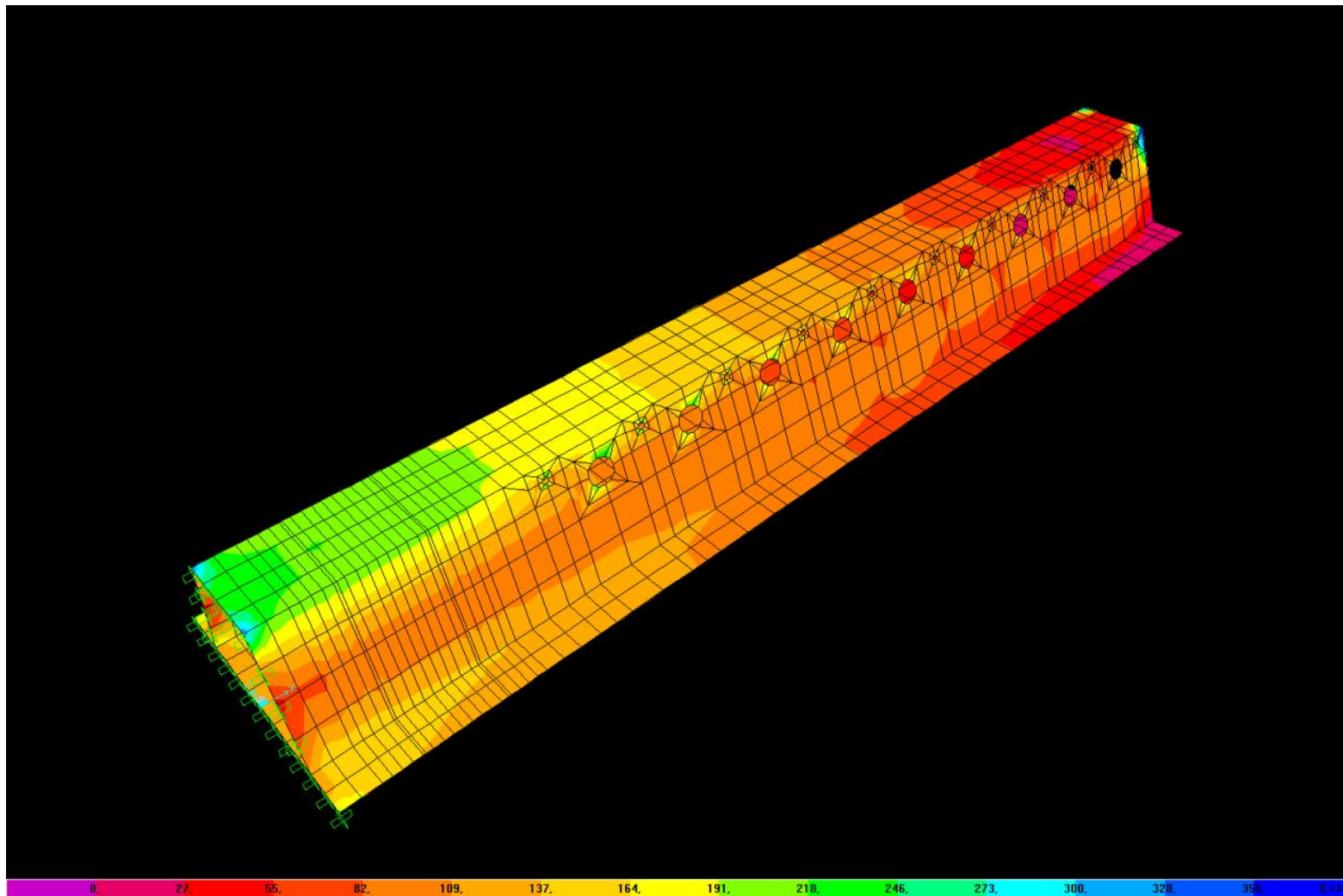
Σχήμα 4.10 - Θετικές κατευθύνσεις τάσεων S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{13} και S_{23} .

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

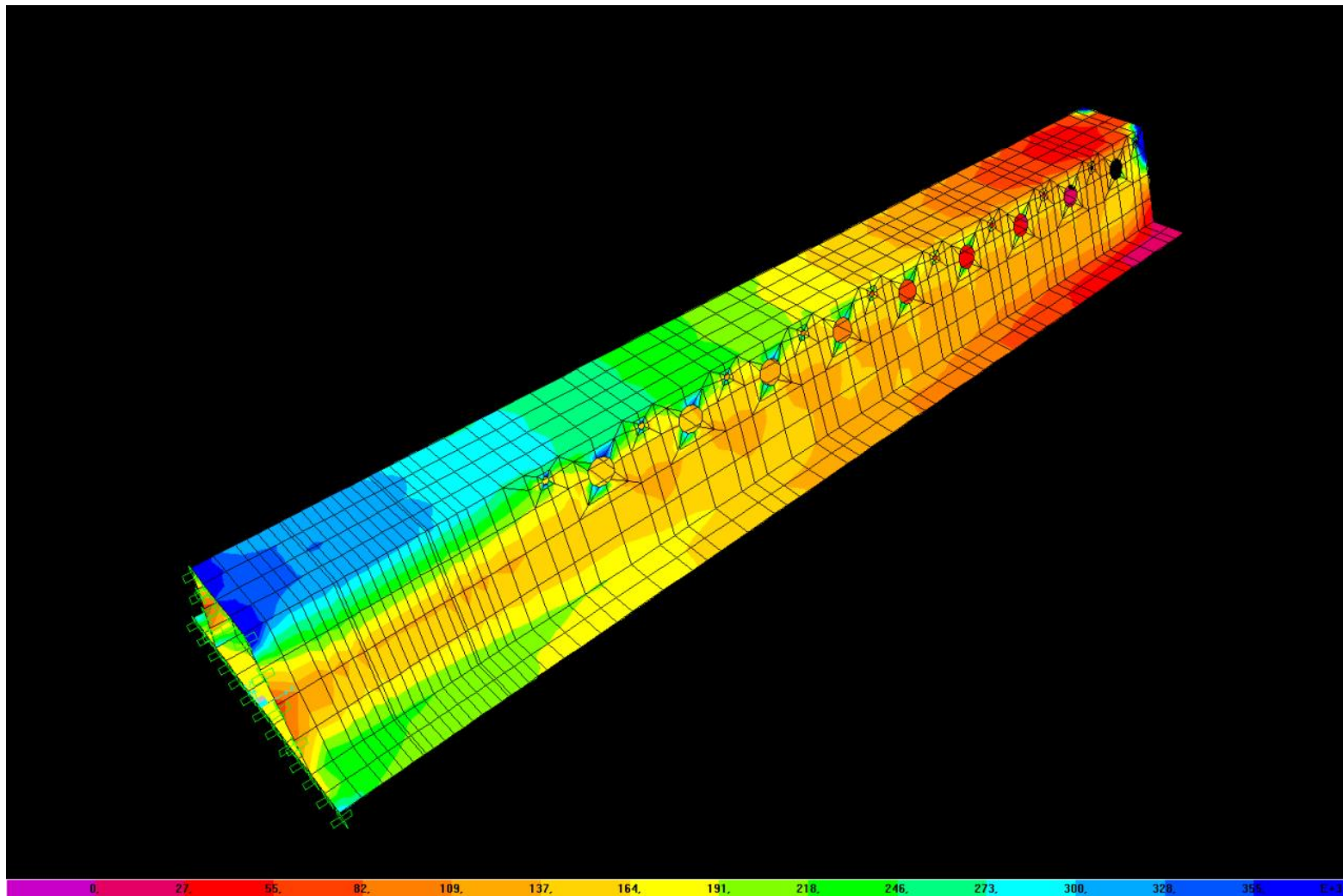
Στα σχήματα, που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δοκών D38/500 και D22/200 καμπτομένων από την επίδραση του συγκεντρωμένου φορτίου. Οι τάσεις που παρουσιάζονται είναι οι τάσεις Von Mises και με μπλε χρώμα φαίνονται τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.



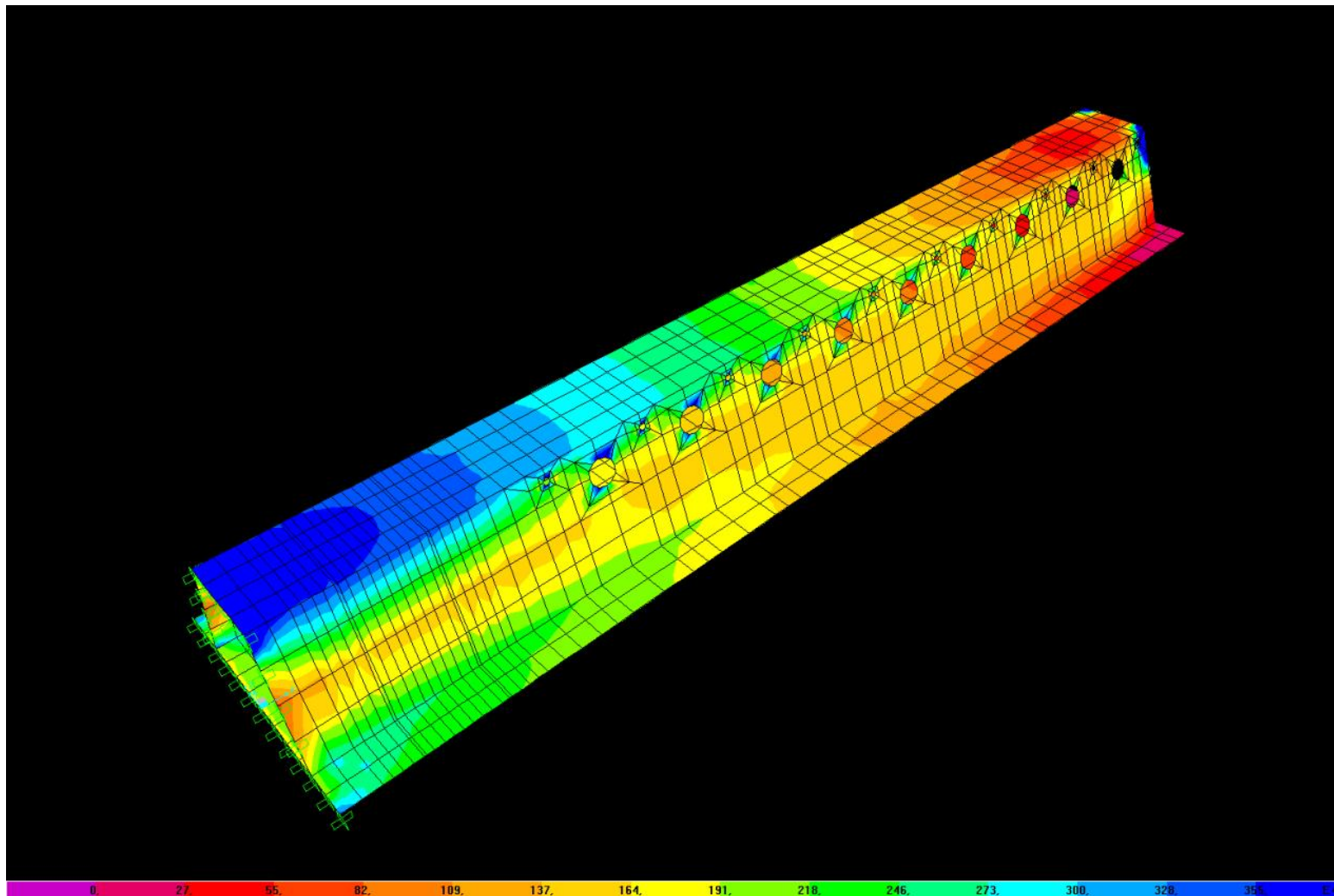
Σχήμα 4.11 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 χωρίς οπή για $F=50\text{KN}$



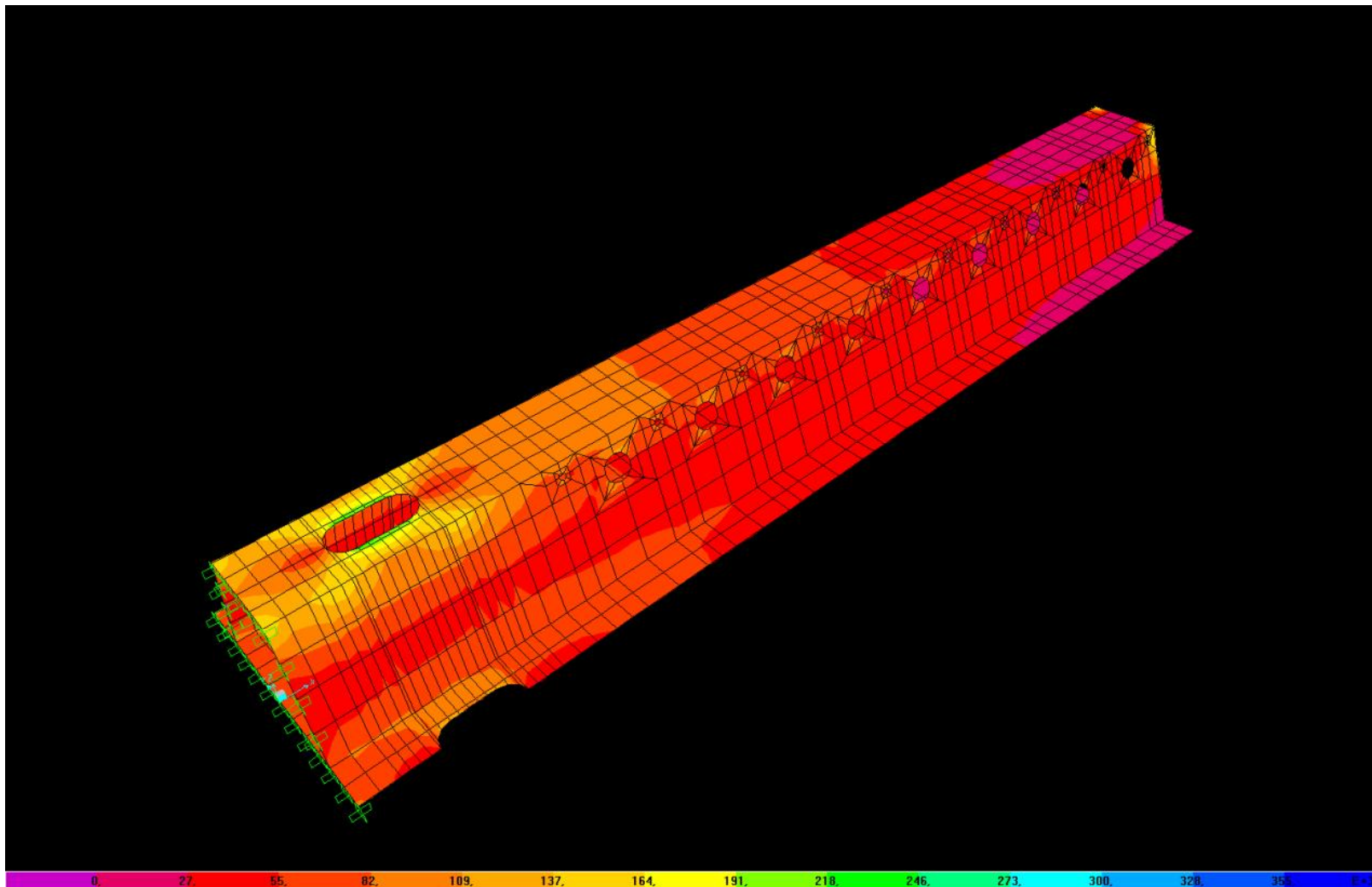
Σχήμα 4.12 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 χωρίς σπή για F=100kN



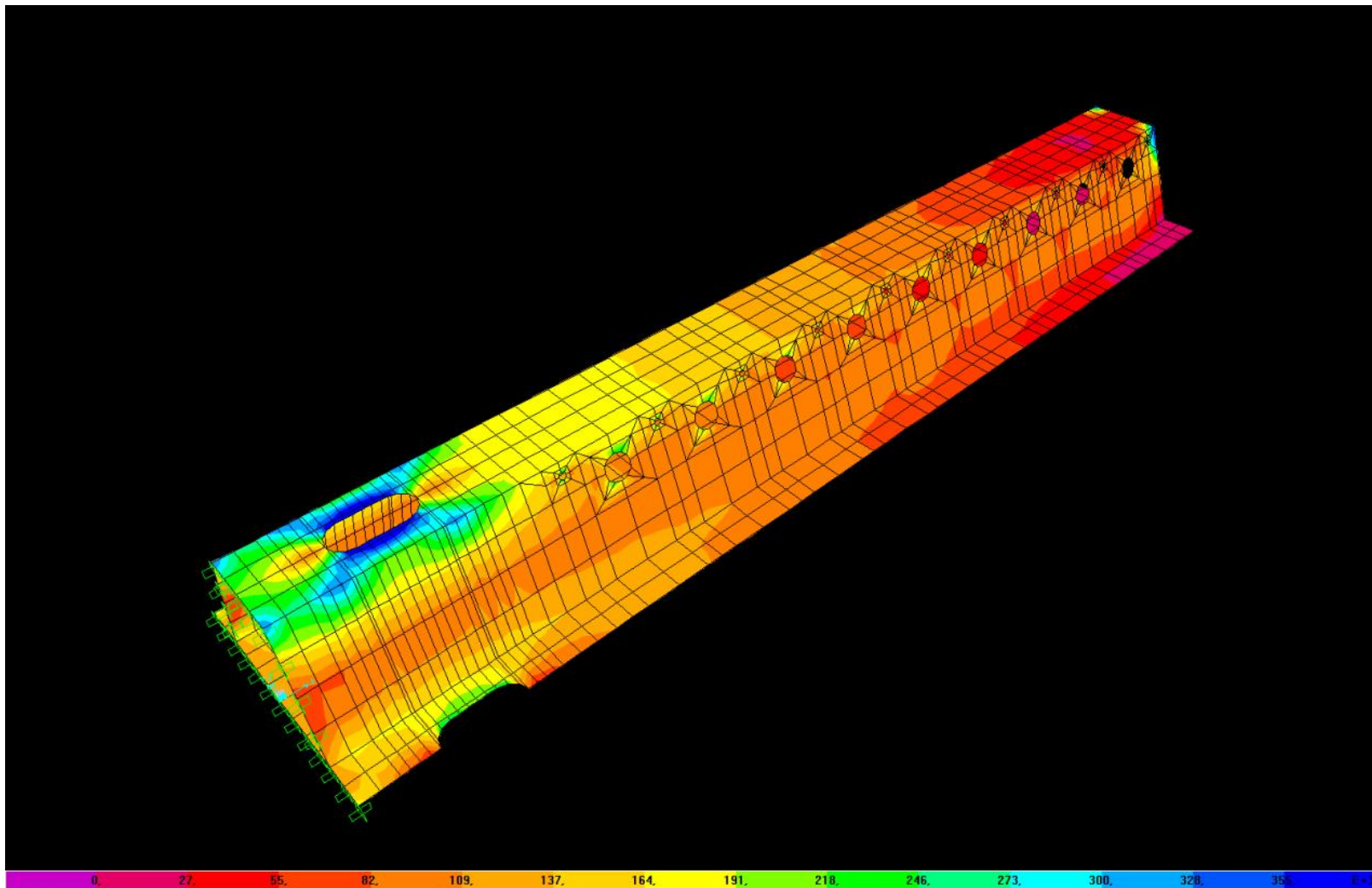
Σχήμα 4.13 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 χωρίς σπή για $F=150\text{KN}$



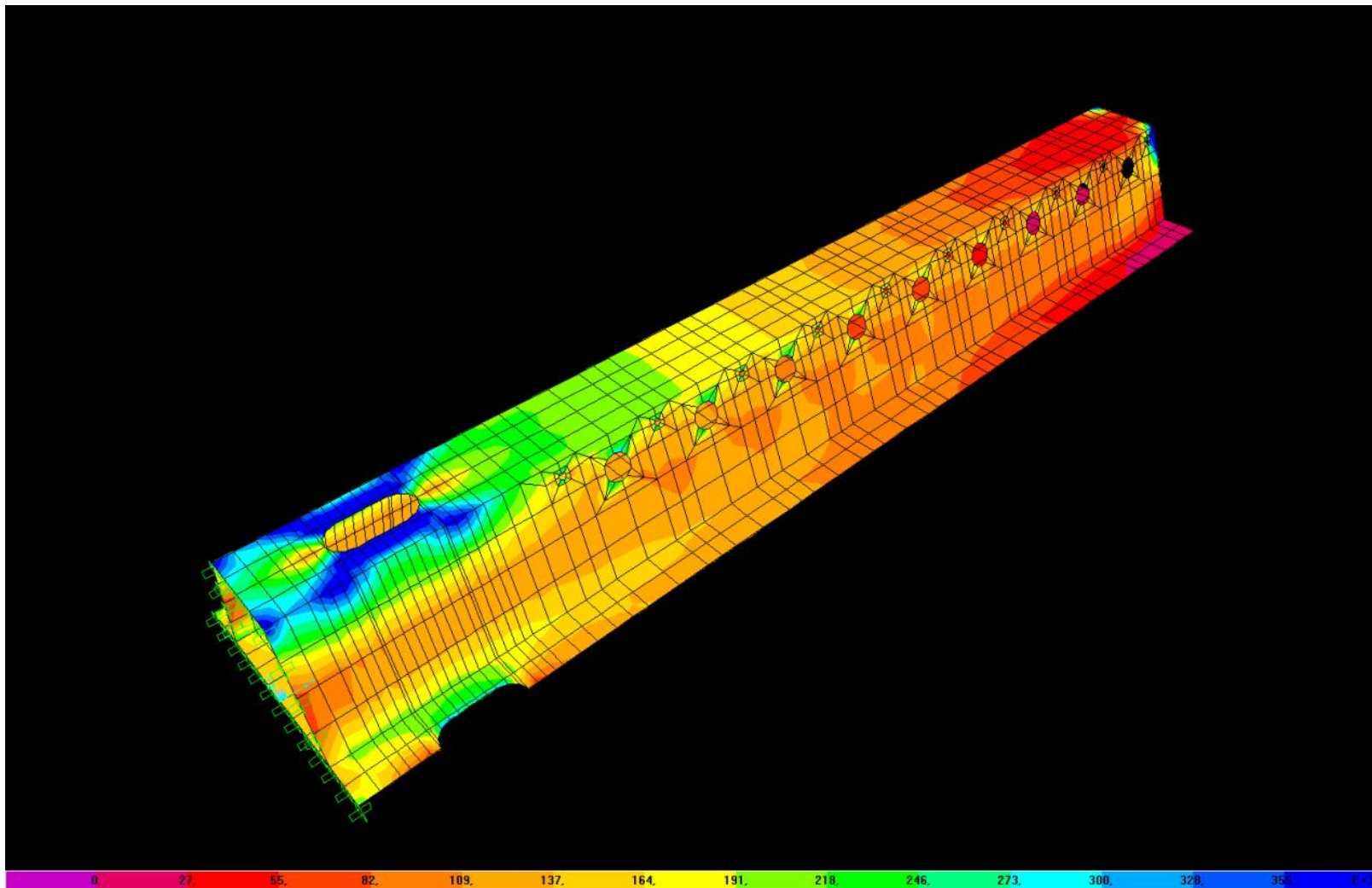
Σχήμα 4.14 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 χωρίς σπή για $F=170\text{KN}$



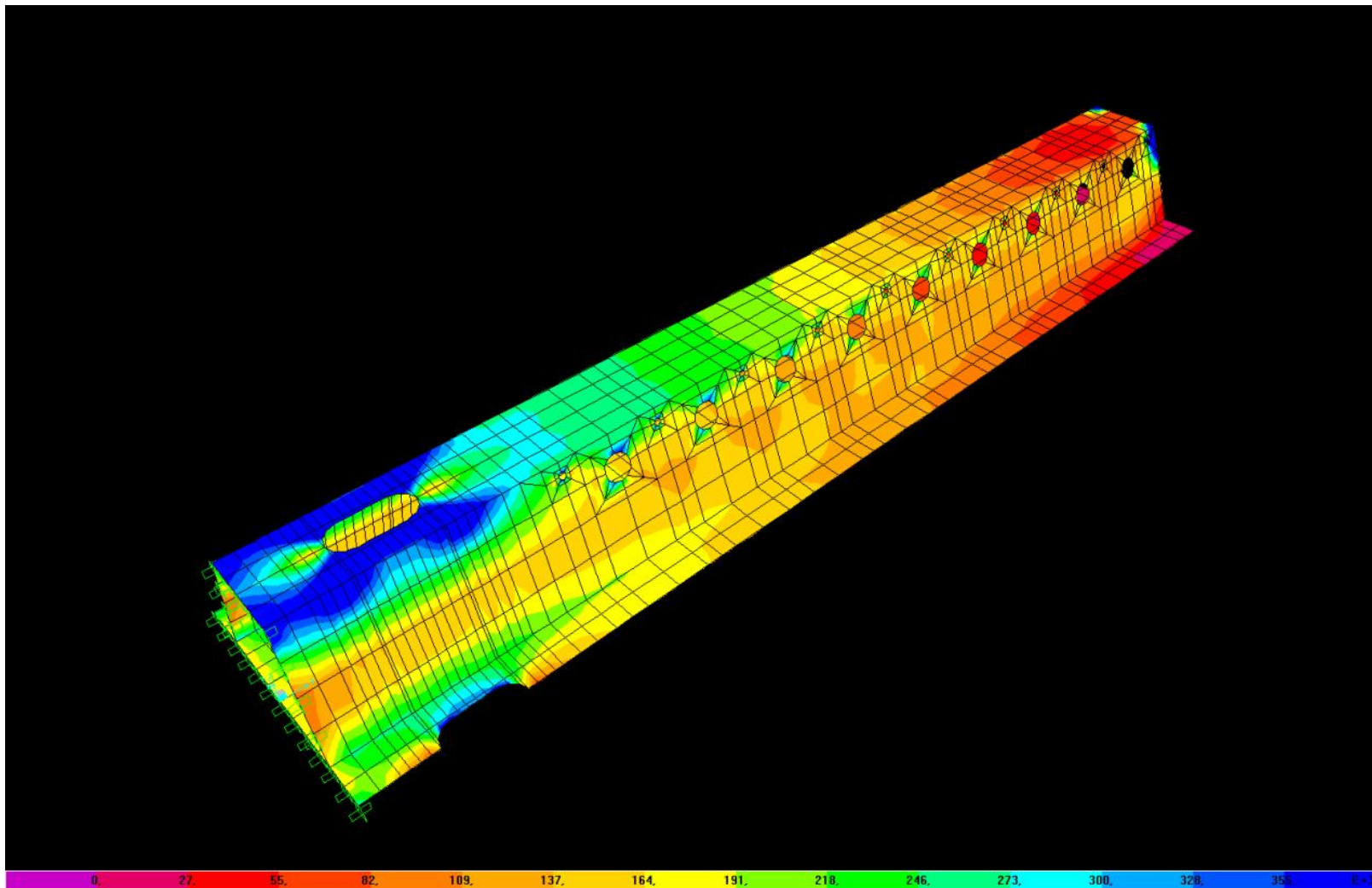
Σχήμα 4.15 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.65h$ για $F=50\text{KN}$



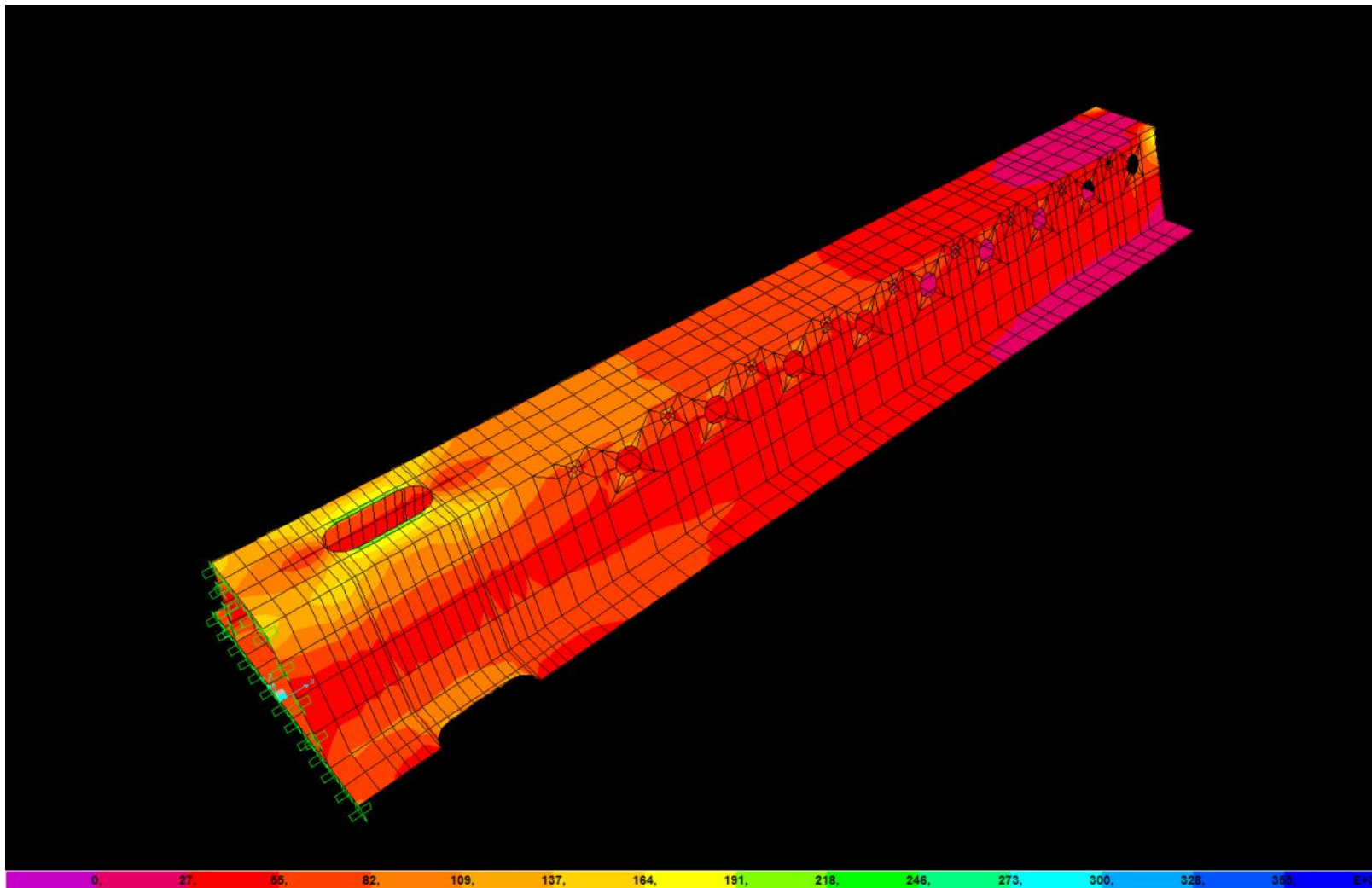
Σχήμα 4.16 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.65h$ για $F=100\text{KN}$



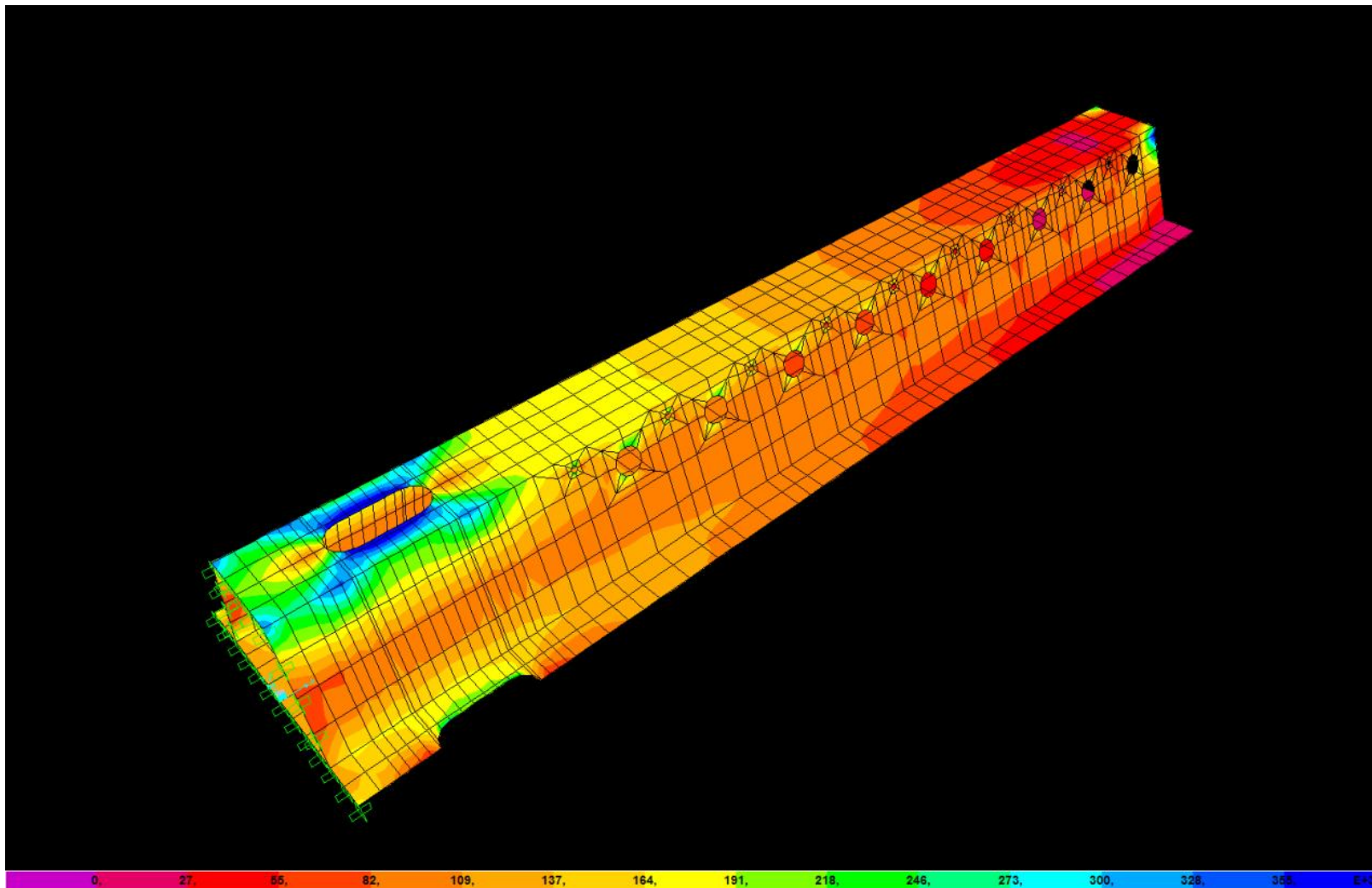
Σχήμα 4.17 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.65h$ για $F=120\text{KN}$



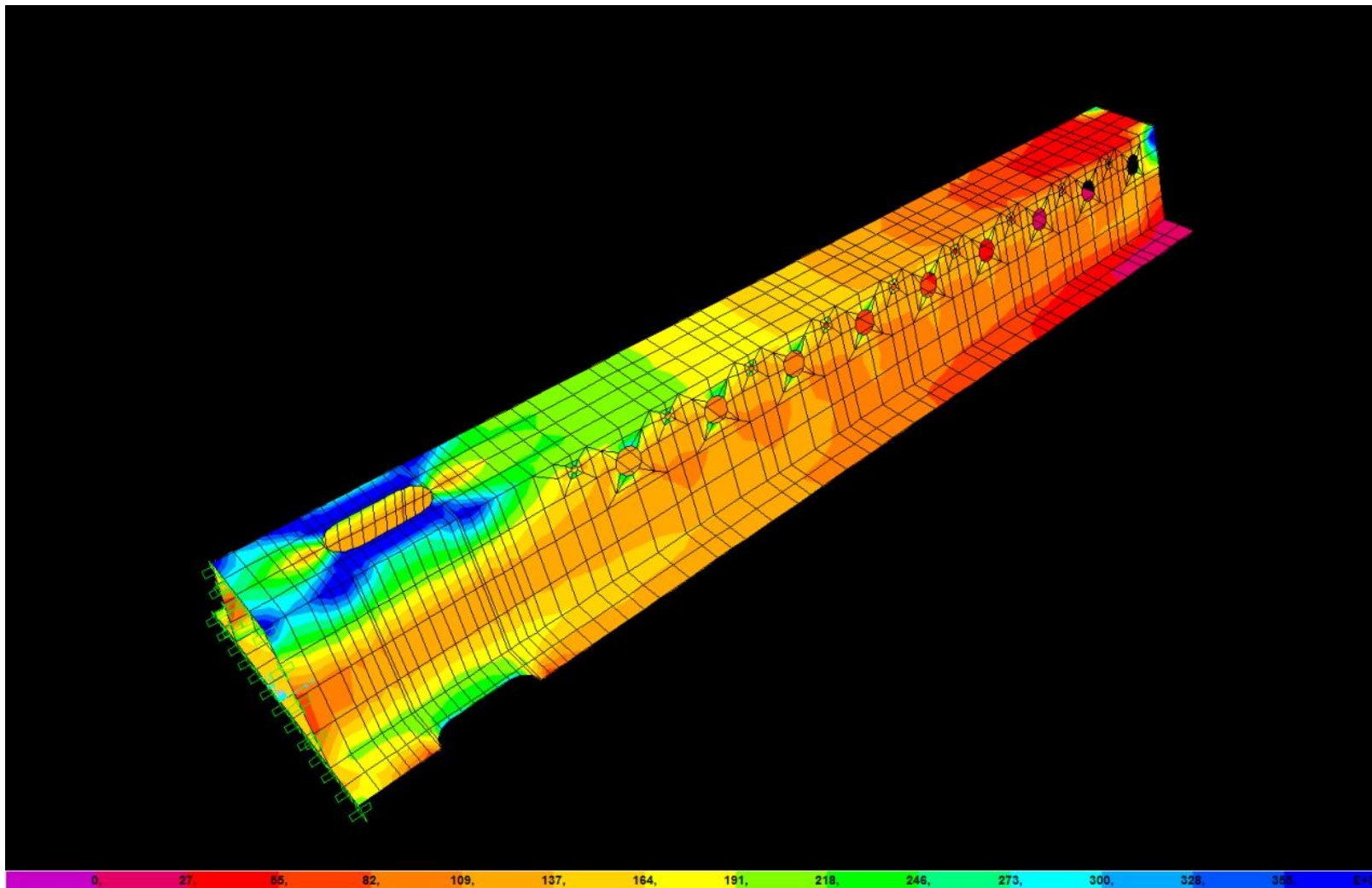
Σχήμα 4.18 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.65h$ για $F=150\text{KN}$



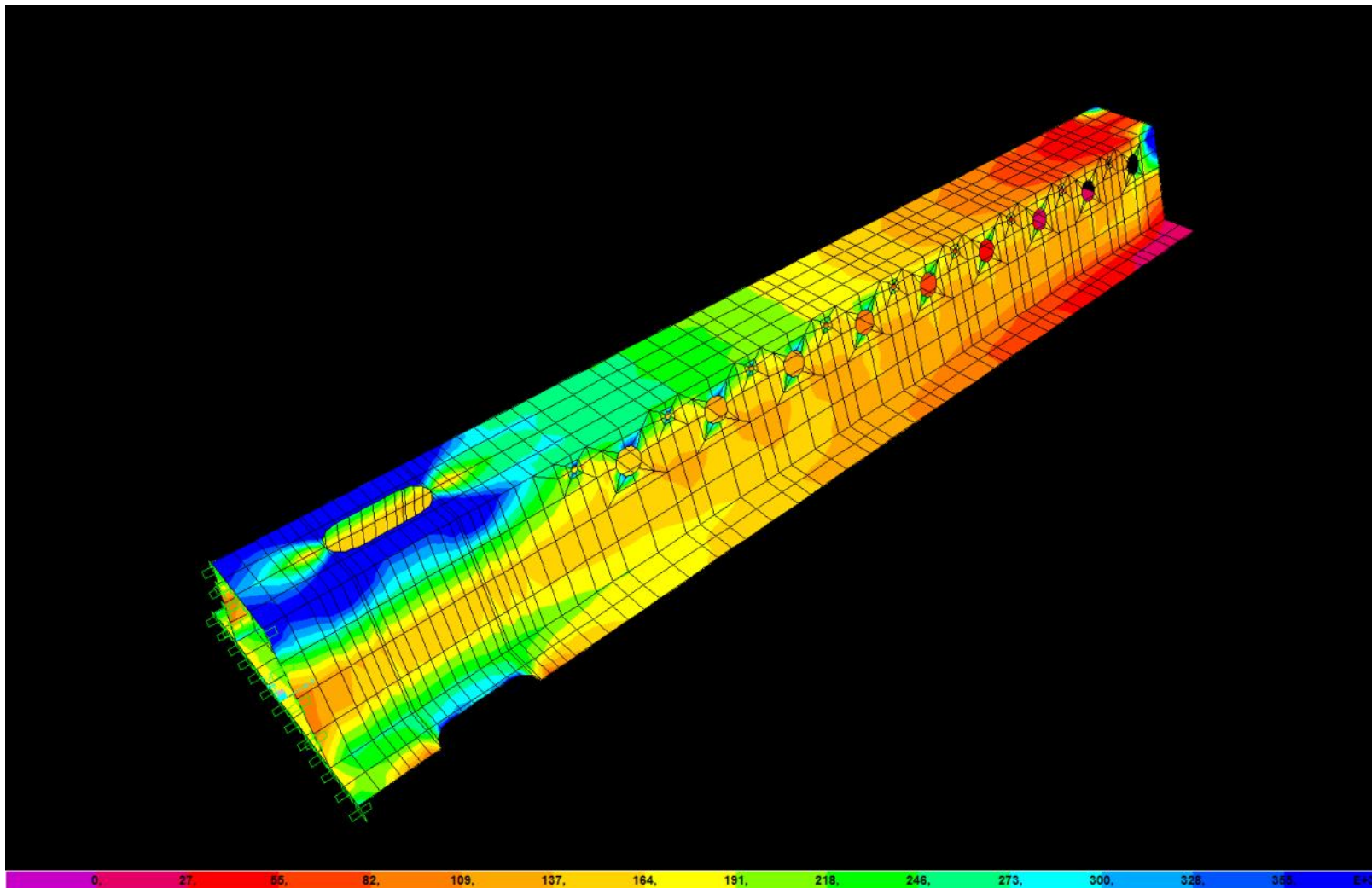
Σχήμα 4.19- Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.75h$ για $F=50\text{KN}$



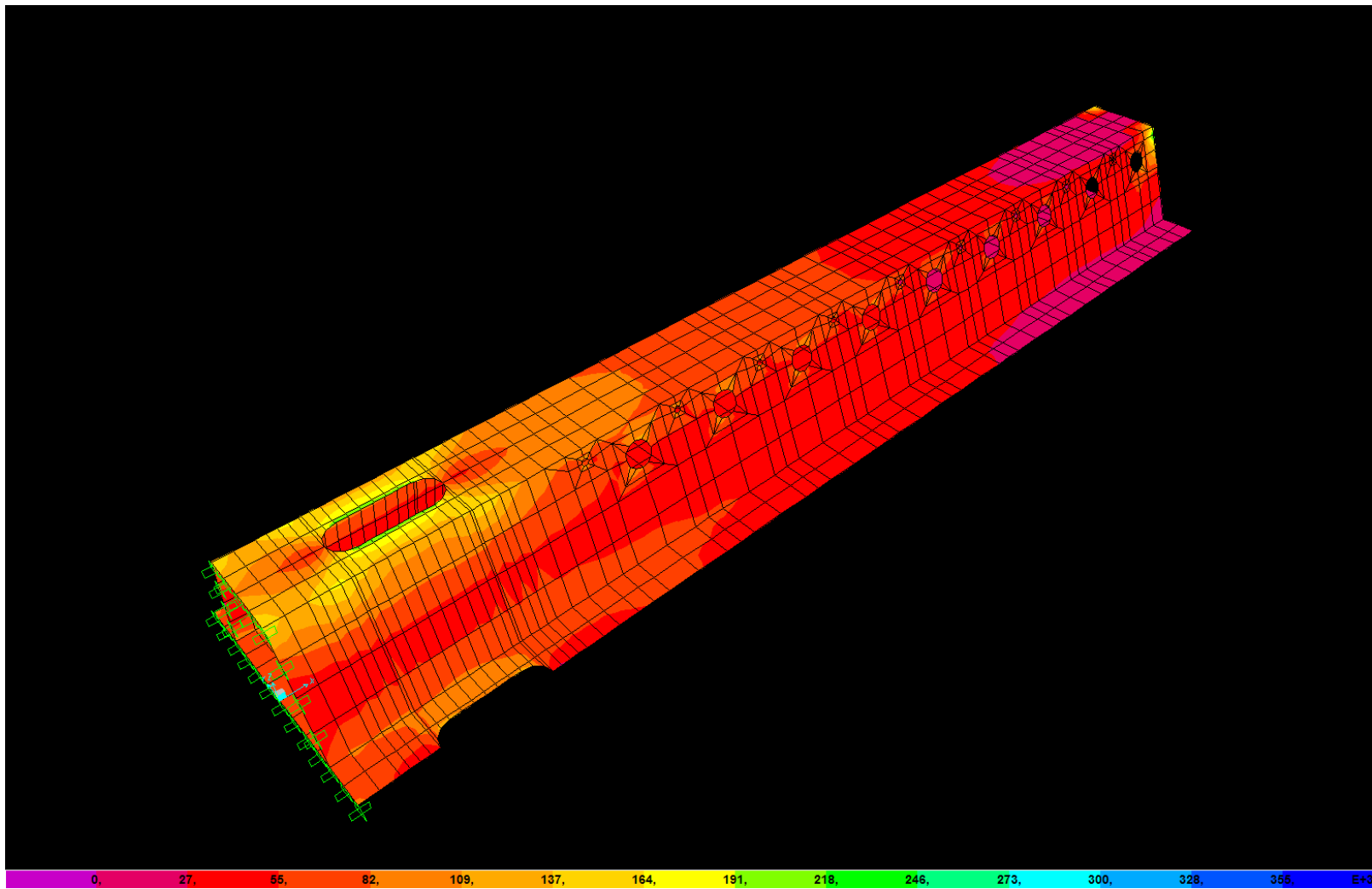
Σχήμα 4.20 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.75h$ για $F=100\text{KN}$



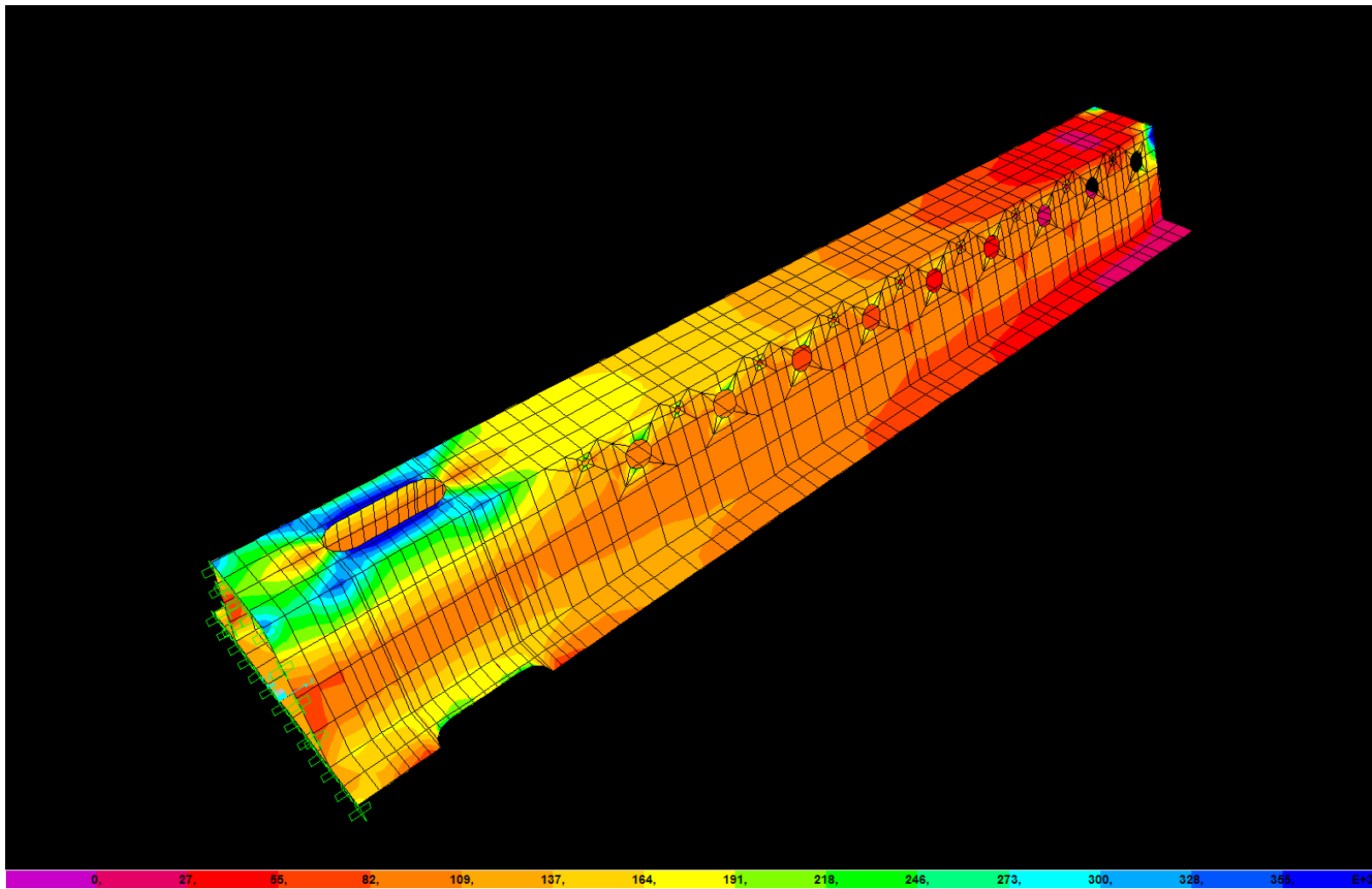
Σχήμα 4.21 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.75h$ για $F=120\text{KN}$



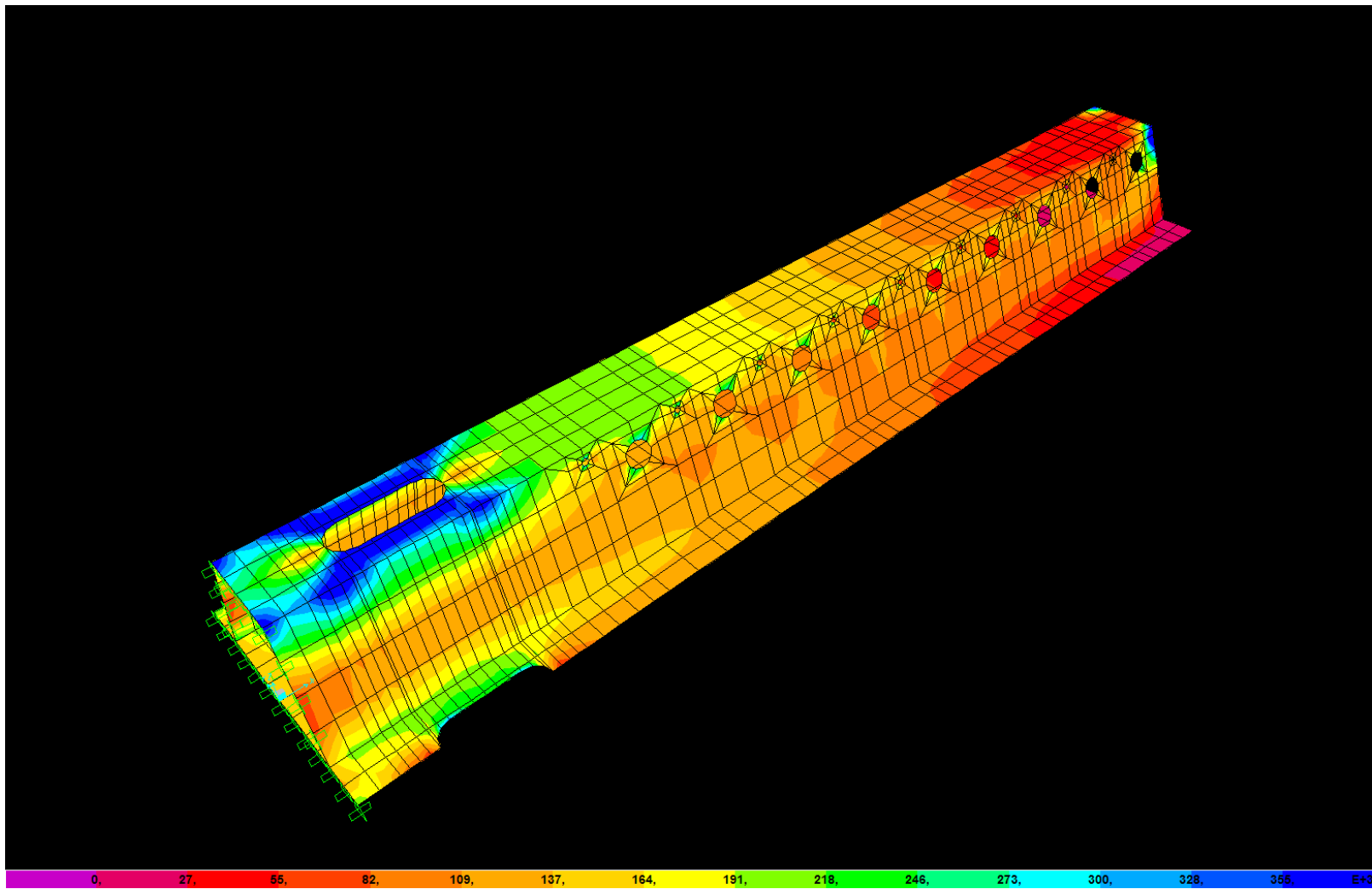
Σχήμα 4.22 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.75h$ για $F=150\text{KN}$



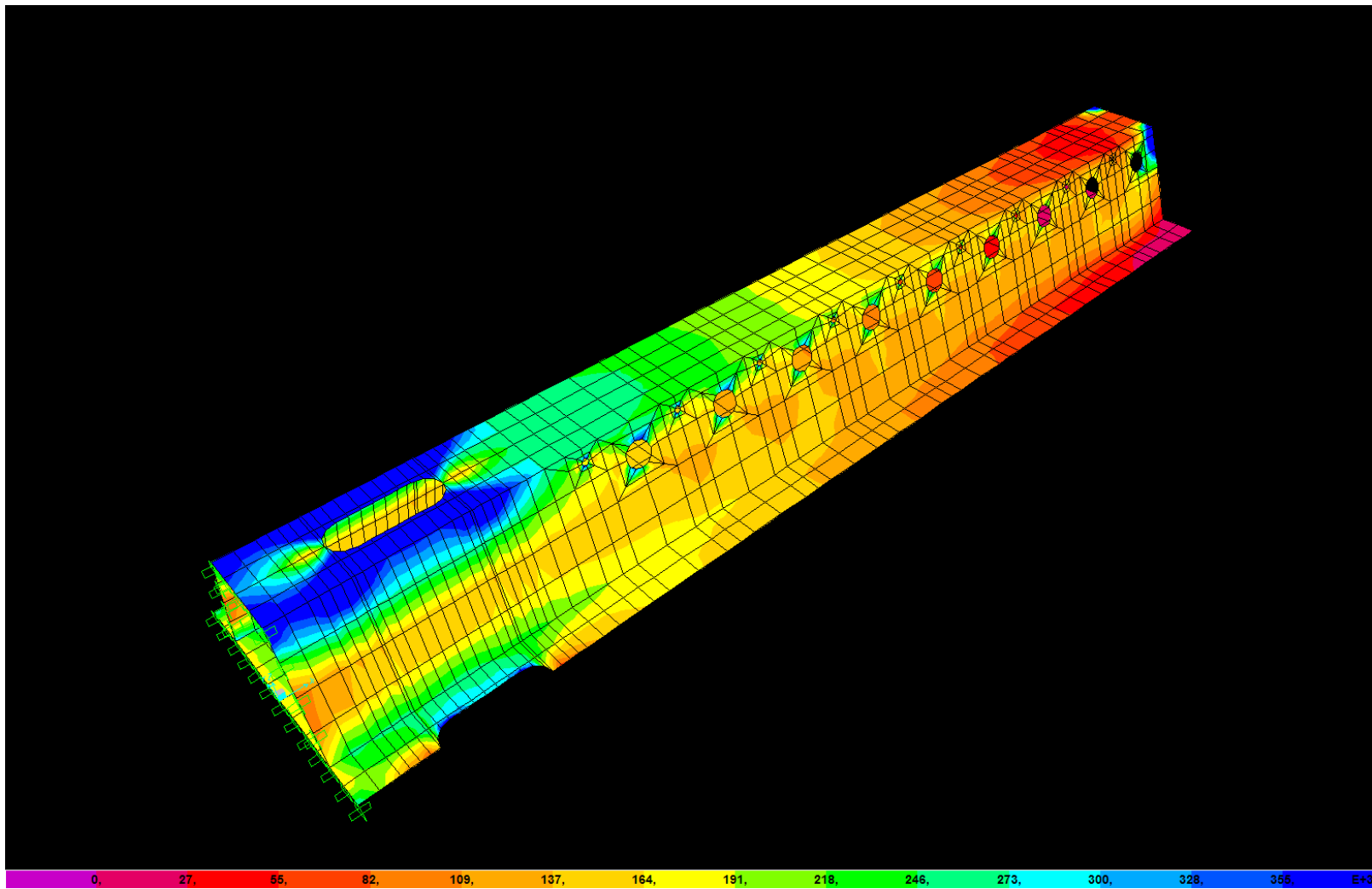
Σχήμα 4.23 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.85h$ για $F=50\text{KN}$



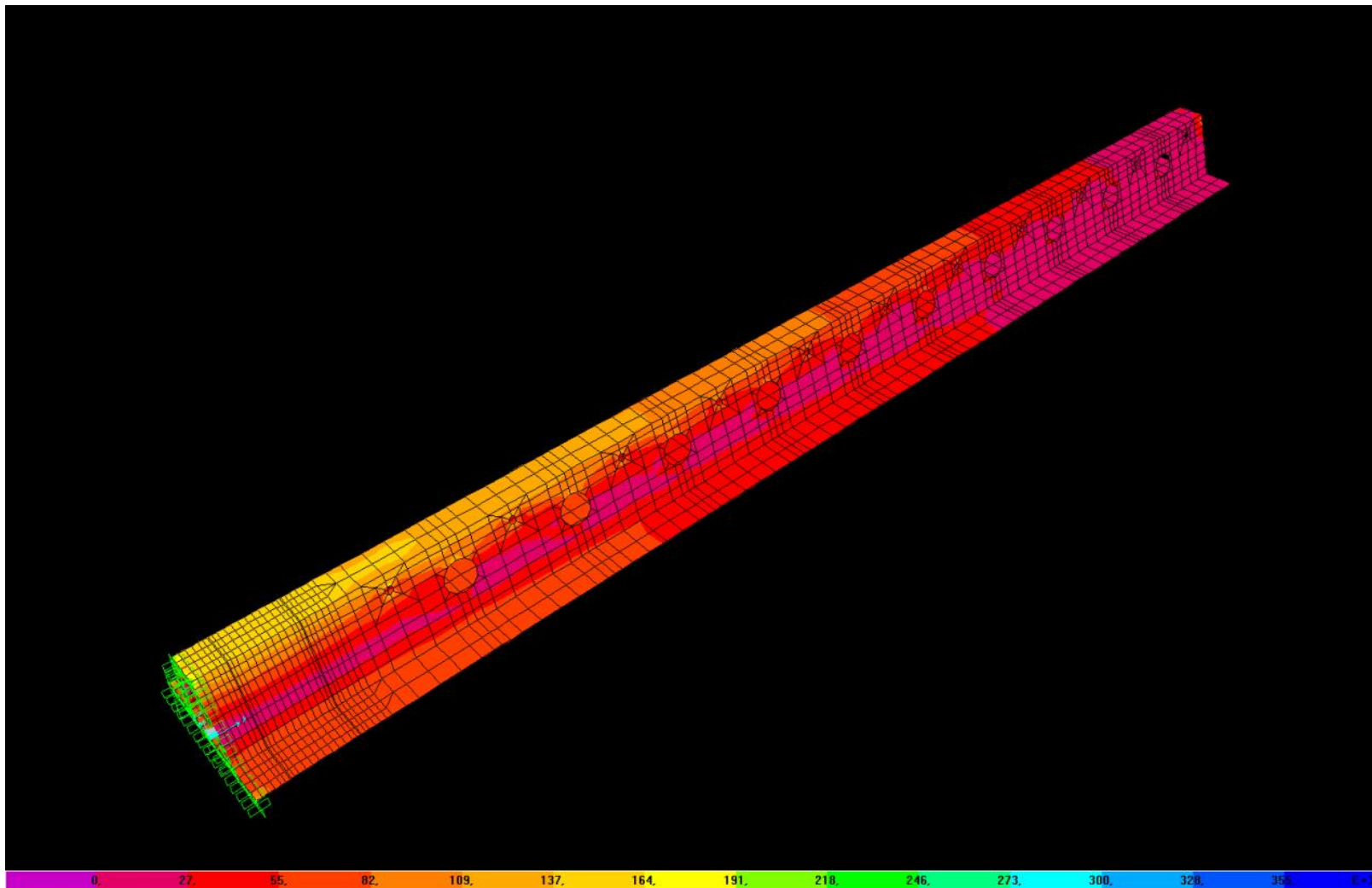
Σχήμα 4.24 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.85h$ για $F=100\text{KN}$



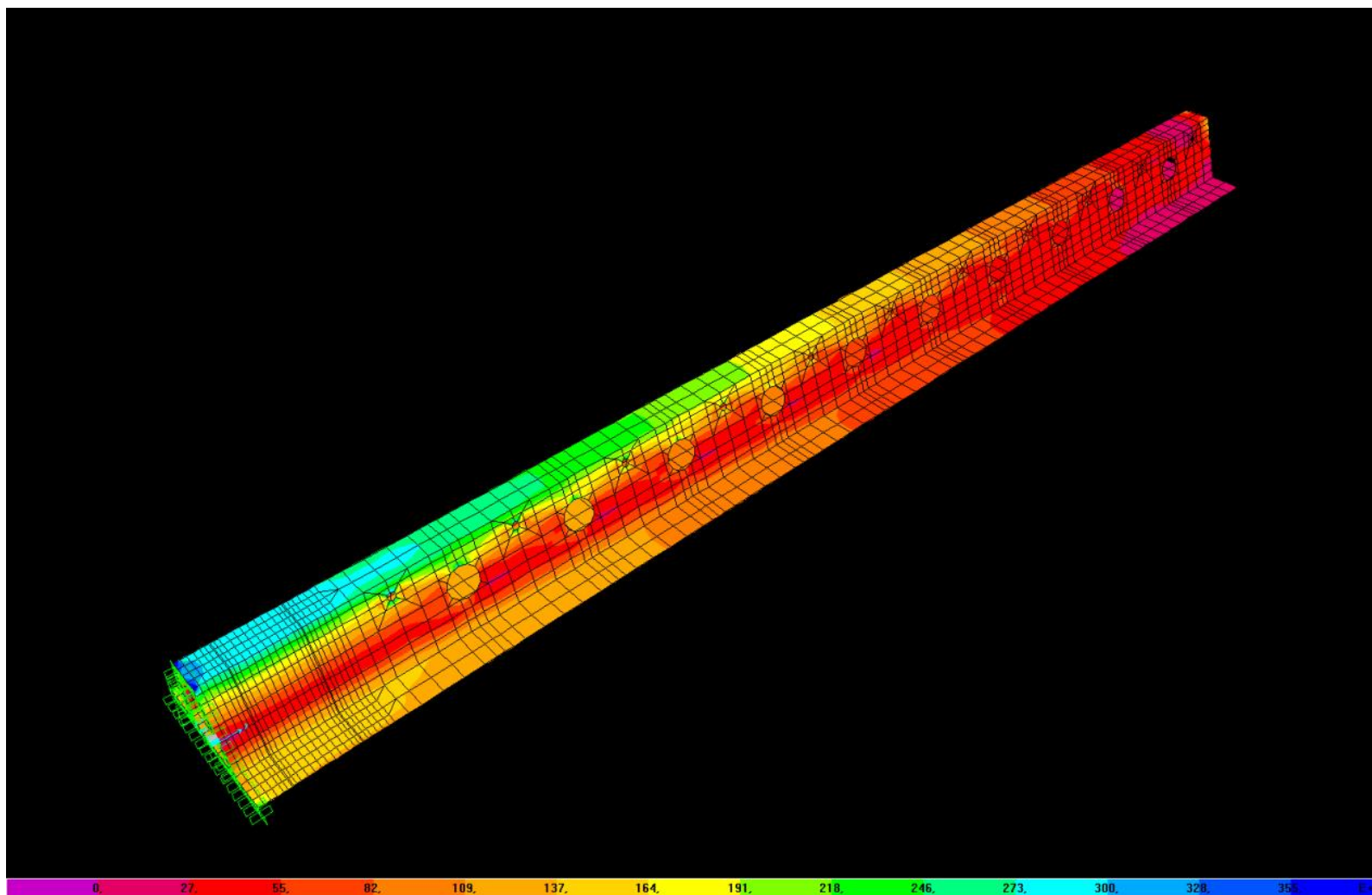
Σχήμα 4.25 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.85h$ για $F=120\text{KN}$



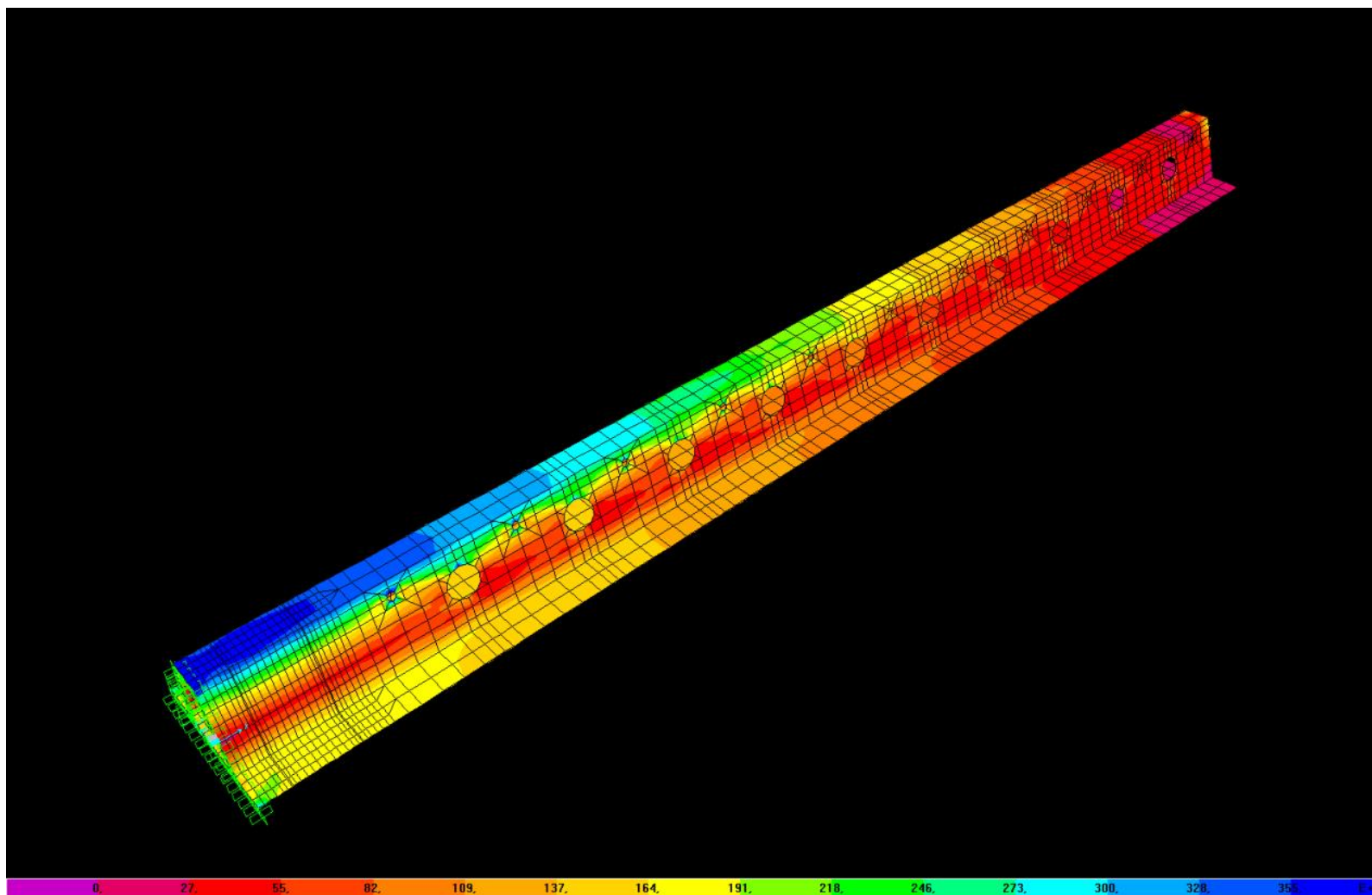
Σχήμα 4.26 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.85h$ για $F=150\text{KN}$



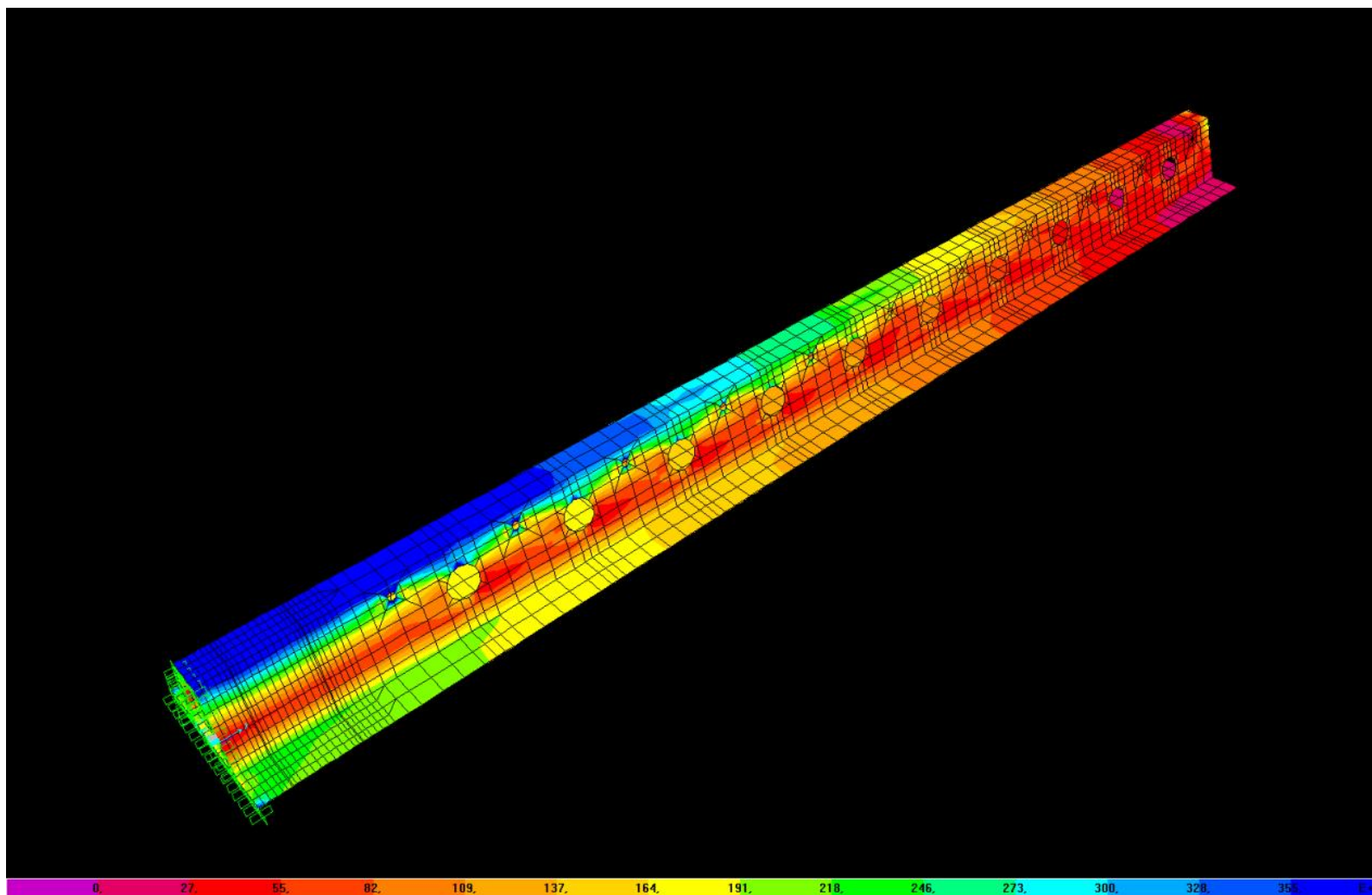
Σχήμα 4.27 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 χωρίς οπή για $F=10\text{kN}$



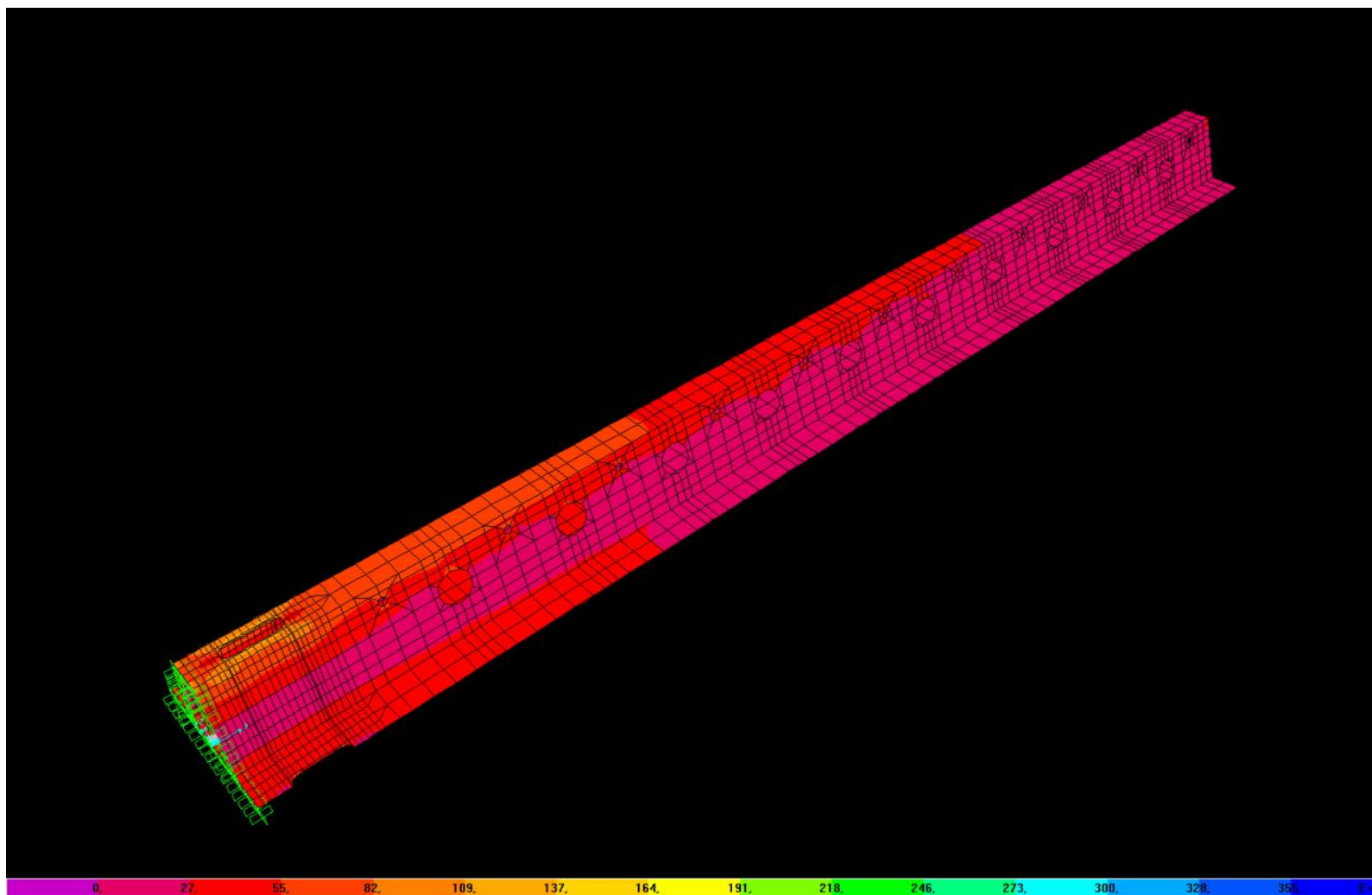
Σχήμα 4.28 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 χωρίς σπή για $F=20\text{KN}$



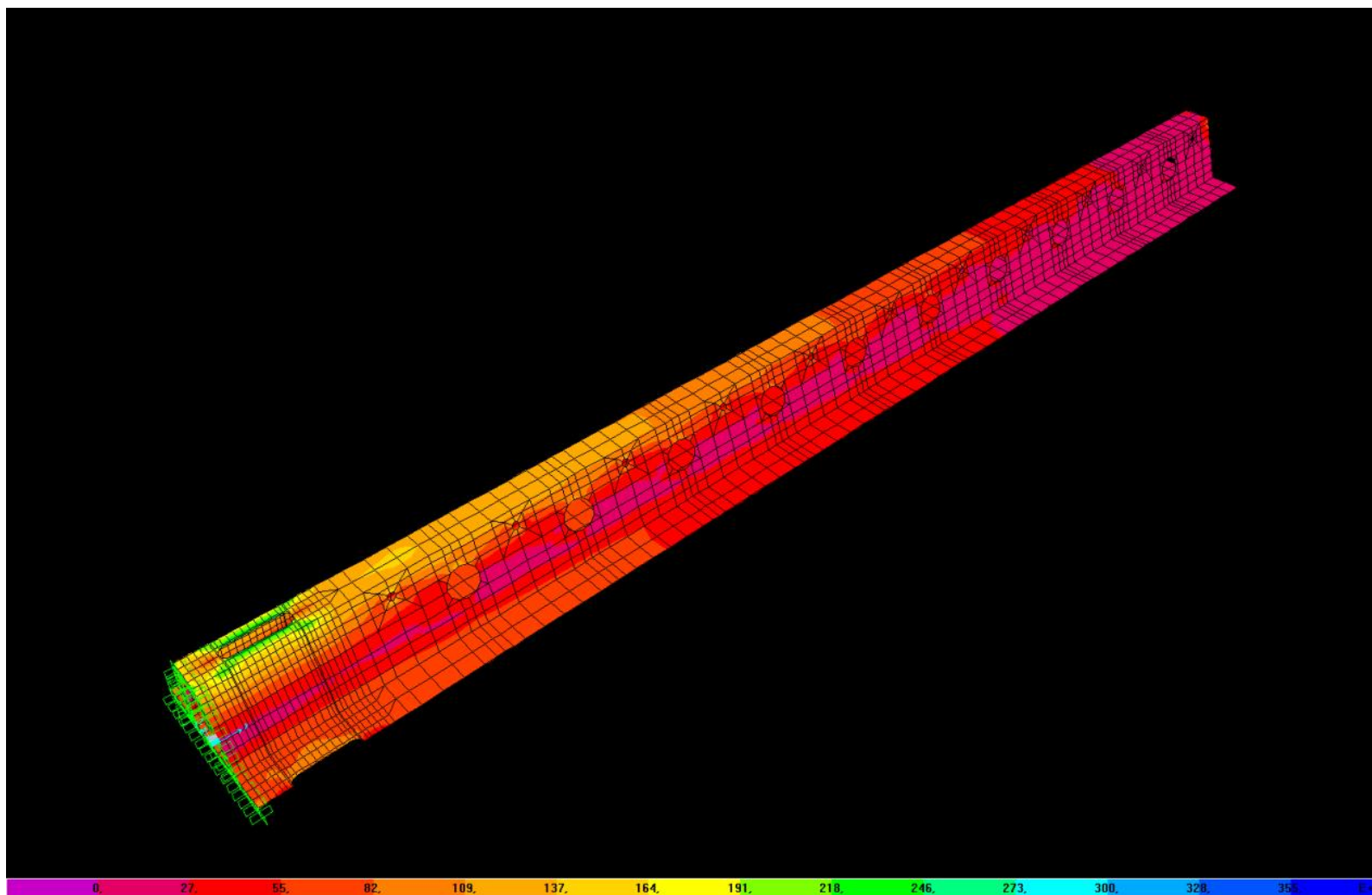
Σχήμα 4.29 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 χωρίς σπή για $F=25\text{KN}$



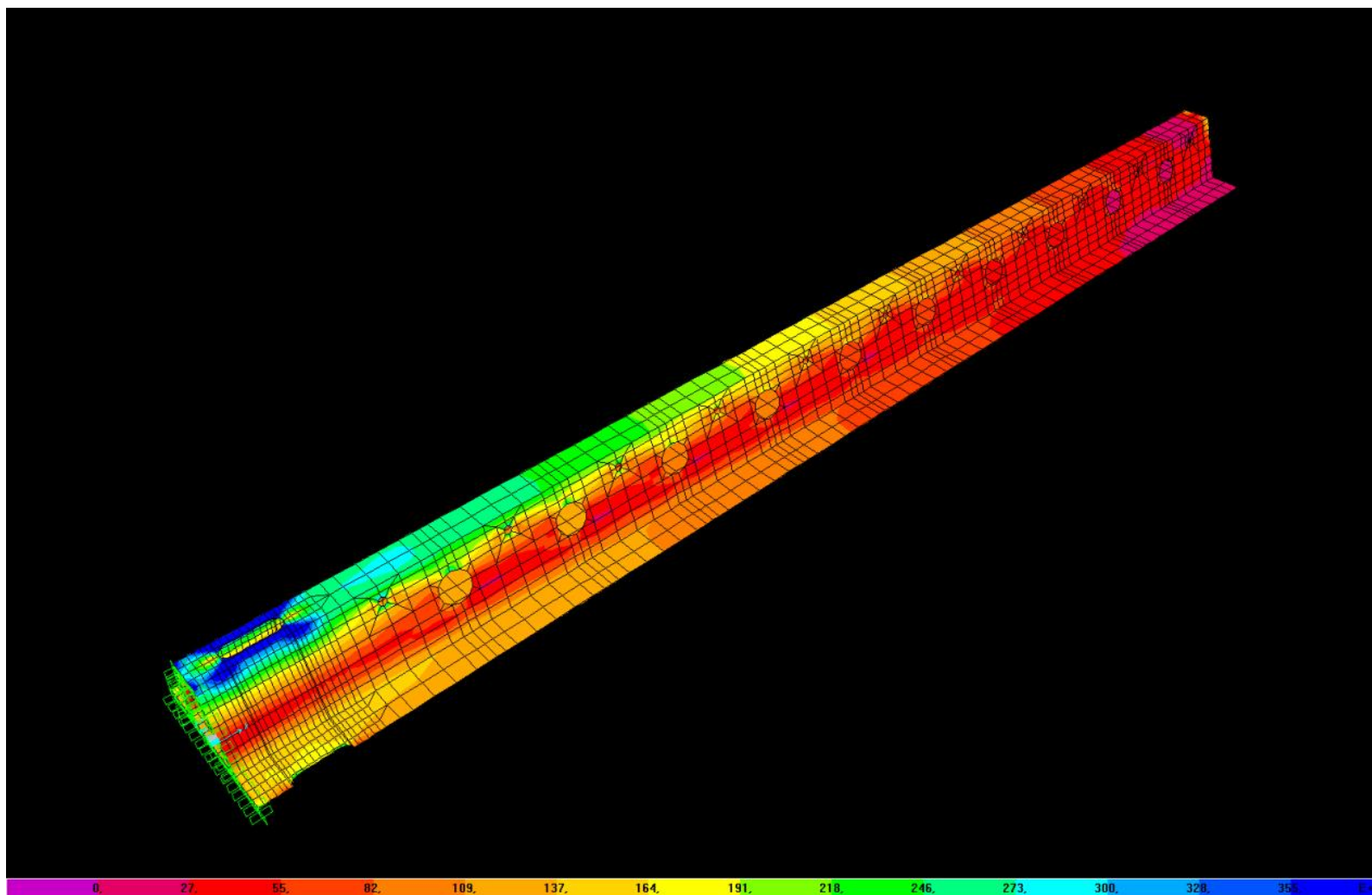
Σχήμα 4.30 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 χωρίς σπή για F=30kN



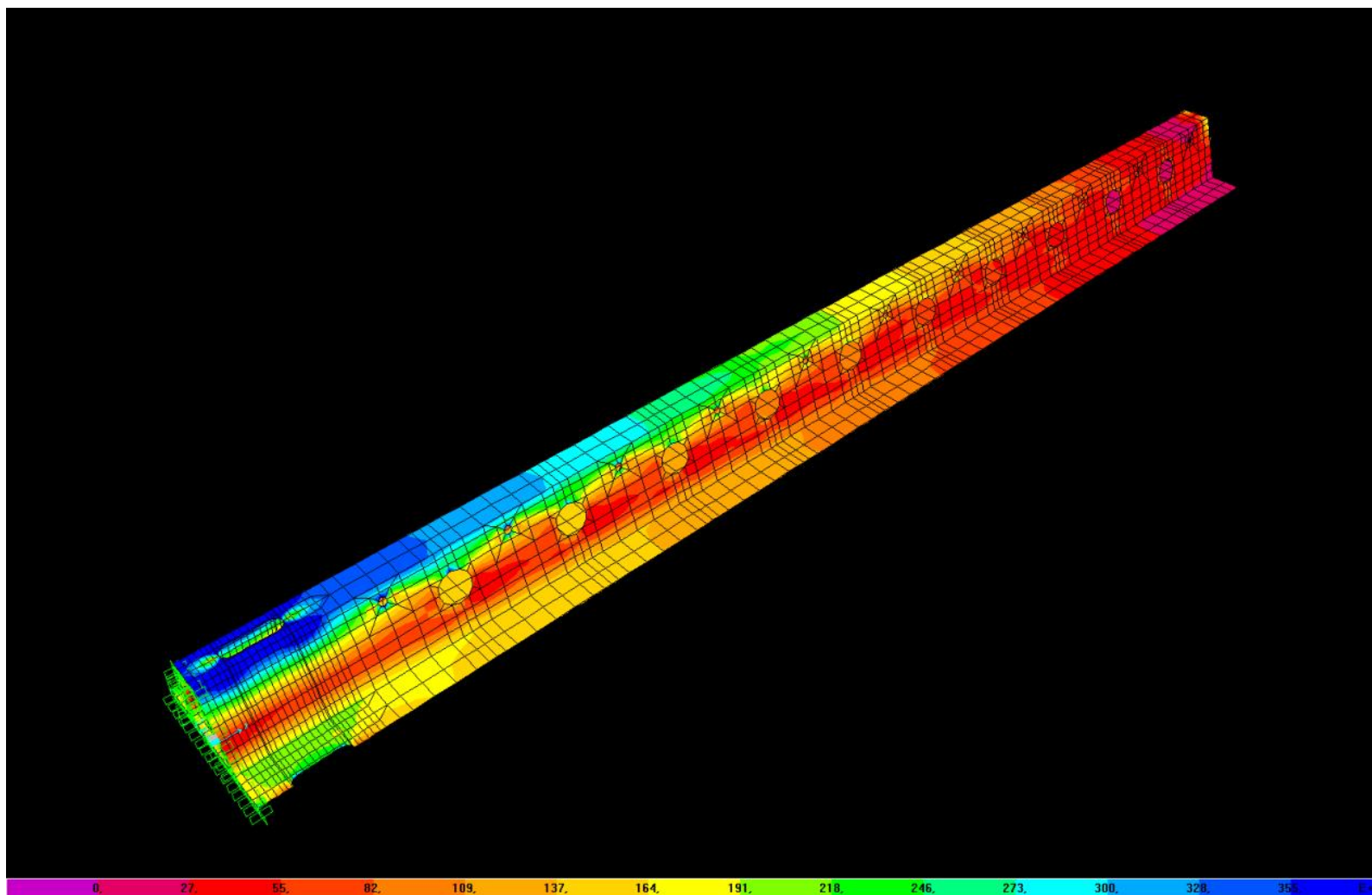
Σχήμα 4.31 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.65h$ για $F=5\text{KN}$



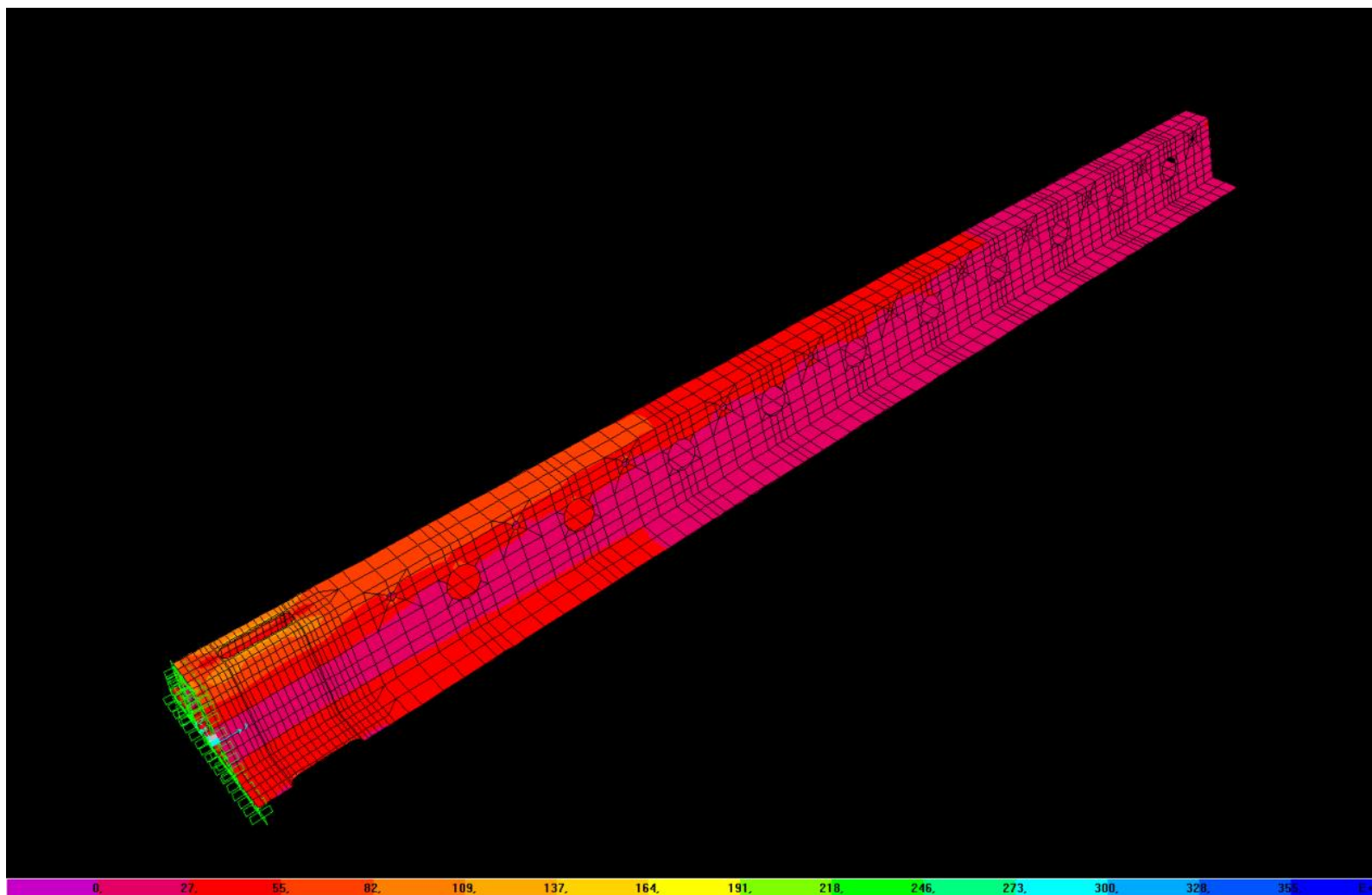
Σχήμα 4.32 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.65h$ για $F=10\text{KN}$



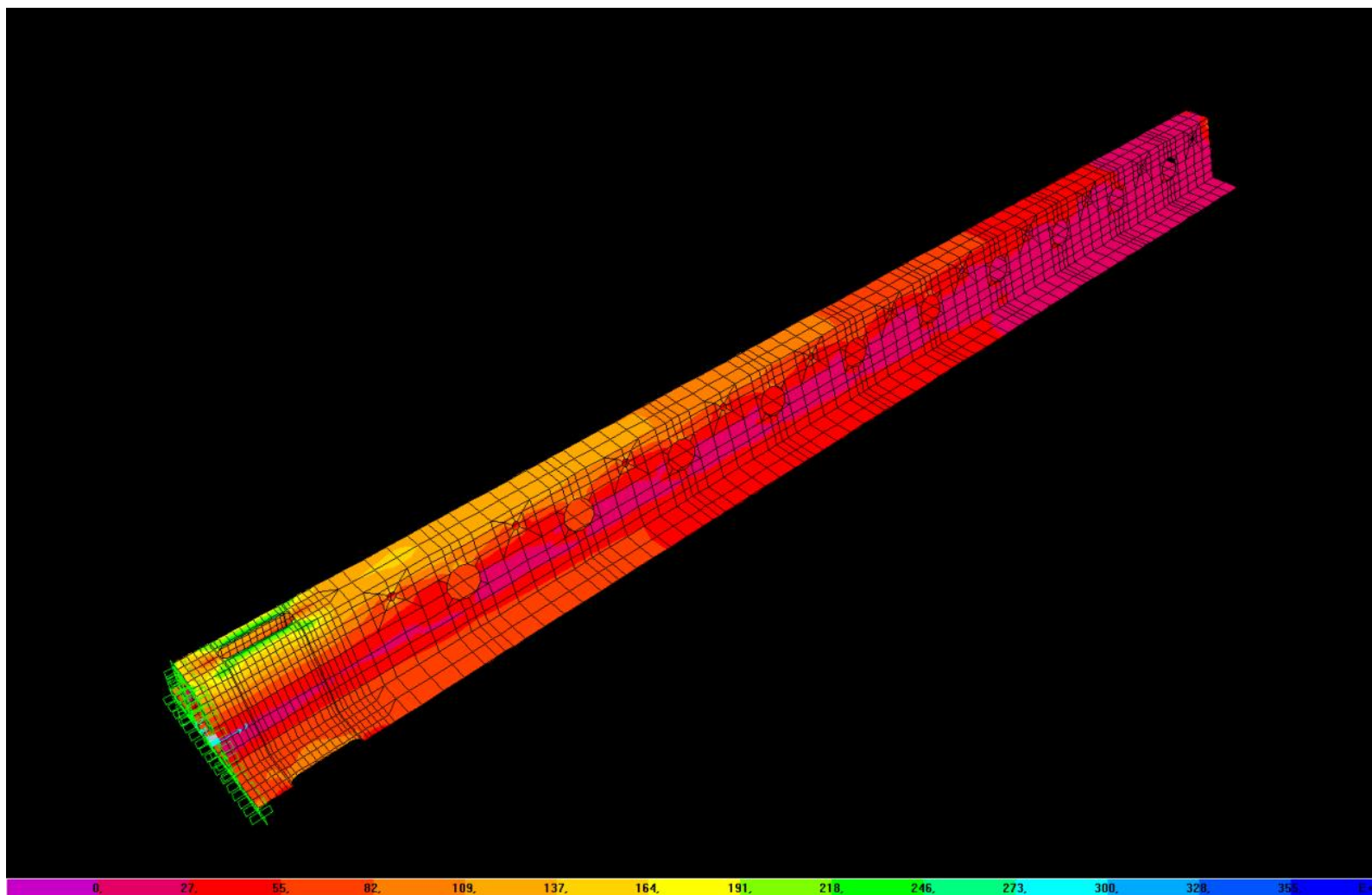
Σχήμα 4.33 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.65h$ για $F=20\text{KN}$



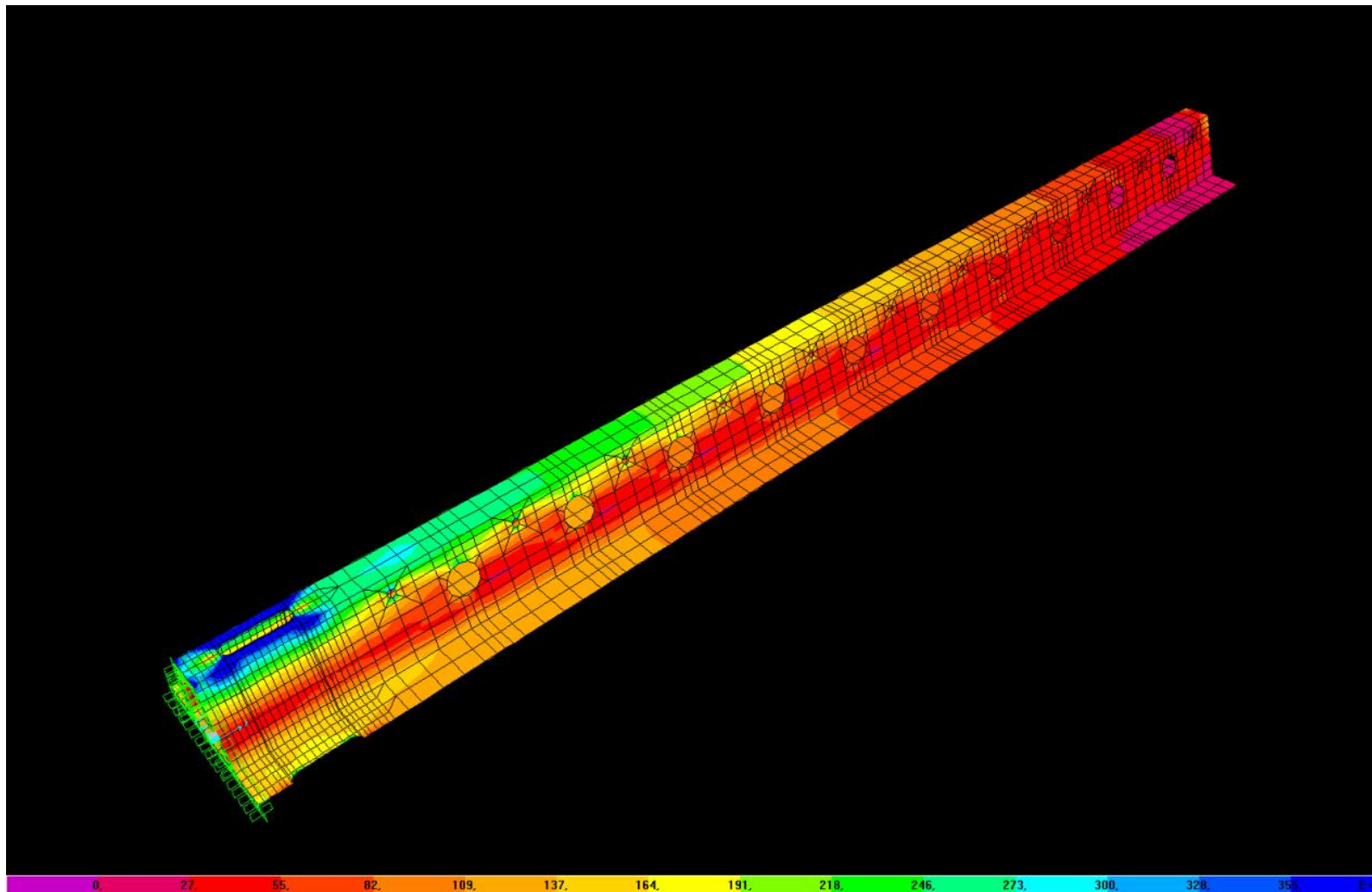
Σχήμα 4.34 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.65h$ για $F=25\text{KN}$



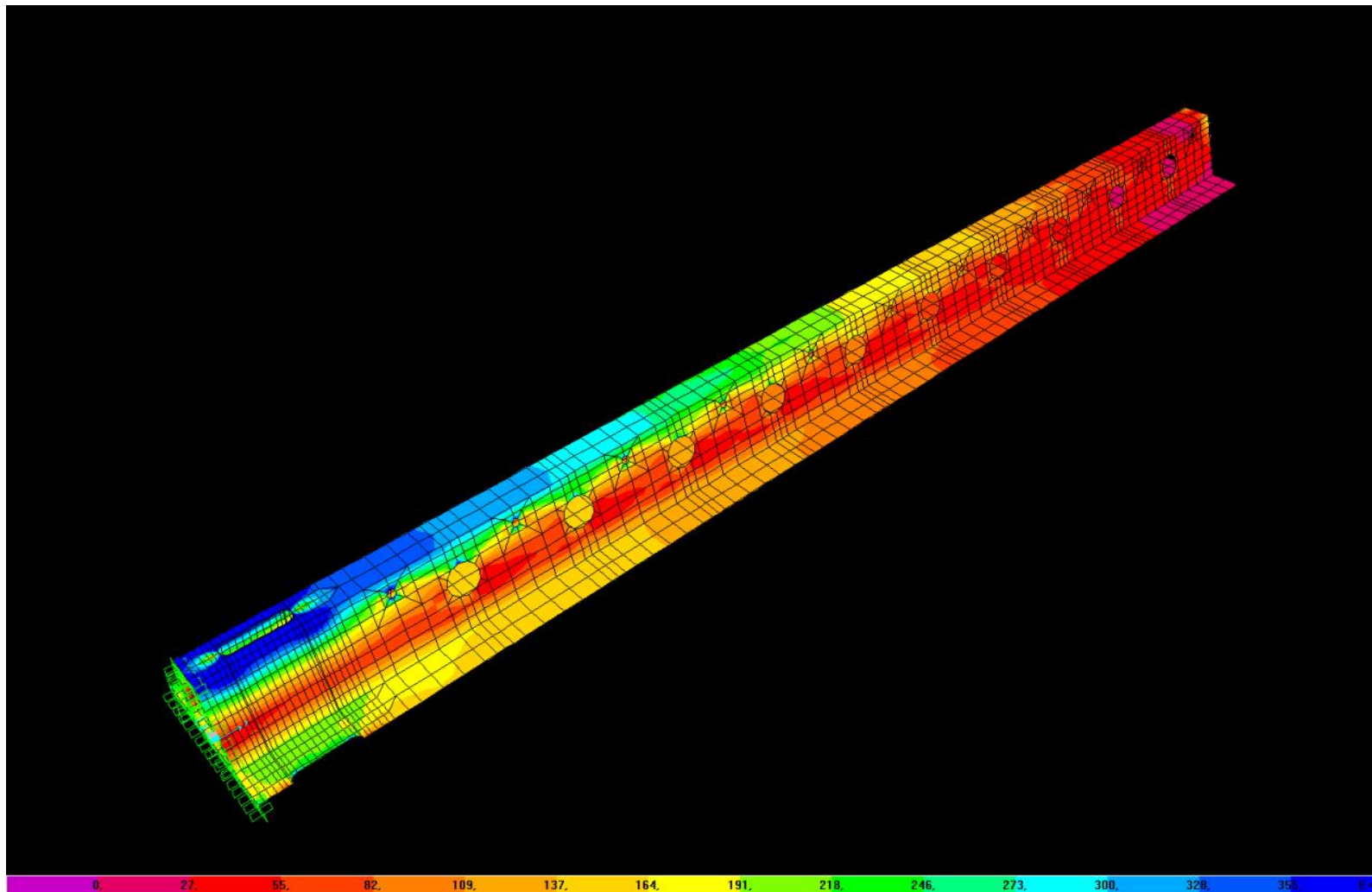
Σχήμα 4.35 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.75h$ για $F=5\text{KN}$



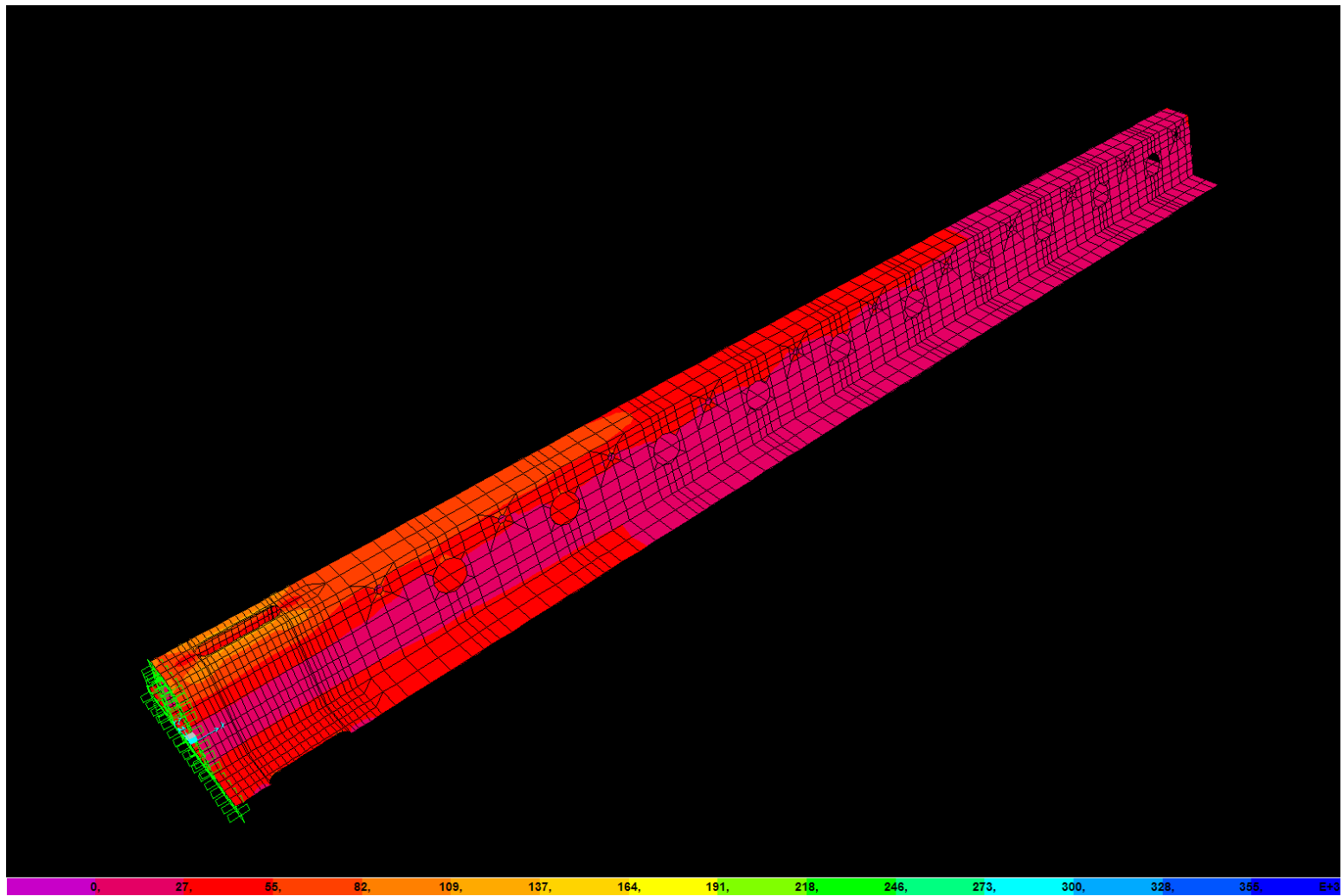
Σχήμα 4.36 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.75h$ για $F=10\text{KN}$



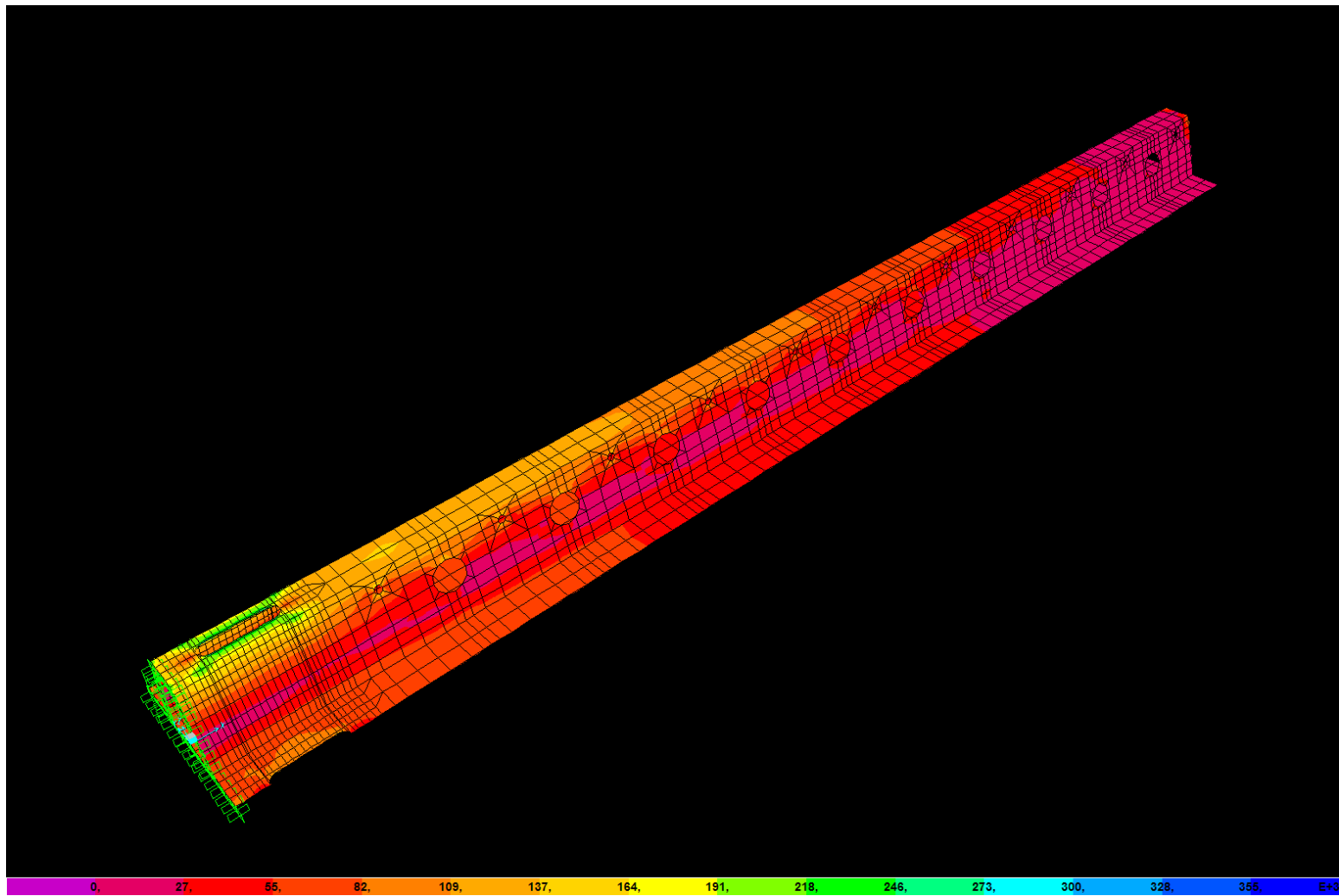
Σχήμα 4.37 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.75h$ για $F=20\text{KN}$



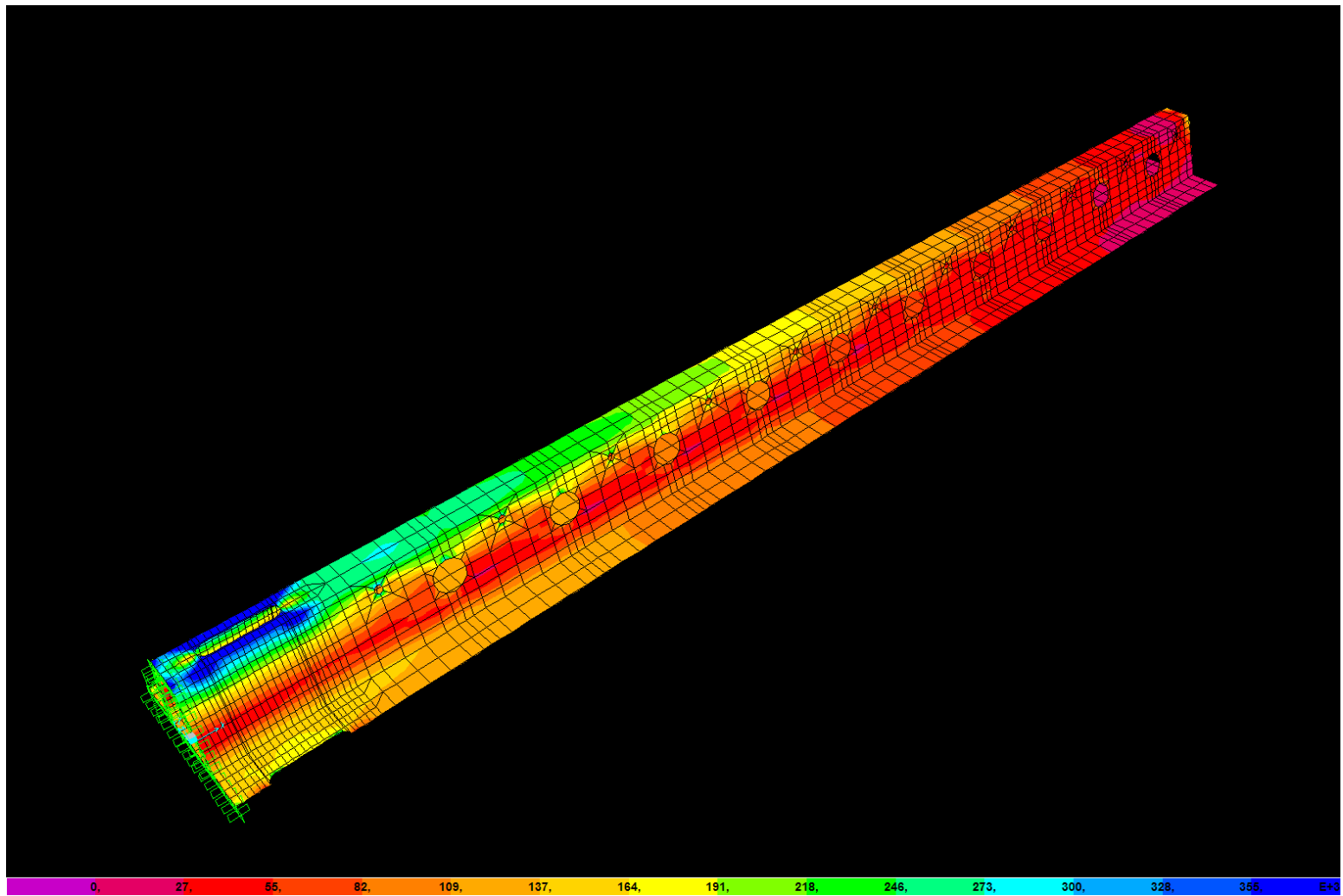
Σχήμα 4.38 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.75h$ για $F=25\text{KN}$



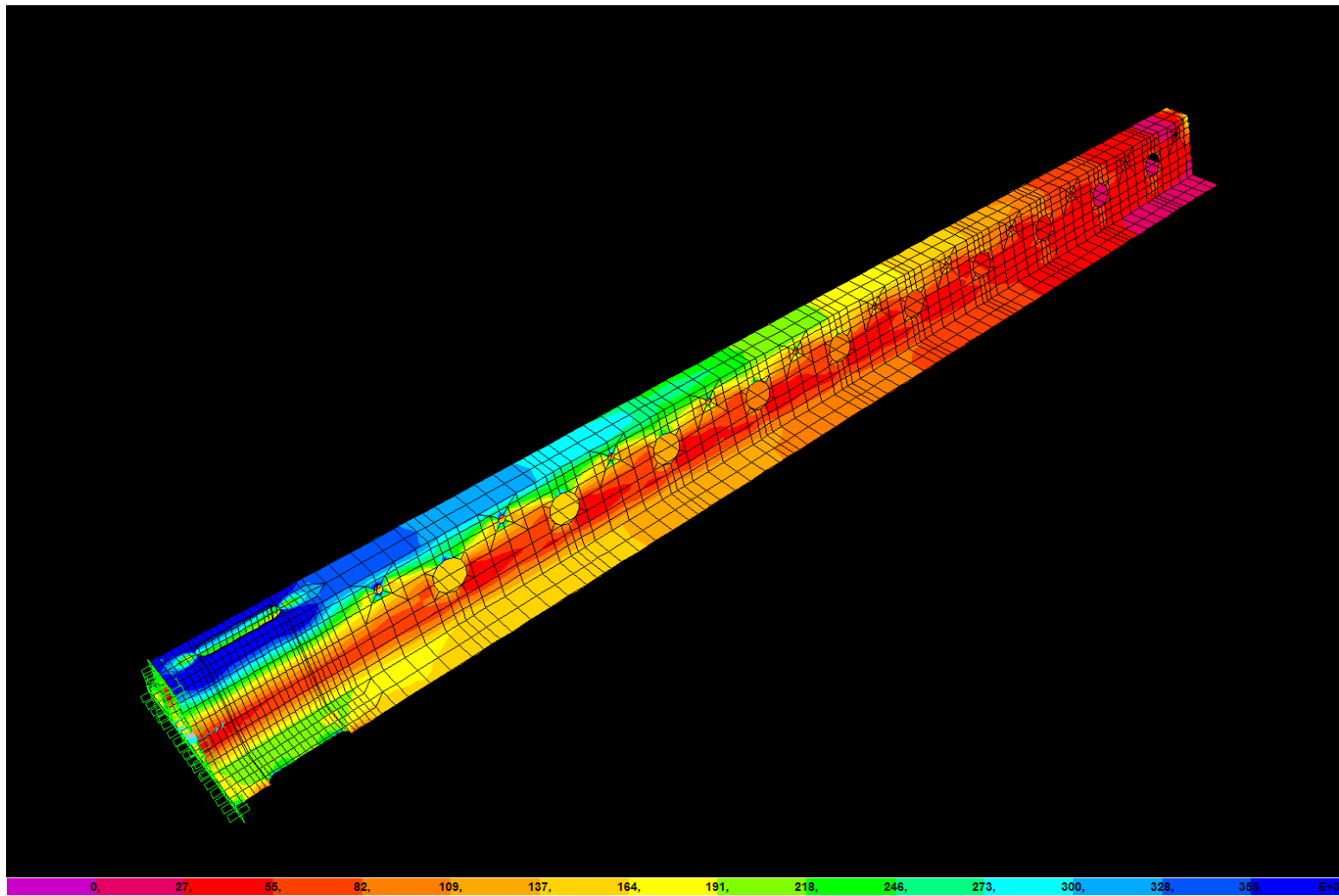
Σχήμα 4.39 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.85h$ για $F=5\text{KN}$



Σχήμα 4.40 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.85h$ για $F=10\text{KN}$



Σχήμα 4.41- Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.85h$ για $F=20\text{KN}$



Σχήμα 4.42 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.85h$ για $F=25$ kN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

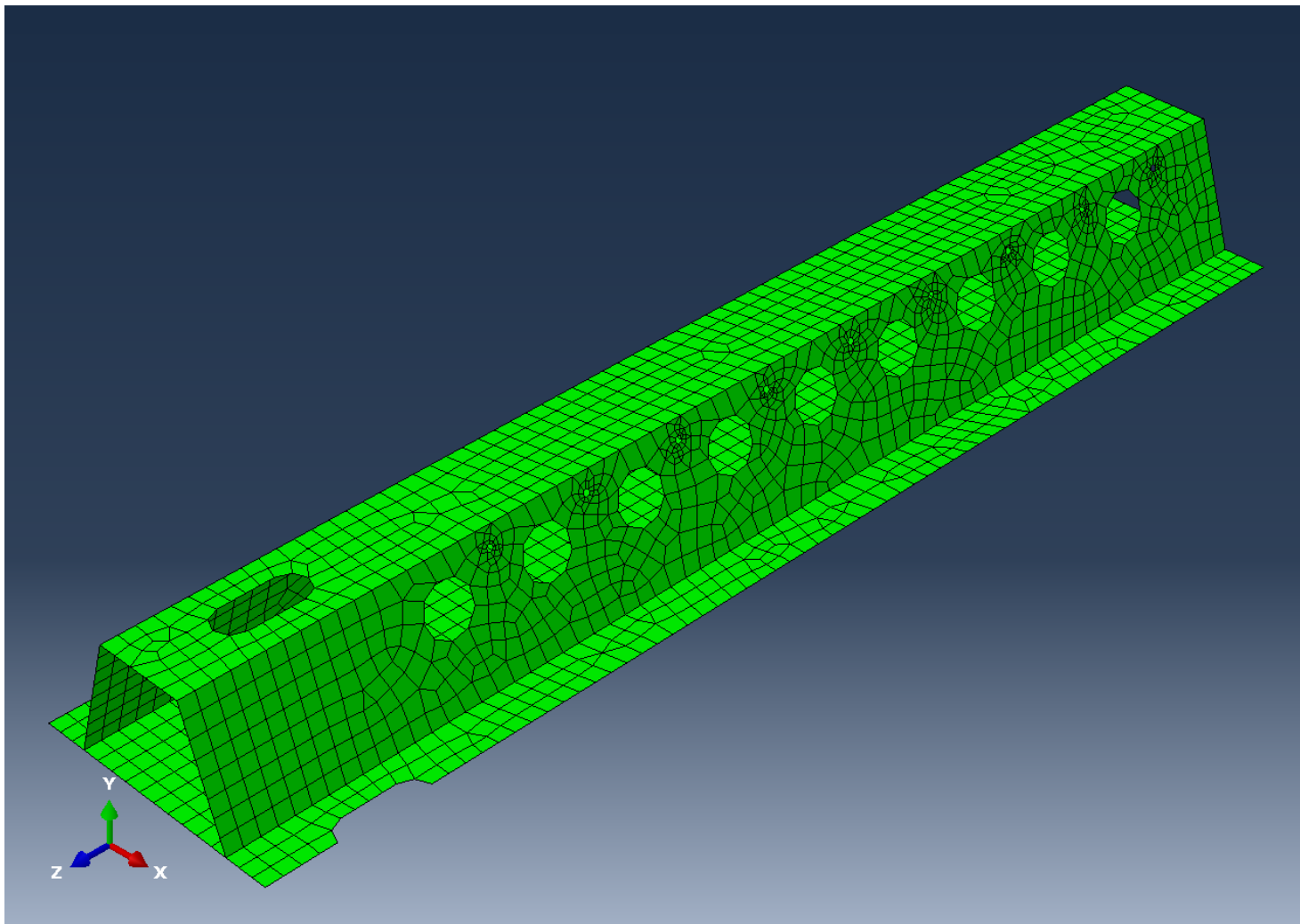
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Αρχικά, θα μελετήσουμε τη δοκό D38/500 για τρεις περιπτώσεις οπών μήκους $s=0.65h$, $s=0.75h$ και $s=0.85h$ αντίστοιχα. Εισάγουμε τα τρία προσομοιώματα των δοκών στο πρόγραμμα Abaqus, υπό τη μορφή επιφανειακών στοιχείων. Τα επιφανειακά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου S4R. Η καναβοποίηση των δοκών έγινε ανά 0,05m. Για το σχεδιασμό των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Quad-dominated. Η πρώτη δοκός αποτελείται από 3249 επιφανειακά στοιχεία και 3313 κόμβους. Η δεύτερη δοκός αποτελείται από 3201 επιφανειακά στοιχεία και 3313 κόμβους. Τέλος, η τρίτη δοκός αποτελείται από 3189 επιφανειακά στοιχεία και 3253 κόμβους.

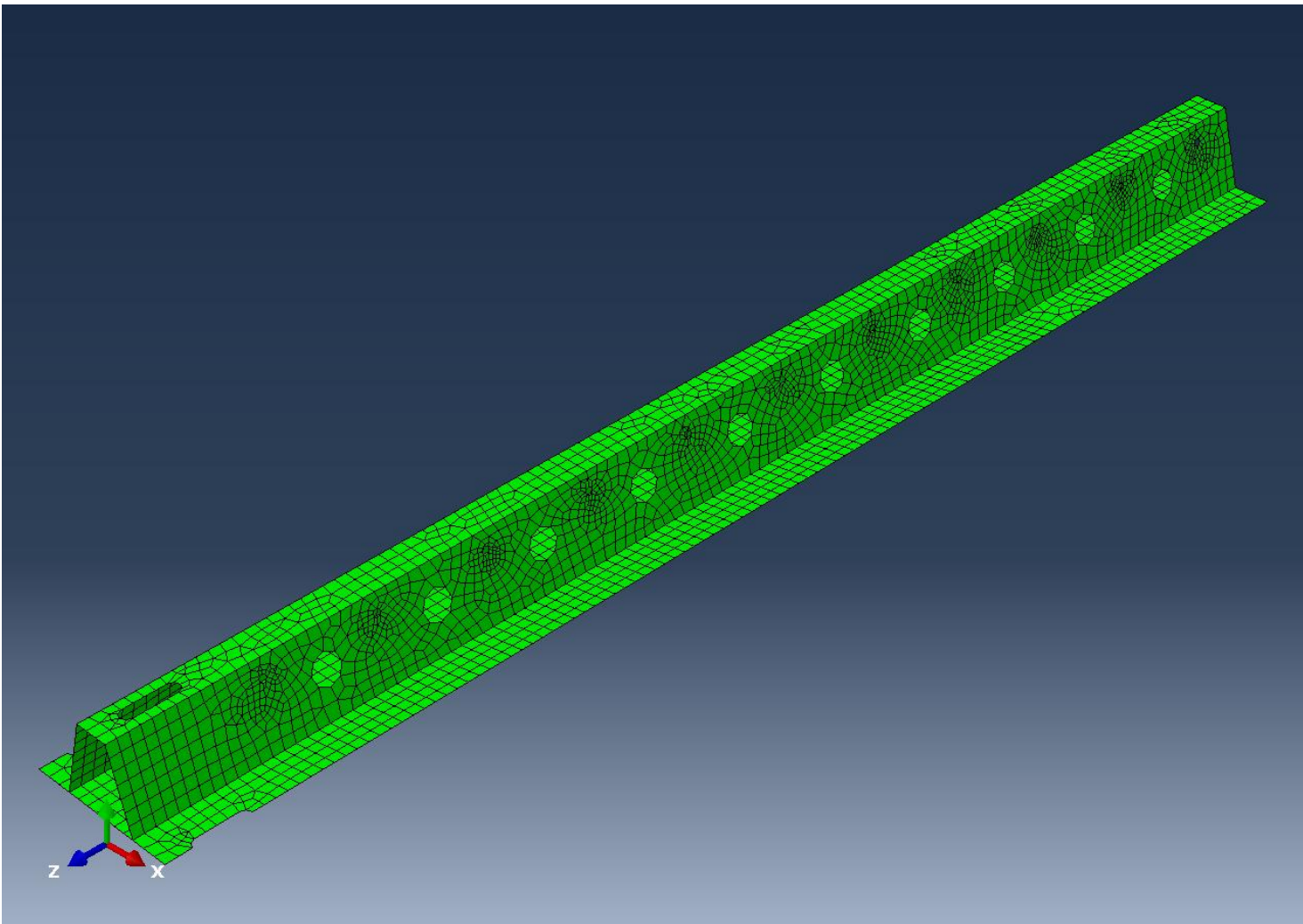
Το υλικό κατασκευής S355 ορίστηκε ως ελαστοπλαστικό μέσω της εντολής **Create Material**. Ορίστηκαν τρία είδη επιφανειακών στοιχείων ανάλογα με το πάχος των διατομών μέσω της εντολής **Create Section**. Στη συνέχεια, οι δοκοί πακτώνονται στο ένα άκρο και λειτουργούν πλέον ως πρόβολοι. Φορτίζουμε το ελεύθερο άκρο κάθε δοκού με ένα αρχικό συγκεντρωμένο φορτίο.

Ομοίως, η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την μικρότερη δοκό. Θα μελετηθεί κι αυτή για τα τρία διαφορετικά μήκη οπών. Η καναβοποίηση των δοκών έγινε ανά 0,03m και για το σχεδιασμό των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Quad-dominated. Η πρώτη δοκός $s=0.65h$ αποτελείται από 5112 επιφανειακά στοιχεία και 5166 κόμβους. Η δεύτερη δοκός $s=0.75h$ αποτελείται από 5181 επιφανειακά στοιχεία και 5230 κόμβους. Τέλος, η τρίτη δοκός αποτελείται από 5068 επιφανειακά στοιχεία και 5121 κόμβους. Οι δοκοί πακτώνονται στο ένα άκρο και στο ελεύθερο άκρο φορτίζονται με ένα συγκεντρωμένο αρχικό φορτίο.

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο τύποι δοκών.



Σχήμα 5.1 - Δοκός D38/500 με μήκος οπής $s=0.75h$

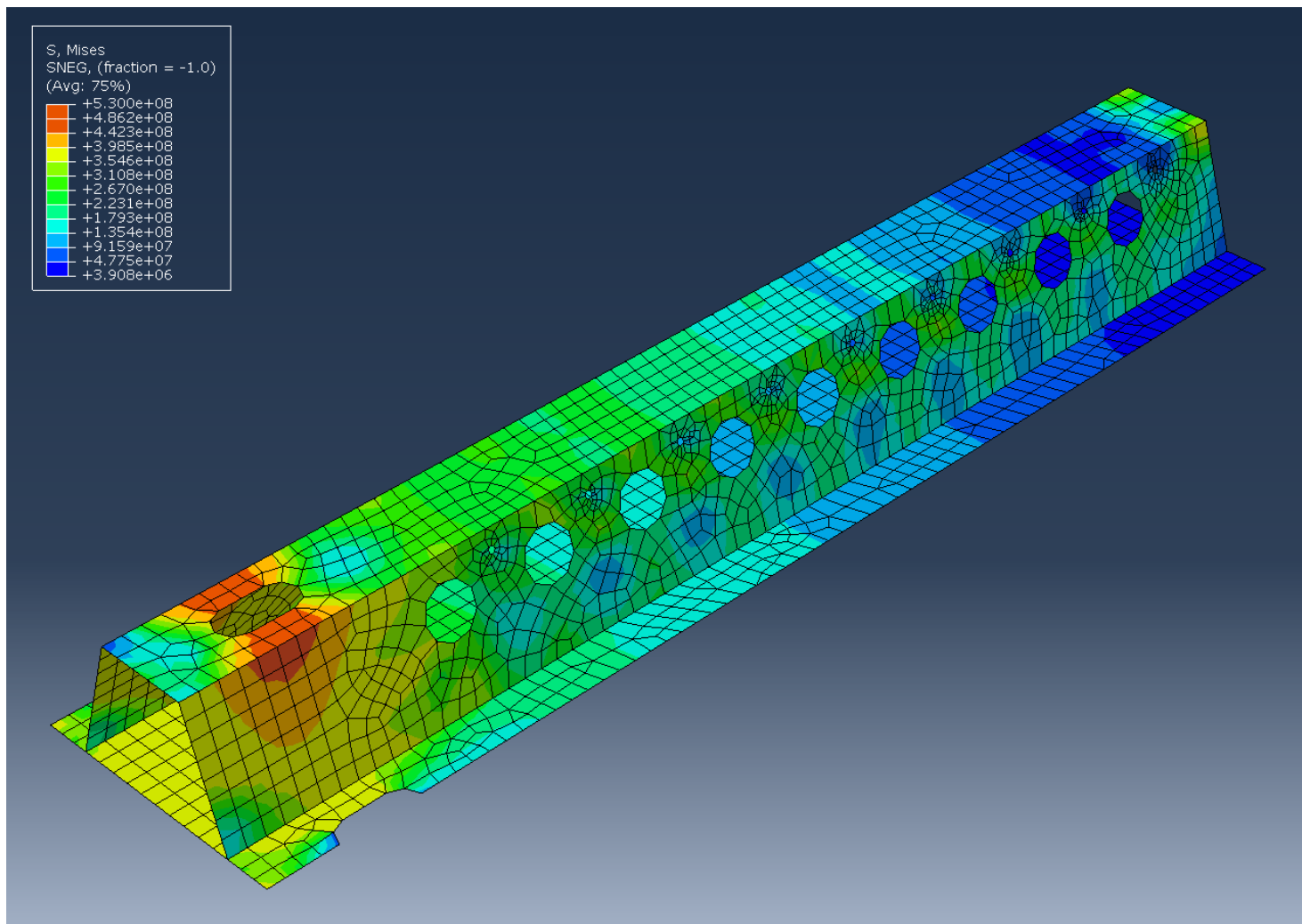


Σχήμα 5.2 - Δοκός D22/200 με μήκος οπής $s=0.75h$

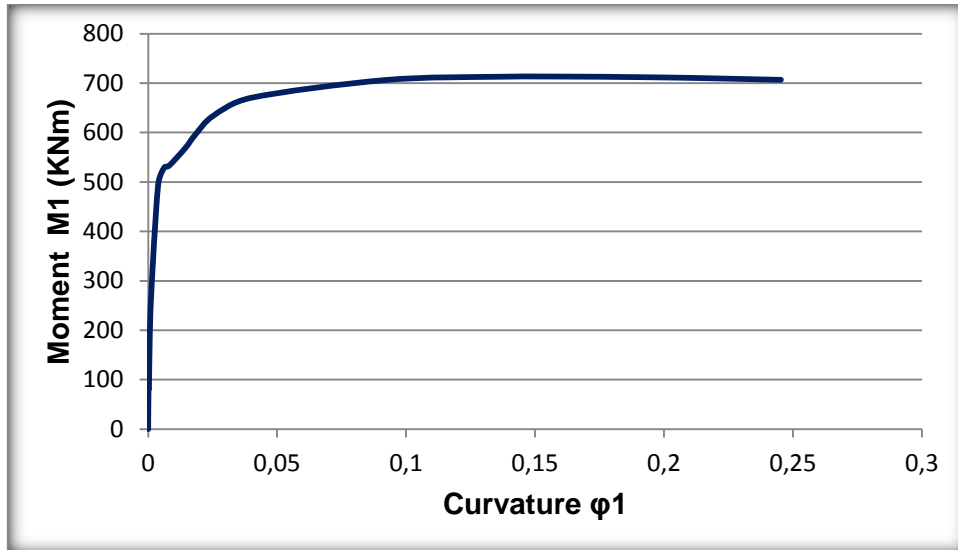
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στα σχήματα, που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δοκών D38/500 και των D22/200. Οι τάσεις που παρουσιάζονται είναι οι τάσεις Von Mises. Σε κάθε σχήμα αναγράφεται το φορτίο στο οποίο επήλθε αστοχία της δοκού. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα στοιχεία που έχουν αστοχήσει.

Επιπλέον, παρατίθενται τα διαγράμματα ροπών- καμπυλοτήτων M1- φ1 και M2- φ2 των δοκών και πίνακες με τις καμπυλότητες διαρροής και αστοχίας. Η ροπή M1 είναι η ροπή περί τον άξονα που είναι οριζόντιος της δοκού. Η ροπή M2 είναι η ροπή περί τον άξονα που είναι κάθετος στη δοκό, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.1 και 5.2.

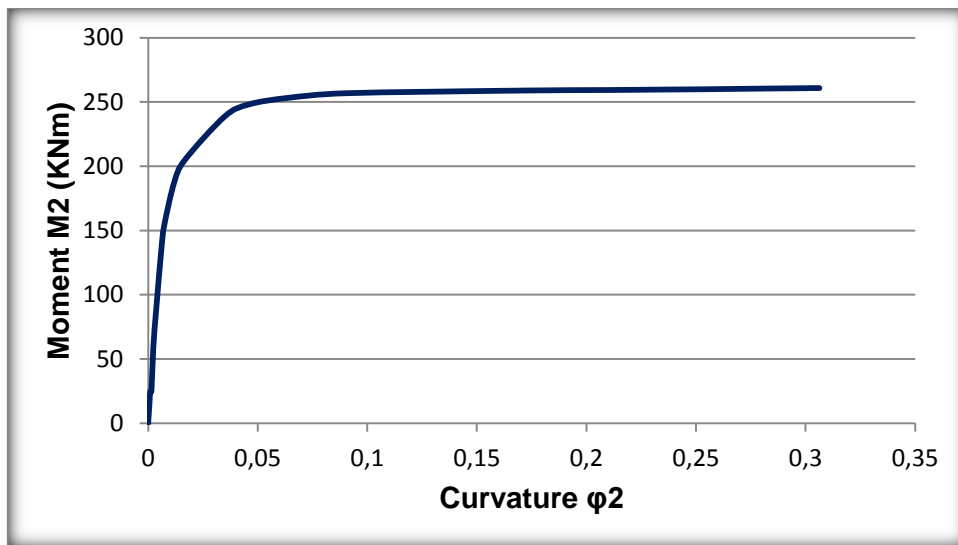


Σχήμα 5.3 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.65h$ για $F=172,5\text{KN}$



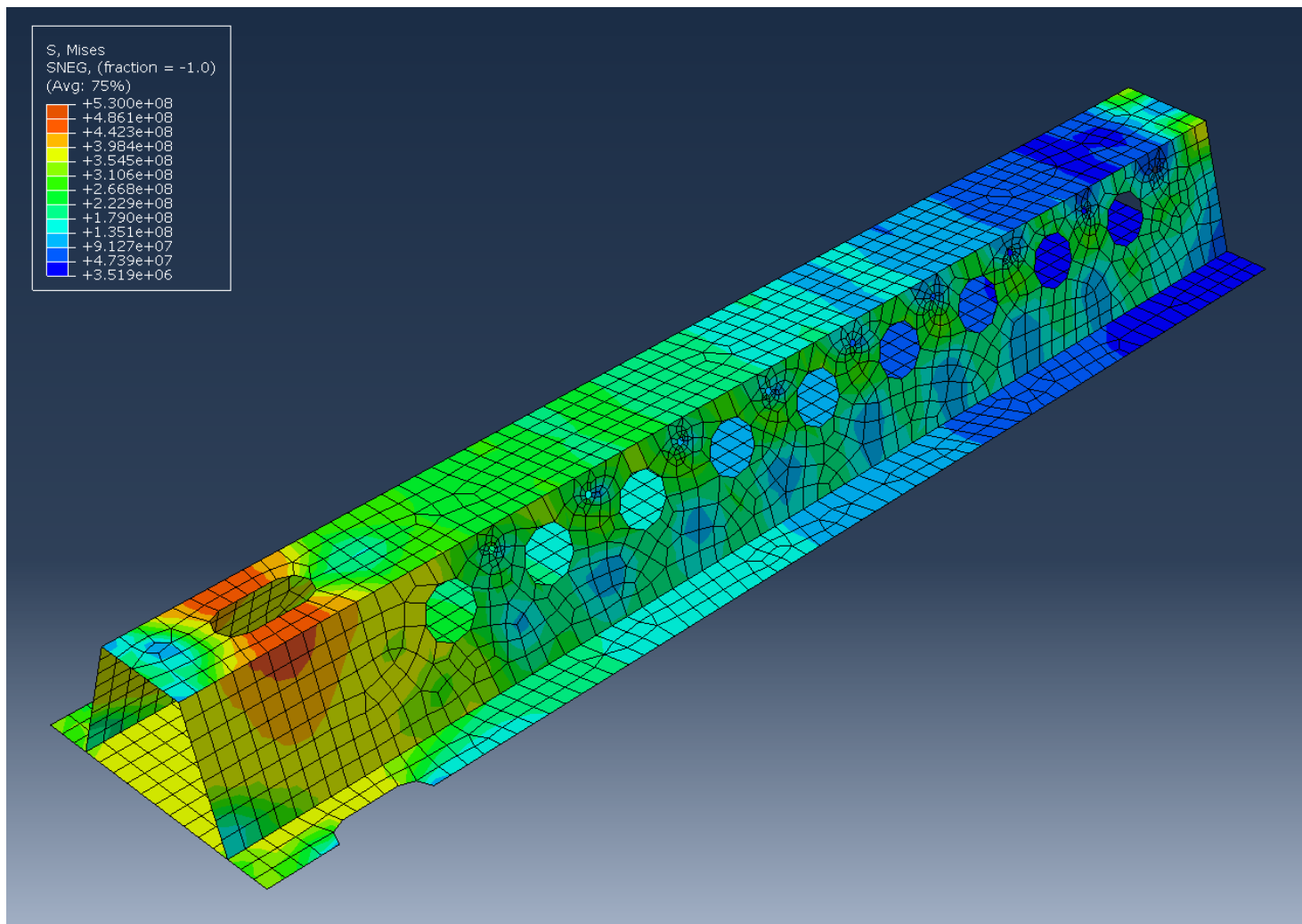
Σχήμα 5.4 - Διάγραμμα M1-φ1 για D38/500 με πλάτος οπής $s=0.65h$

	M1 (kNm)	ϕ_y	ϕ_u
$s=0.65h$	713,1	0,004	0,245

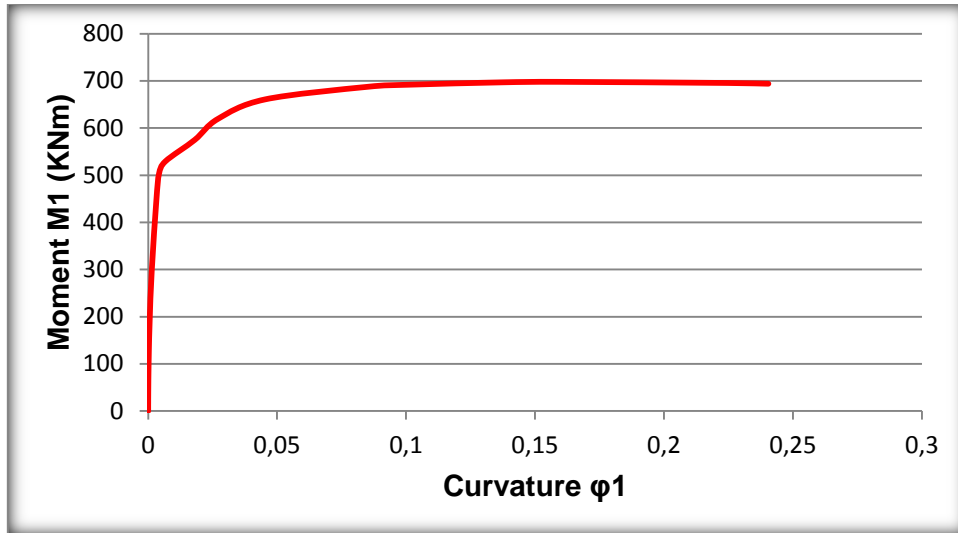


Σχήμα 5.5 - Διάγραμμα M2-φ2 για D38/500 με πλάτος οπής $s=0.65h$

	M2 (kNm)	ϕ_y	ϕ_u
$s=0.65h$	260,8	0,007	0,306

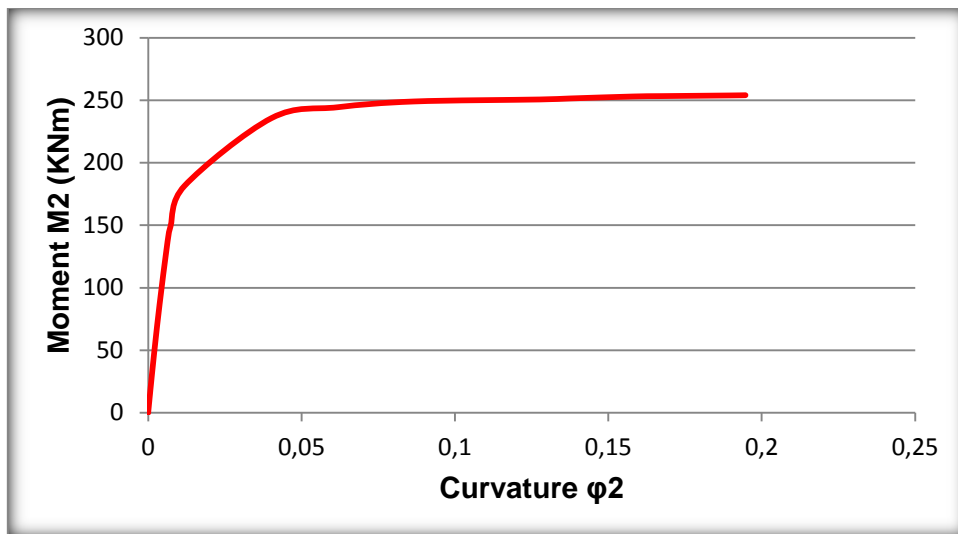


Σχήμα 5.6 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.75h$ για $F=171\text{KN}$



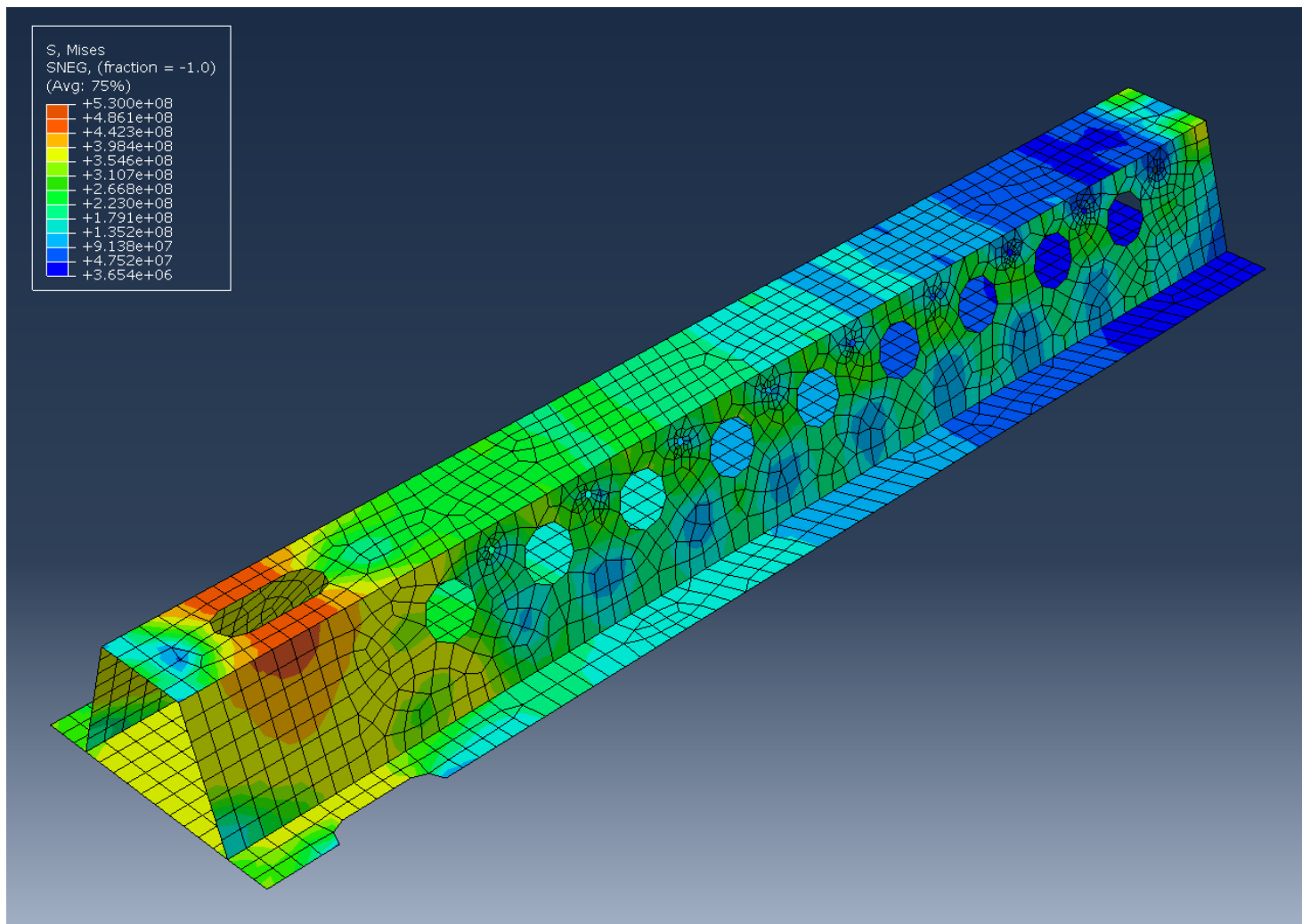
Σχήμα 5.7 - Διάγραμμα M1-φ1 για D38/500 με πλάτος οπής $s=0.75h$

	M1 (kNm)	ϕ_y	ϕ_u
$s=0.75h$	697,9	0,004	0,24

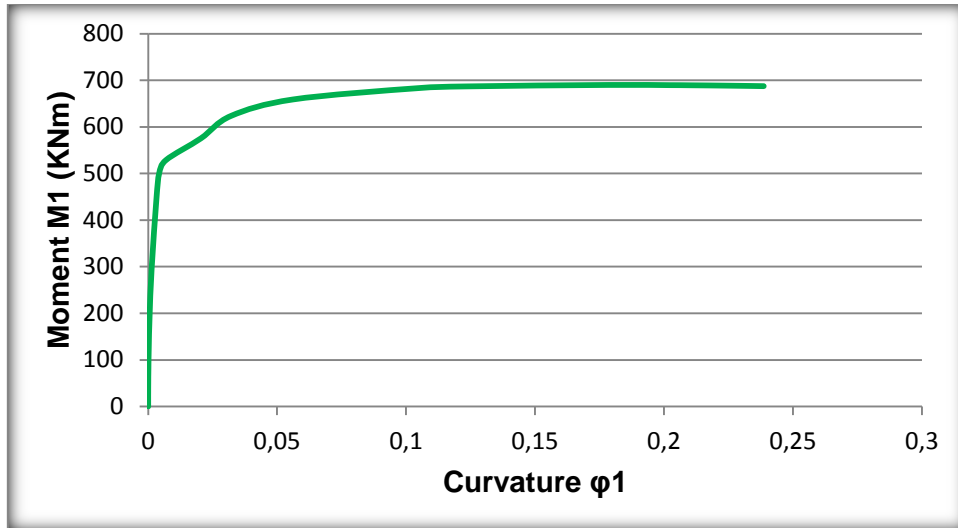


Σχήμα 5.8 - Διάγραμμα M2-φ2 για D38/500 με πλάτος οπής $s=0.75h$

	M2 (kNm)	ϕ_y	ϕ_u
$s=0.75h$	254	0,012	0,195

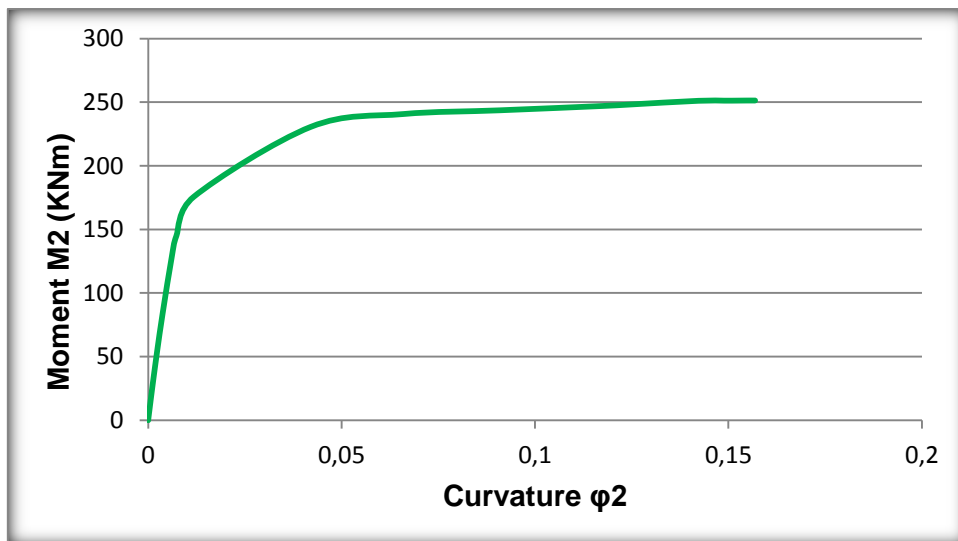


Σχήμα 5.9 - Τάσεις Von Mises της δοκού D38/500 $s=0.85h$ για $F=170\text{KN}$



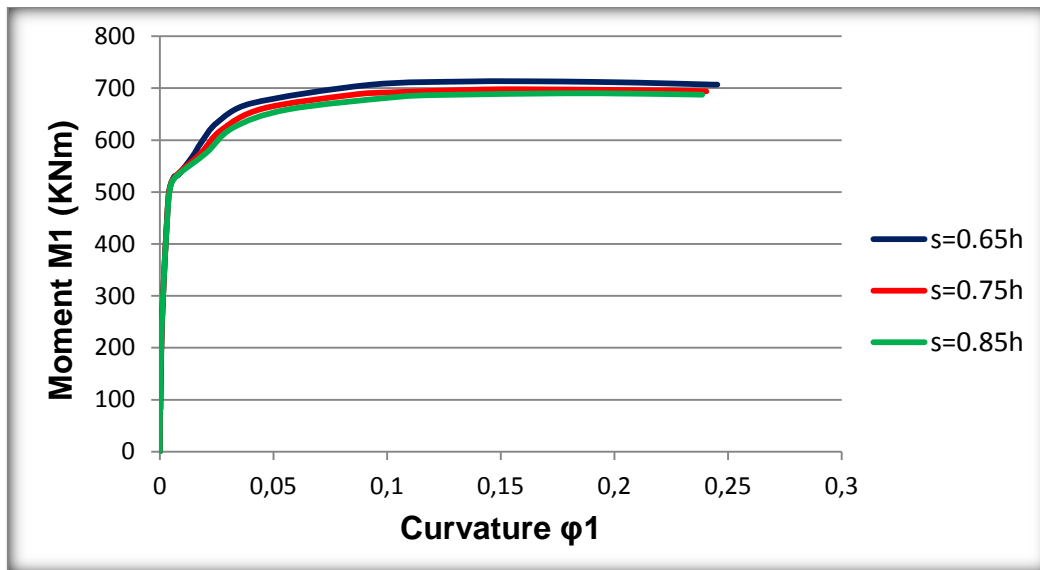
Σχήμα 5.10 - Διάγραμμα M1-φ1 για D38/500 με πλάτος οπής $s=0.85h$

	M1 (kNm)	φγ	φυ
s=0.85h	690	0,004	0,239



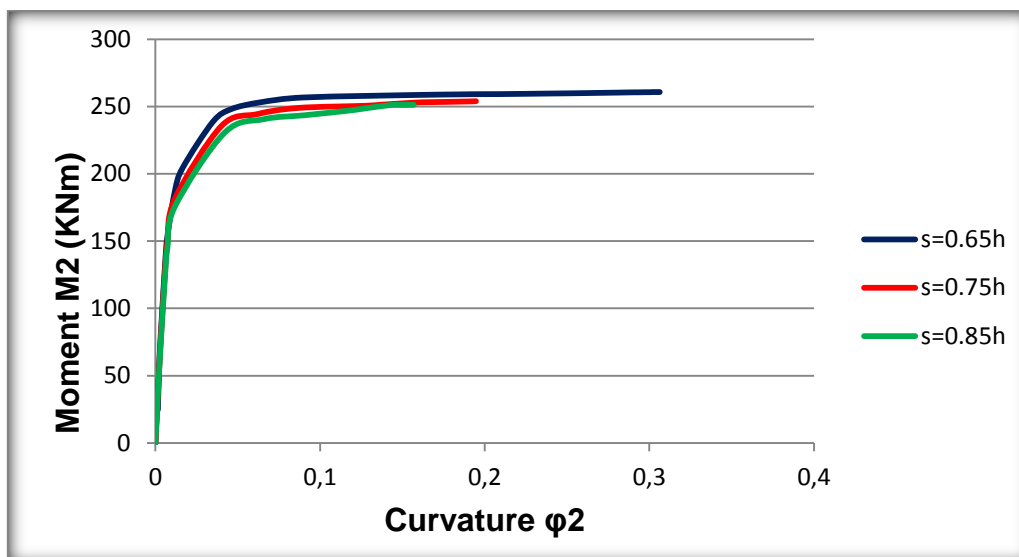
Σχήμα 5.11 - Διάγραμμα M2-φ2 για D38/500 με πλάτος οπής $s=0.85h$

	M2 (kNm)	φγ	φυ
s=0.85h	251,3	0,012	0,155



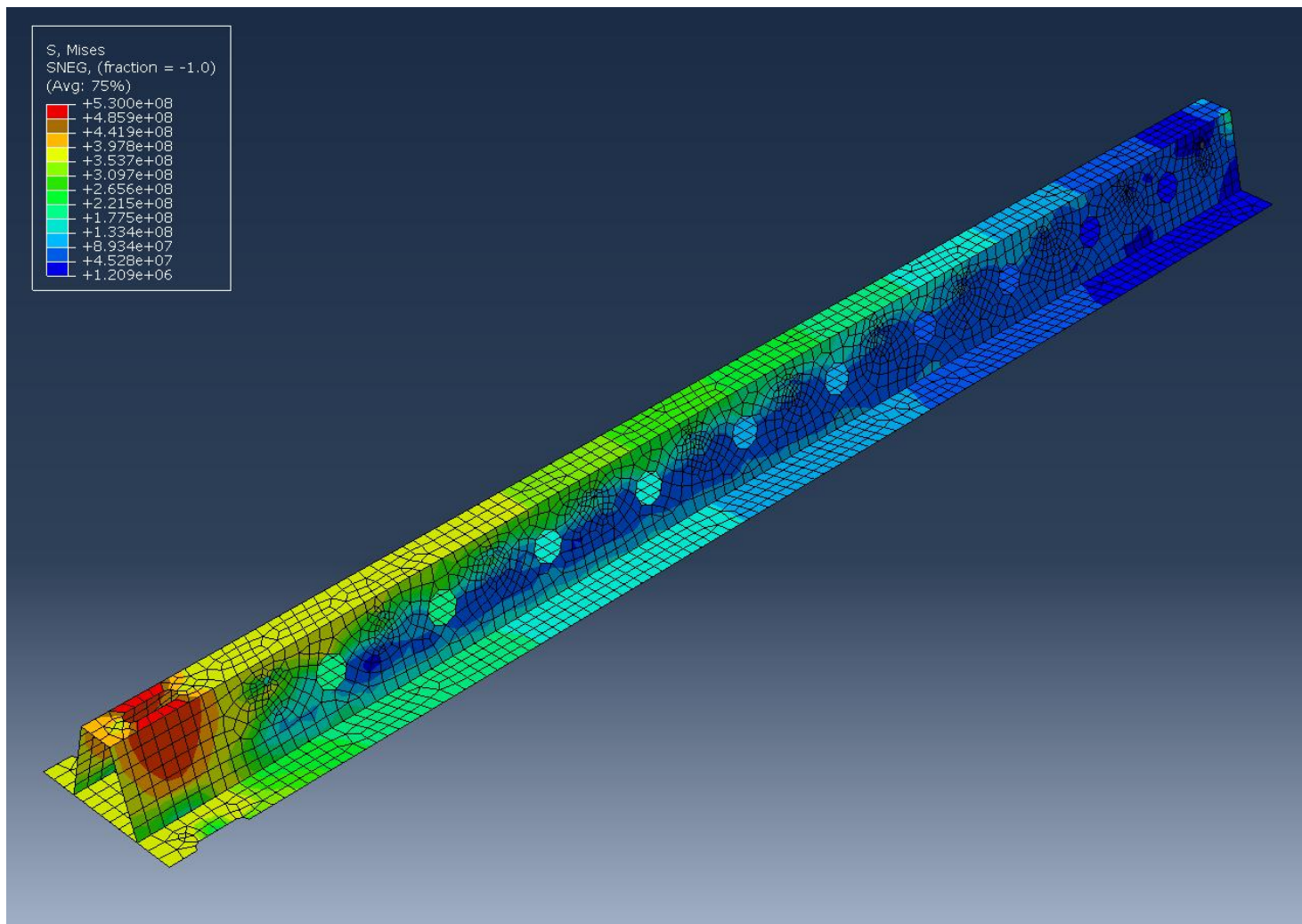
Σχήμα 5.12 - Συγκεντρωτικό διάγραμμα M1-φ1 για D38/500

	M1 (kNm)	φγ	φu
s=0.65h	713,1	0,004	0,245
s=0.75h	697,9	0,004	0,24
s=0.85h	690	0,004	0,239

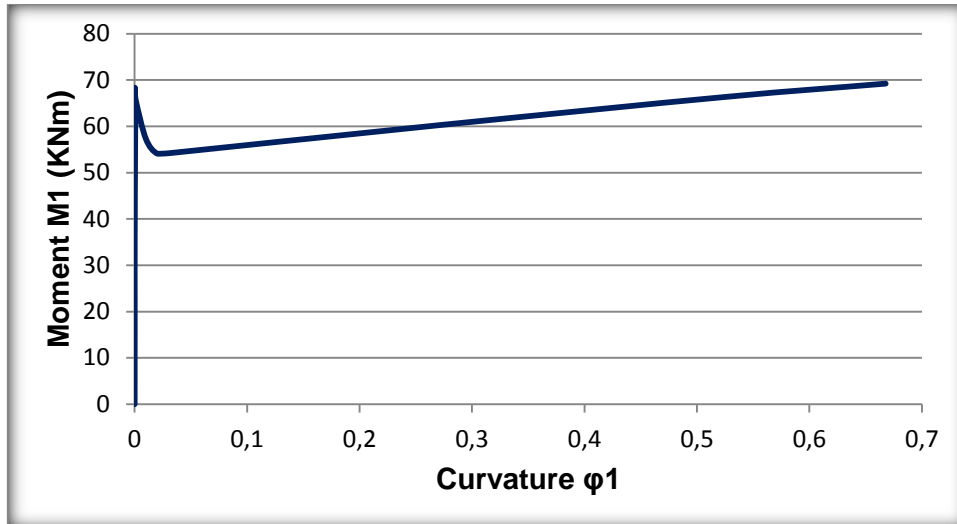


Σχήμα 5.13 - Συγκεντρωτικό διάγραμμα M2-φ2 για D38/500

	M2 (kNm)	φγ	φu
s=0.65h	260,8	0,007	0,306
s=0.75h	254	0,012	0,195
s=0.85h	251,3	0,012	0,155

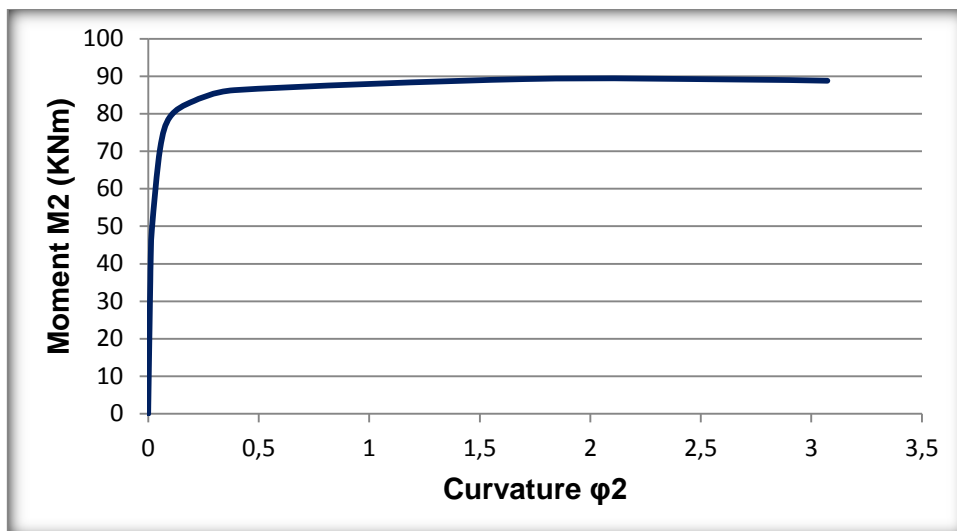


Σχήμα 5.14 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.65h$ για $F=32,7\text{KN}$



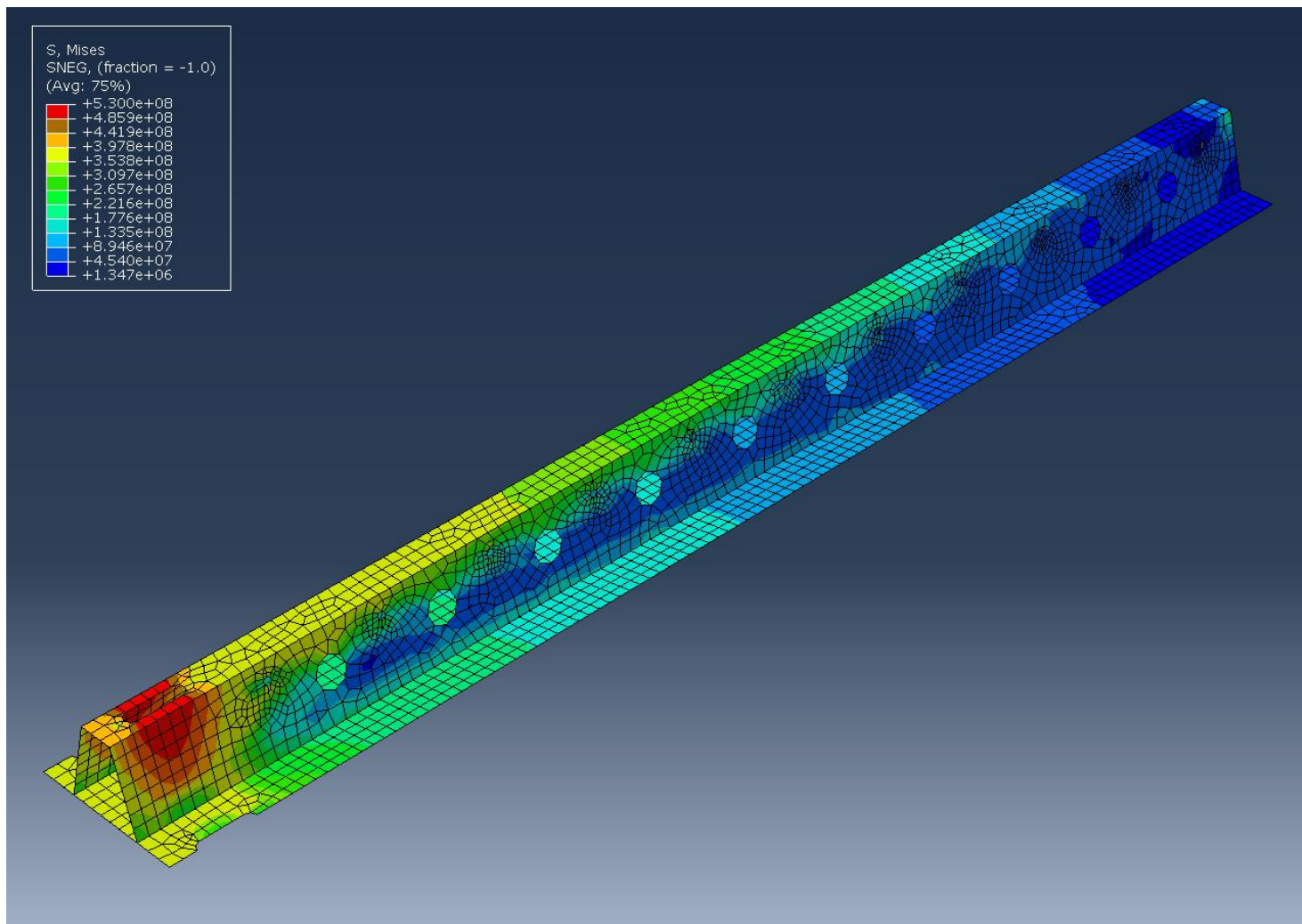
Σχήμα 5.15 - Διάγραμμα M1-φ1 για D22/200 με πλάτος οπής $s=0.65h$

	M1 (kNm)	$\phi\gamma$	$\phi\mu$
$s=0.65h$	69,22	0,003	0,668

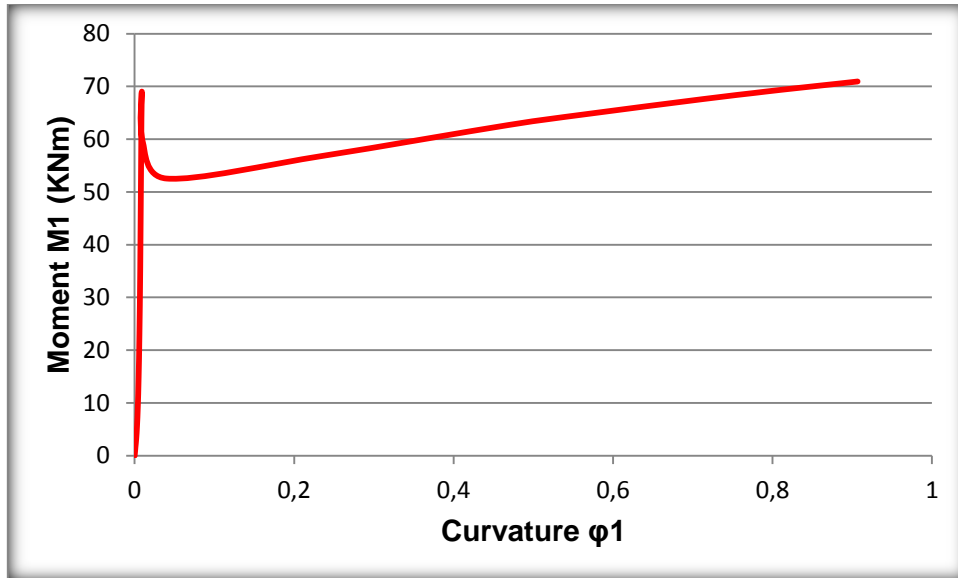


Σχήμα 5.16 - Διάγραμμα M2-φ2 για D22/200 με πλάτος οπής $s=0.65h$

	M2 (kNm)	$\phi\gamma$	$\phi\mu$
$s=0.65h$	89,24	0,098	3,073

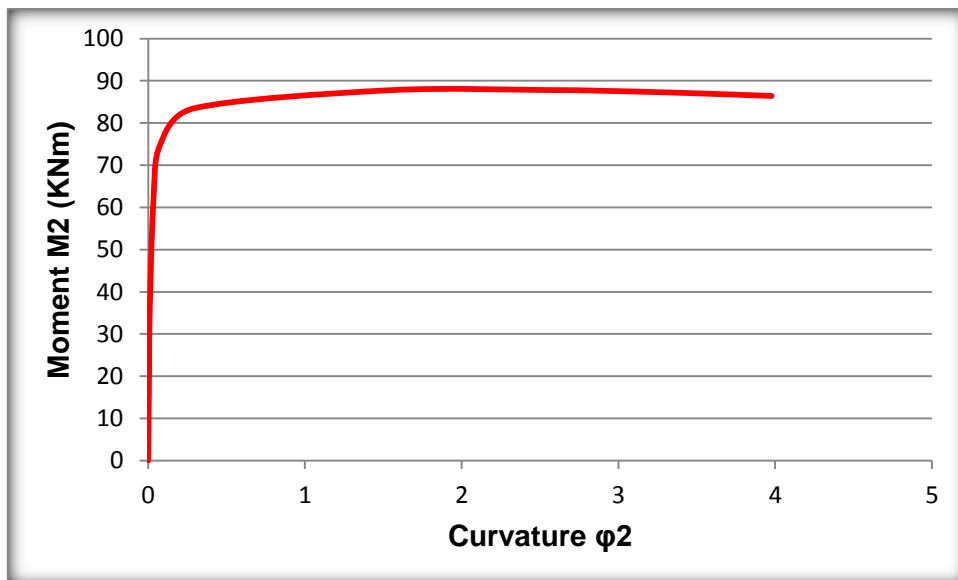


Σχήμα 5.17 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.75h$ για $F=32,4$ KN



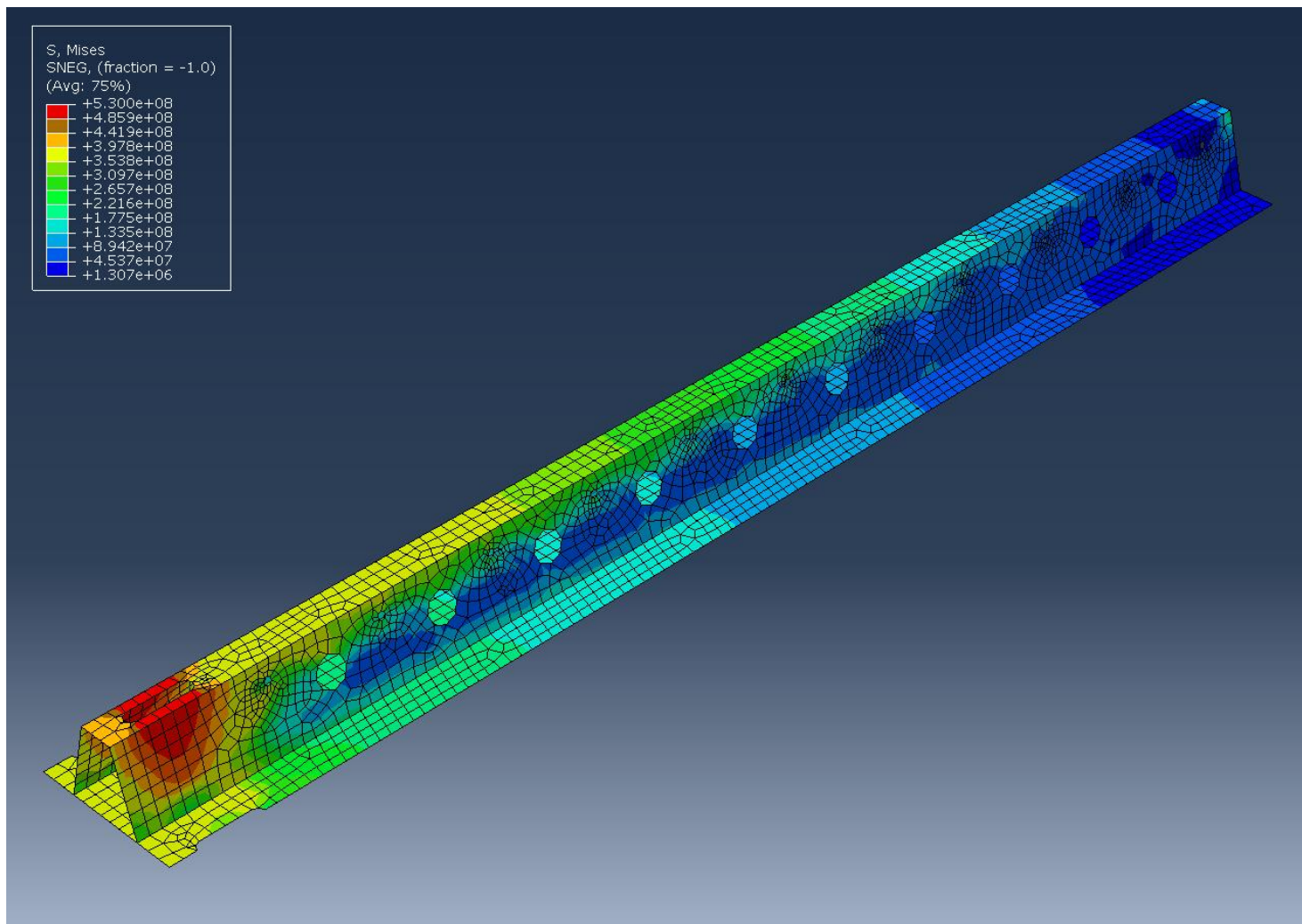
Σχήμα 5.19 - Διάγραμμα M1-φ1 για D22/200 με πλάτος οπής s=0.75h

	M1 (kNm)	φγ	φυ
s=0.75h	70,94	0,009	0,907

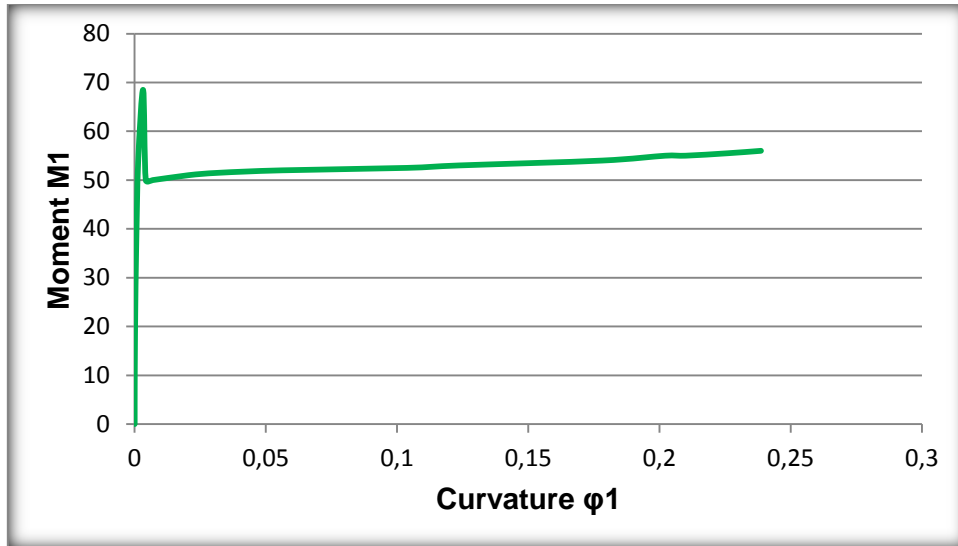


Σχήμα 5.19 - Διάγραμμα M2-φ2 για D22/200 με πλάτος οπής s=0.75h

	M2 (kNm)	φγ	φυ
s=0.75h	87,8	0,077	3,978

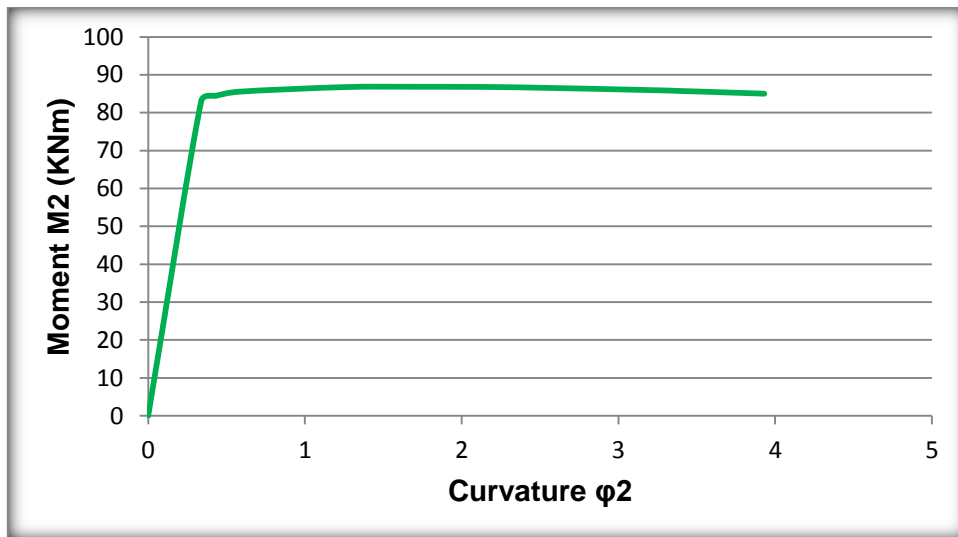


Σχήμα 5.20 - Τάσεις Von Mises της δοκού D22/200 $s=0.85h$ για $F=32,2$ KN



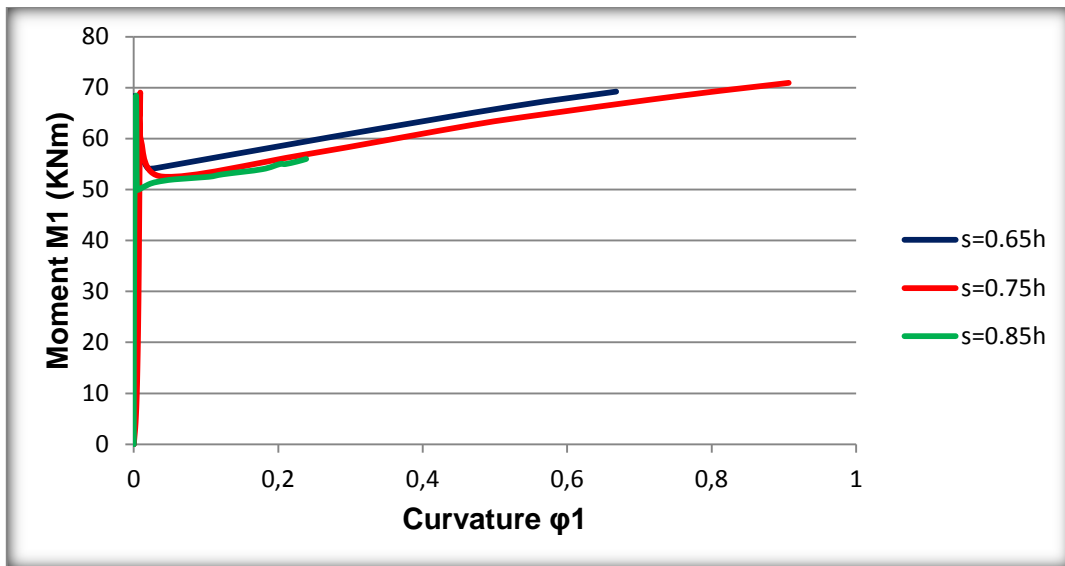
Σχήμα 5.21 - Διάγραμμα M1-φ1 για D22/200 με πλάτος οπής s=0.85h

	M1 (KNm)	φγ	φu
s=0.85h	71,3	0,003	0,239



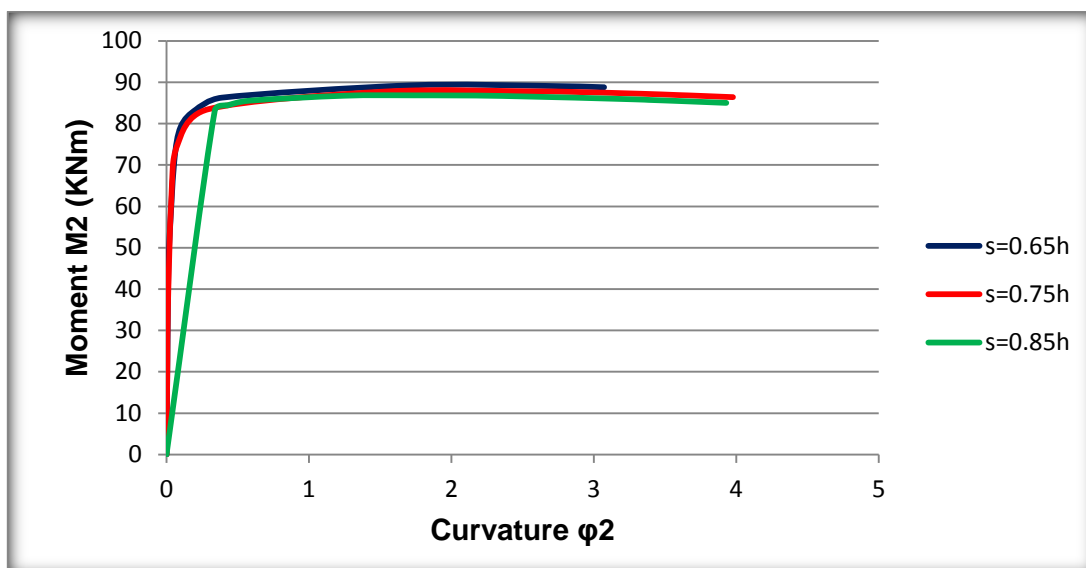
Σχήμα 5.22 - Διάγραμμα M2-φ2 για D22/200 με πλάτος οπής s=0.85h

	M2 (KNm)	φγ	φu
s=0.85h	86,83	0,012	0,157



Σχήμα 5.23 - Συγκεντρωτικό διάγραμμα M1-φ1 για D22/200

	M1 (KNm)	φγ	φυ
s=0.65h	69,22	0,003	0,668
s=0.75h	70,94	0,009	0,907
s=0.85h	71,3	0,003	0,239



Σχήμα 5.24 - Συγκεντρωτικό διάγραμμα M2-φ2 για D22/200

	M2 (KNm)	φγ	φυ
s=0.65h	89,24	0,098	3,073
s=0.75h	87,8	0,077	3,978
s=0.85h	86,83	0,012	0,157

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων συμπεραίνουμε ότι με τη χρήση της μεθόδου της απομειωμένης διατομής επιτυγχάνεται η απομάκρυνση της πλαστικής άρθρωσης από τον κόμβο δοκού- υποστυλώματος. Όπως φαίνεται στις εικόνες που προκύπτουν από τις αναλύσεις, η συγκέντρωση τάσεων είναι μεγαλύτερη στην απομειωμένη διατομή της δοκού.

Επίσης, από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα ροπών- καμπυλοτήτων παρατηρείται ότι η επιρροή του πλάτους της οπής είναι μεγαλύτερη από την επιρροή του μήκους της οπής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα τμήμα της διερεύνησης της δοκού Delta. Καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της δοκού με την απομειωμένη διατομή θα ήταν εφικτή με μελέτη της πλαισιακής συμπεριφοράς των δοκών. Η μελέτη της πλαισιακής συμπεριφοράς δίνει τη δυνατότητα χρήσης και άλλων μεθόδων απορρόφησης των σεισμικών δράσεων, όπως τοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, χιαστί συνδέσμους κ.ά.

Επιπλέον, ο κόμβος πρέπει να μελετηθεί με χρήση κι άλλων μεθόδων ενίσχυσης, όπως μεταλλικά συγκολλητά ελάσματα, κοχλιωτά κομβοελάσματα και πλευρικά ελάσματα, δηλαδή με μεθόδους ενίσχυσης του υποστυλώματος και του κόμβου χωρίς αύξηση των διατομών τους.

Τέλος, πρέπει να μελετηθεί η δοκός ως σύμμικτη και να διερευνηθεί η συμπεριφορά του χάλυβα με το σκυρόδεμα, καθώς και του στοιχείου σε ολόκληρη την κατασκευή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σύμμικτες Κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα, Ιωάννης Κ. Βάγιας
- Σχεδιασμός Δομικών Έργων από χάλυβα, Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης
- Ευρωκώδικας 3, Σχεδιασμός Δομικών Έργων από χάλυβα
- Ευρωκώδικας 4, Σχεδιασμός Σύμμικτων Κατασκευών από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα
- Ευρωκώδικας 8, Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων
- Finite Element Modeling in Engineering Practice, Κ. Σπυράκος
- Seismic Design Enhancements and the Reduced Beam Section Detail for Steel Moment Frames, Nestor Iwankiw, PE
- Cyclic Performance of Steel Moment-Resisting Connections with Reduced Beam Sections– Experimental Analysis and Finite Element Model Simulation, D.T. Pachoumis, E.G. Galoussis, C.N. Kalfas, I.Z. Efthimiou
- Local Buckling of RBS Beams Subjected to Cyclic Loading, Feng-Xiang Li, Iori Kanao, Jun Li, Kiyotaka Morisako
- Cyclic Response and Design Recommendations of Weak-Axis Reduced Beam Section Moment Connections, Chad S. Gilton, Chia-Ming Uang
- Von Mises, R. (1913). Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand
- Ford, Advanced Mechanics of Materials, Longmans, London, 1963
- Hill, R. (1950). The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, Clarendon Press
- S.M.A. Kazimi. (1982). Solid Mechanics. Tata McGraw-Hill
- Sap2000 CSI Berkeley
- Abaqus Simulia