

Μοντέλο Προσομοίωσης Δοκού Οπλισμένου Σκυροδέματος με Πεπερασμένα Στοιχεία για έλεγχο αστοχίας από τέμνουσα.

Γ. Ν. ΒΑΔΑΛΟΥΚΑΣ

Πολιτικός Μηχανικός, 4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού, Ε.Π.Ε.

Α. Γ. ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΙΔΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός, 4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού, Ε.Π.Ε.

Ε. Α. ΕΥΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΥ

Φοιτήτρια Πολιτικός Μηχανικός, ΕΜΠ

Λέξεις κλειδιά: ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΤΕΜΝΟΥΣΑ, ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης καμπτομένων δοκών, με τα κυριότερα προγράμματα υπολογιστή που κυκλοφορούν στην Ελληνική αγορά, για το σχεδιασμό τους σε τέμνουσα, σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000.

Η δοκός προσομοιώθηκε ανάλογα με το πρόγραμμα: 1. με γραμμικό στοιχείο 2. με επίπεδα στοιχεία κελύφους (shell element) με καμπτική και μεμβρανική λειτουργία 6 βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο 3. με επίπεδα στοιχεία κελύφους 5 βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο 4. με επίπεδα στοιχεία επίπεδης έντασης 5. με επίπεδα στοιχεία κελύφους 3 με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο Δx, Δy, Δz. Οι ράβδοι διαμήκους οπλισμού και οι συνδετήρες προσομοιώθηκαν με γραμμικά στοιχεία. Οι οριακές συνθήκες «επαφής» του οπλισμού με το σκυρόδεμα προσομοιώθηκαν μέσω κοινών κόμβων μεταξύ γραμμικών και επιπέδων στοιχείων. Ο σχεδιασμός περιελάμβανε δράσεις χωρίς σεισμό. Ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα ως προς τις τιμές V_{Rd2} και V_{Rd3} .

ΓΕΝΙΚΑ

Η δοκός του σχήματος 1. είναι αμφίπακτη ορθογωνικής διατομής, πάχους 25 cm και ύψους 50 cm. Απόσταση των 2 σημείων πάκτωσης 3m. Το μήκος είναι μεγαλύτερο από $4 \times H$, ώστε να θεωρηθεί ως γραμμικό στοιχείο.

Υλικά για τον σχεδιασμό: Σκυρόδεμα C16/20 και χάλυβας κυρίως οπλισμού και συνδετήρων S400. Ομοιόμορφο φορτίο 100KN/M. Στην τιμή έχουν ληφθεί υπ όψη και οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας των δράσεων.

Αγνοείται ο έλεγχος σε κάμψη, αφού δεν συσχετίζεται με τον έλεγχο αντοχής λόγω λοξής θλίψης κορμού και τον έλεγχο οπλισμού έναντι τεμνουσών. Χρησιμοποιείται το τυπολόγιο της παραγράφου 11.2.3 του ΕΚΩΣ 2000.

Η τέμνουσα αντοχής σε σχεδιασμό λόγω λοξής θλίψης κορμού σύμφωνα με την σχέση 11.7 του ΕΚΩΣ 2000 είναι

$$V_{Rd2} = 1 / 2 * v * f_{cd} * b_w * z$$

όπου $v = 0.7 - f_{ck} / 200 > 0.5$

και $z = 0.9 * d$.

Επειδή δεν υπάρχουν αξονικές δυνάμεις δεν ελέγχεται το V_{Rd2red} .

Με $v = 0.62$ και $d = 450$ mm. το z είναι 405 mm.

Με $f_{cd} = 16 / 1.5 = 10.6$ N/mm² και $b_w = 250$ mm το $V_{Rd2} = 332$ KN.

Η V_{sd} στην παρειά είναι $Q * L / 2 = 150$ KN.

Η επάρκεια της διατομής σε έλεγχο περιορισμού λοξής θλίψης κορμού ικανοποιείται κατά $V_{Rd2} / V_{sd} = 2.2$ φορές. Η μεγαλύτερη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί είναι $1 / 2 * v * f_{cd} = 3200$ KN/m². Με υπερέπάρκεια 2.2, η τάση πρέπει να είναι 1550 KN/m²

Ο απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης υπολογίζεται από την σχέση 11.11 του ΕΚΩΣ 2000 με

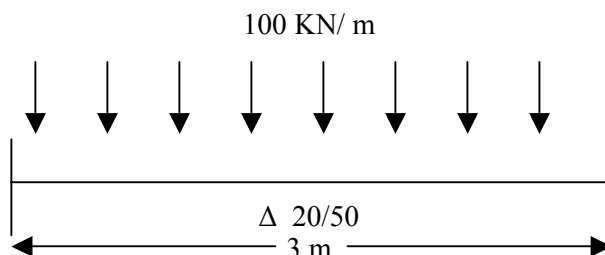
$$V_{wd} = V_{sd} - V_{rd1}$$

Γωνία συνδετήρων 90 μοίρες. Για αυθαίρετα εκλεγέντα οπλισμό 2Φ20 το ποσοστό διαμήκους ρ είναι 0.0058. Το $\kappa = 1.15$ και $\tau_{rd} = 0.22$ N/mm² οπότε το $V_{rd1} = 41$ KN.

Η τιμή της V_{sd} σε απόσταση 45 cm από την παρειά είναι 105 KN .

$V_{wd} = 64$ KN $\rightarrow A_s / s = 0.045$ cm²/cm ή 0.45cm² ανά 10 cm.

Θα ελεγχθούν διάφορα προσομοιώματα κατά πόσο εκφράζουν ποσοτικά την επάρκεια της διατομής για τους προαναφερόμενους ελέγχους.



Σχήμα 1. Η δοκός.

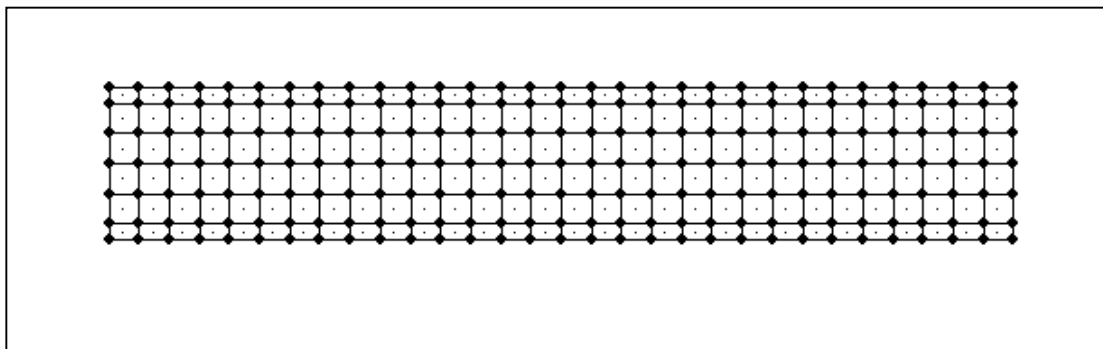
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα και προσομοιώματα.

1. Το GT STRUDL της “Computer Aided Structural Engineering - Center School of Civil and Environmental Engineering - Georgia Institute of Technology - Atlanta”

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει χωρικά γραμμικά ελαστικά στοιχεία (Members), στοιχεία καλωδίου (Cable), ειδικά γραμμικά, επίπεδα στοιχεία με 6 βαθμούς ελευθερίας, στοιχεία επίπεδης έντασης, στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, τρισδιάστατα στοιχεία. Δέχεται φορτία στα μέλη ή και στους κόμβους. Έχει δυνατότητα στατικής, δυναμικής ανάλυσης κ.λ.π. Η ανάλυση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική γεωμετρίας ή και υλικού. Για την προσομοίωση συνθηκών επαφής διαθέτει στοιχεία ελατηρίου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στη γραμμική ανάλυση όσο

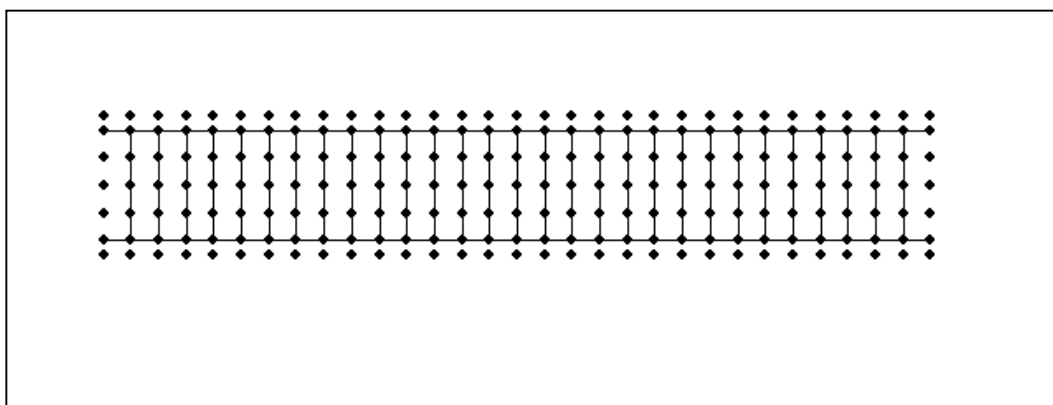
και στην μη γραμμική. Η προσομοίωση της δοκού με το συγκεκριμένο πρόγραμμα έγινε με βάση τον κάρναβο που φαίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Κάρναβος

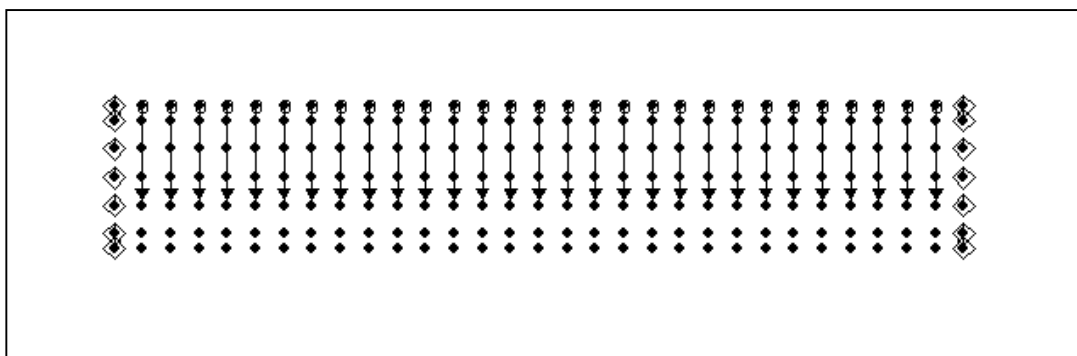
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ Ι.

Τα τετρακομβικά στοιχεία είναι SBHQ6 με μέτρο ελαστικότητας 27.5 Gpa (πίνακας 2.2 ΕΚΩΣ 2000), οι συνδετήρες γραμμικά αμφιαρθρωτά στοιχεία με μέτρο ελαστικότητας 200 Gpa και εμβαδόν 0.45cm², οι ράβδοι διαμήκους οπλισμού γραμμικά αμφιαρθρωτά στοιχεία διατομή 6.28 cm². Το φορτίο ομοιομορφισμένο στους πάνω κόμβους με τιμή 10KN. Τα γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία φαίνονται στο σχήμα 3.



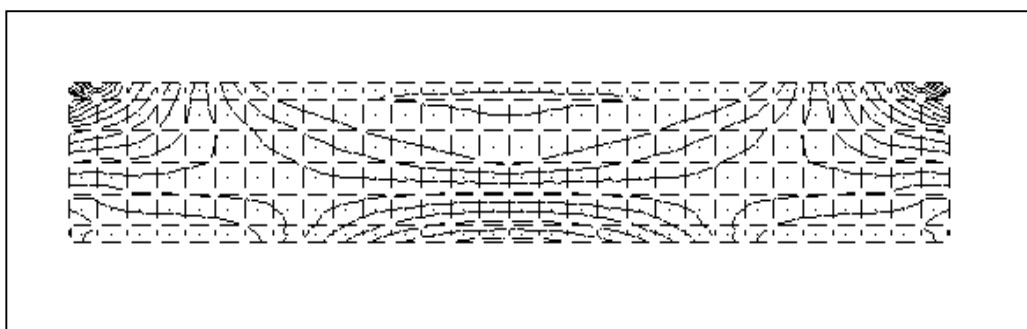
Σχήμα 3. Οπλισμός και συνδετήρες.

Στο ανωτέρω μοντέλο οι κόμβοι των γραμμικών στοιχείων συνδέονται κατευθείαν επί των κόμβων των επιπέδων πεπερασμένων στοιχείων. Ο ορισμός των οριακών συνθηκών έγινε με πάκτωση των 2 σειρών των πλευρικών κόμβων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



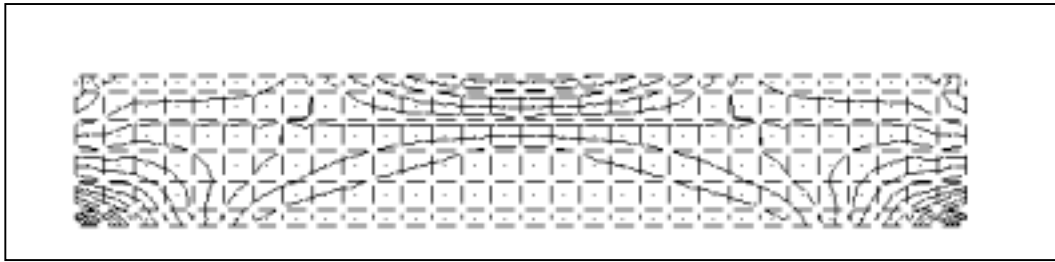
Σχήμα 4. Οριακές συνθήκες και φορτία.

Η επίλυση του φορέα έγινε για στατική φόρτιση με την εντολή του προγράμματος STIFFNESS ANALYSIS. Μετά την επίλυση το πρόγραμμα έχει δυνατότητα απεικόνισης των τιμών μετατοπίσεων, κυρίων τάσεων, κριτήριο von mises, εντατικής κατάστασης μελών κ.λ.π.. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα αναπαράστασης της έντασης, πάνω σε μία επιφάνεια η οποία ορίζεται από κόμβους στους οποίους συμβάλλουν προεπιλεγμένα μέλη. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η εντολή CUT.



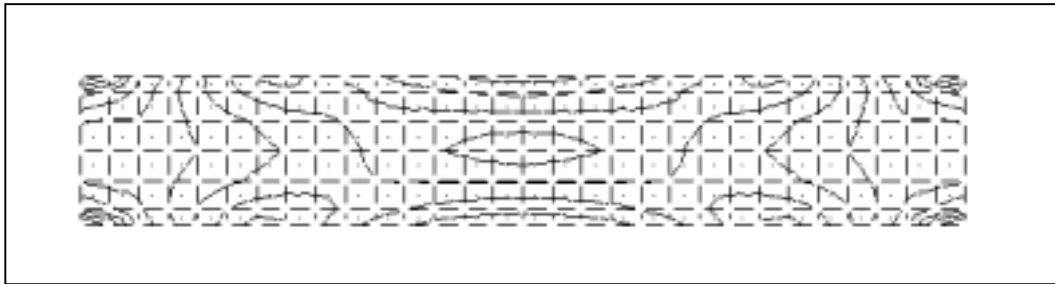
Σχήμα 5. Γραμμική απεικόνιση κύριας τάσης σ_1 .

Στην παρεία το πρόγραμμα εκτυπώνει μέγιστη κύρια τάση $\sigma_1 = 11088 \text{ KN/m}^2$



Σχήμα 6. Γραμμική απεικόνιση κύριας τάσης σ_2 .

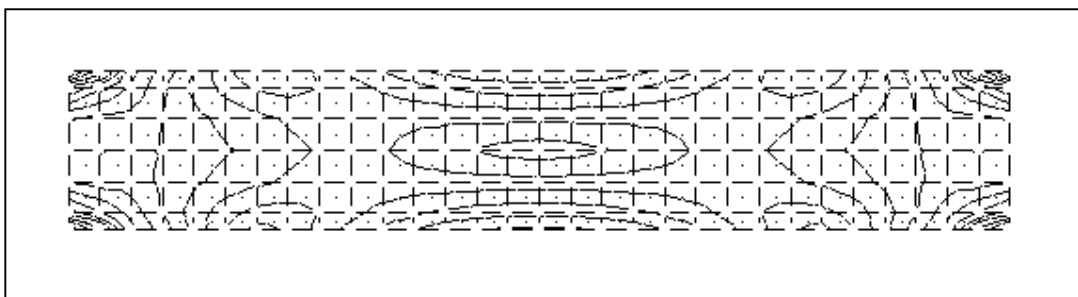
Στην παρειά εκτυπώνεται η μέγιστη $\sigma_2=10769 \text{ KN/m}^2$



Σχήμα 7. Γραμμική απεικόνιση τάσης TMAX.

Η TMAX είναι 5264 KN/m^2 ενώ στο μέσον 2089 KN/m^2 .

Το πρόγραμμα εκτυπώνει και τάσεις για το κριτήριο VON MISES.

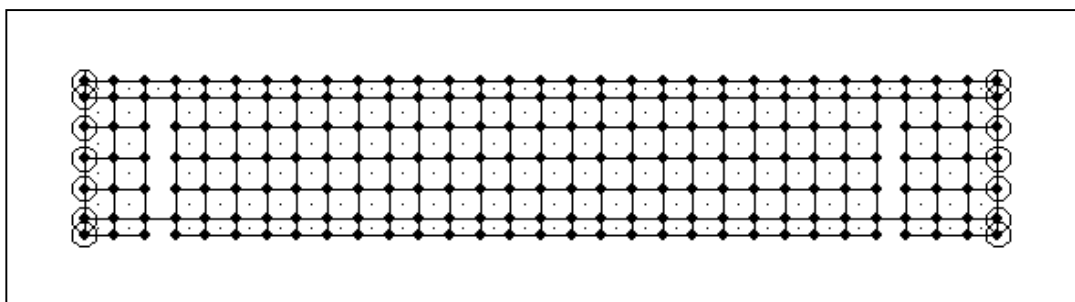


Σχήμα 8. Γραμμική απεικόνιση τάσεων για το κριτήριο von mises.

Η μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στην γωνία και είναι 6010 KN/m² ενώ στην μέση της παρειάς 2089 KN/m². Η μεγαλύτερη αξονική δύναμη στους συνδετήρες εμφανίζεται στο συνδετήρα που είναι σε απόσταση 20 cm από την παρειά και είναι 0.5 KN ενώ σε απόσταση 40 cm από την παρειά, που γίνεται ο έλεγχος Vrd3 είναι 0.3 KN.

Αλλάζοντας τα πεπερασμένα σε στοιχεία SBHQ, 5 βαθμών ελευθερίας, δεν παρατηρείται καμία ουσιαστική διαφορά στα αποτελέσματα

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ Ι Ι.



Σχήμα 9.Ο κάρναβος πεπερασμένων δευτέρου προσομοιώματος.

Στο δεύτερο προσομοίωμα καταργείται σειρά από πεπερασμένα στοιχεία ώστε να αναπαρασταθεί ρωγμή με στόχο την αύξηση της αξονικής των συνδετήρων. Η κατάργηση των πεπερασμένων συνοδεύεται από τροποποίηση των ιδιοτήτων του κάτω οπλισμού ώστε η βύθιση να παραμείνει σταθερή. Στην περίπτωση αυτή η αξονική των συνδετήρων, στην περιοχή διακοπής, γίνεται 7 KN ενώ στις άλλες θέσεις συνεχίζει να έχει ιδιαίτερα μικρές τιμές ανάλογα με το πρώτο προσομοίωμα, Η TMAX παίρνει τιμή 2144 KN/m² στο μέσο της παρειάς.

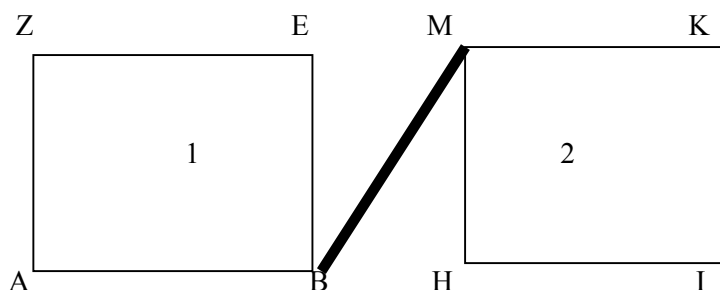
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΙΙΙ.

Στο τρίτο προσομοίωμα διατηρείται ο κάρναβος του πρώτου μοντέλου με την εξής διαφορά: Δημιουργείται μία δεύτερη σειρά κόμβων στα σημεία που συμβάλλουν οι συνδετήρες. Οι νέοι κόμβοι έχουν τις ίδιες συντεταγμένες με τους παλιούς.

Οι κόμβοι A,B,E,Z,I,K είναι κόμβοι που υπάρχουν και στα προηγούμενα προσομοιώματα. Το μέλος 1 συνδέει τους κόμβους A,B,E,Z, το μέλος 2 τους κόμβους B,I,K και ο συνδετήρας τους κόμβους B,E.

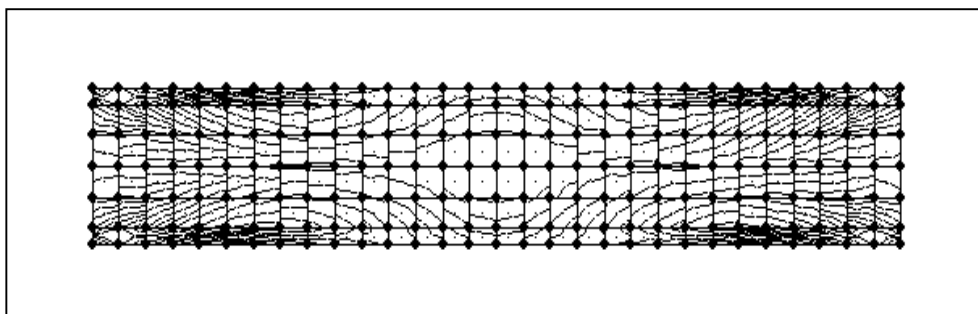
Στο μοντέλο αυτό δημιουργούνται 2 νέοι κόμβοι M και H. Οι συντεταγμένες τους είναι ίσες με τις συντεταγμένες του B και E αντιστοίχως. Δίνεται κινηματική εξάρτηση των κόμβων που συμπίπτουν οι συντεταγμένες, ώστε να έχουν κοινή παραμόρφωση κατά X δηλαδή ΔX κόμβου H = ΔX κόμβου B.

Το μέλος 1 συνδέει του κόμβους ΑΒΕΗ ενώ το μέλος 2 τους κόμβους ΗΙΚΜ. Το γραμμικό μέλος που προσομοιώνει τον συνδετήρα συνδέει τους κόμβους Β και Η.



Σχήμα 10. Νέοι κόμβοι και συνδεσμολογία τρίτου προσομοιώματος.

Ο φορέας επιλύεται όπως πριν και εκτυπώνονται οι τάσεις παραμορφώσεις όλων των πεπερασμένων και οι αξονικές δυνάμεις των γραμμικών μελών.

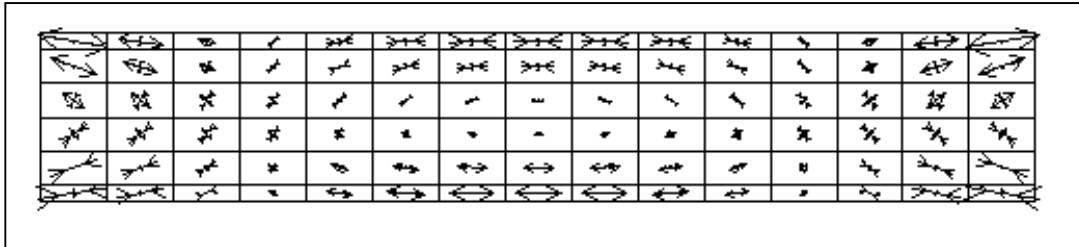


Σχήμα 11. Γραμμική απεικόνιση τάσεων για το κριτήριο von mises.

Η κατανομή των τάσεων για το κριτήριο von mises φαίνεται στο σχήμα 11. Στο μέσον της πλευράς η τάση είναι 1358 KN/m². Η αξονική των συνδετήρων γίνεται 11KN στους συνδετήρες σε απόσταση 20 cm έως 40 cm από την παρειά ενώ μετά τα 40 cm αρχίζει να μειώνεται..

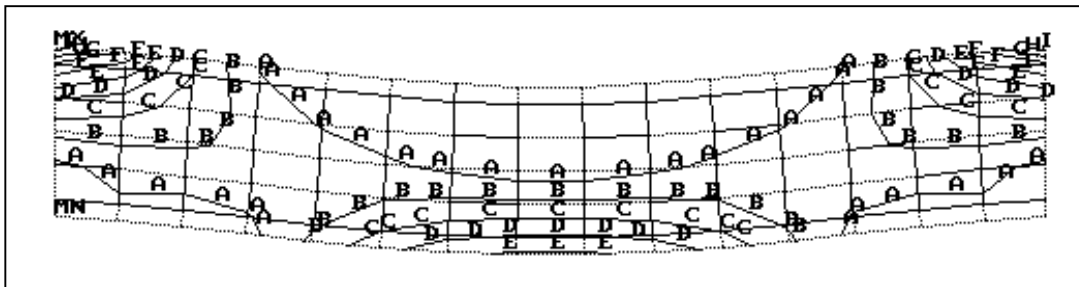
2. Το ANSYS της “SWANSON ANALYSIS SYSTEM INC. -Houston ”

Για τα επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Shell63 και με λειτουργία μεμβράνης. Τα μοντέλα είναι το ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση. Οι τάσεις sint του πρώτου προσομοιώματος φαίνονται στο σχήμα 12.

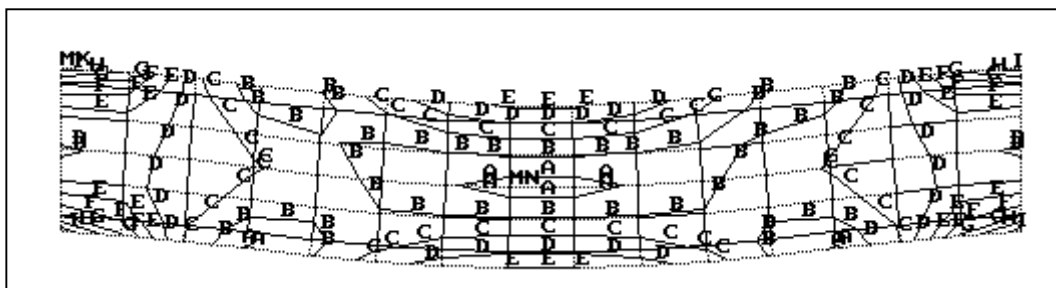


Σχήμα 12. Διανυσματική απεικόνιση τάσεων sint.

Για τα γραμμικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Beam44 χωρίς στερεούς κόμβους. Λύθηκαν και τα 3 προσομοιώματα και εκτυπώθηκαν τάσεις, παραμορφώσεις και εντατικά των γραμμικών στοιχείων. Το πρόγραμμα έχει πολλαπλές δυνατότητες αναπαράστασης των τάσεων. Στο σχήμα 12 και 13 φαίνεται γραμμική κατανομή τάσεων s1 και sint.



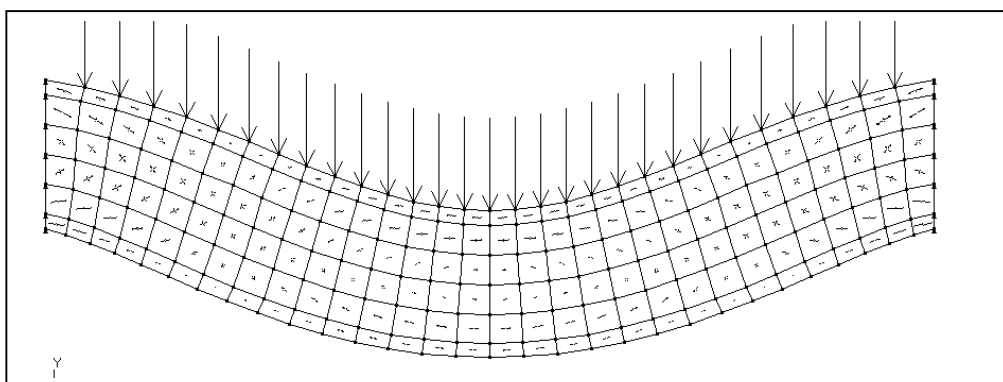
Σχήμα 12. Γραμμική απεικόνιση τάσεων s1.



Σχήμα 13. Γραμμική απεικόνιση τάσεων sint.

3. Το STRAD / FEA της «4M-VK ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΥΚΗΝΩΝ 9 ΧΑΛΑΝΔΡΙ ΑΘΗΝΑ»

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει γραμμικά στοιχεία και επίπεδα τετρακομβικά στοιχεία με λειτουργία μεμβράνης, 6 βαθμούς ελευθερίας στον κόμβο και παράγει παραμορφώσεις από στροφές σε άξονα κάθετα στο επίπεδό του. Έχει δυνατότητα σχεδιασμού με Ευρωκώδικα 8 και ΕΚΩΣ 2000. Ο έλεγχος με γραμμικά στοιχεία έδωσε τα υπολογισμένα αποτελέσματα. Κατασκευάστηκαν τα 3 προσομοιώματα και λύθηκαν σε στατική φόρτιση. Εκτυπώθηκαν οι μετατοπίσεις, τάσεις πεπερασμένων και αξονικές δυνάμεις των γραμμικών στοιχείων. Το πρόγραμμα έχει δυνατότητα χρωματικής και διανυσματικής απεικόνισης τάσεων. Η διανυσματική απεικόνιση της s_1 φαίνεται στο σχήμα 14.



Σχήμα 14. Διανυσματική απεικόνιση των τάσεων s_1 .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Τα τρία προγράμματα μεταξύ τους έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα. Μικρές αριθμητικές διαφορές οφείλονται στα διαφορετικά επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα τρία προσομοιώματα συμπεριφέρονται με τελείως διαφορετικό τρόπο. Το πρώτο προσομοίωμα όπως φαίνεται δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό δοκού σε τέμνουσα αφού τόσο οι τάσεις στα πεπερασμένα, όσο και οι δυνάμεις στα γραμμικά στοιχεία των συνδετήρων απέχουν πολύ από τις επιθυμητές τιμές. Το δεύτερο προσομοίωμα μπορεί να δίνει λογική τιμή και μάλιστα μόνο σε μία θέση για τους συνδετήρες, τροποποιείται όμως σημαντικά η λειτουργία της δοκού. Το τρίτο προσομοίωμα, στα πλαίσια ελαστικής ανάλυσης, φαίνεται να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η τάση στο μέσον της πλευράς είναι 1358 KN/m^2 με τιμή ελέγχου 1550 KN/m^2 . Η δύναμη στον συνδετήρα είναι 11 KN που αντιστοιχεί σε μία τάση 25 KN/cm^2 .

Σε επόμενες εργασίες θα εξετασθούν τα προσομοιώματα σε μη γραμμική ανάλυση συμπληρώνοντας τα προσομοιώματα με συνθήκες τριβής μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος Φ.Ε.Κ. 1329 Β' / 6-11-2000

4Μ-ΥΚ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Ε.Π.Ε. Εγχειρίδιο Χρήσης STRAD.

Computer Aided Structural Engineering Center School of Civil and Environmental Engineering
2002. GT.STRU DL User Reference Manual.

SWANSON ANALYSIS SYSTEM INC. 1992. Getting started with the ANSYS program.

VADALOUKAS G. N. 1996 DESIGN TABLES FOR REINFORCED CONCRETE
STRUCTURES. FOUNTAS PUBLISHING CORPORATION