

Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 7 παρουσιάζεται η προσομοίωση επίπεδου τοιχώματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: μόρφωση και ιδιότητες επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, διακριτοποίηση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, προσομοίωση τοιχώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, υπολογισμός εντατικών μεγεθών σε επιφανειακά στοιχεία.

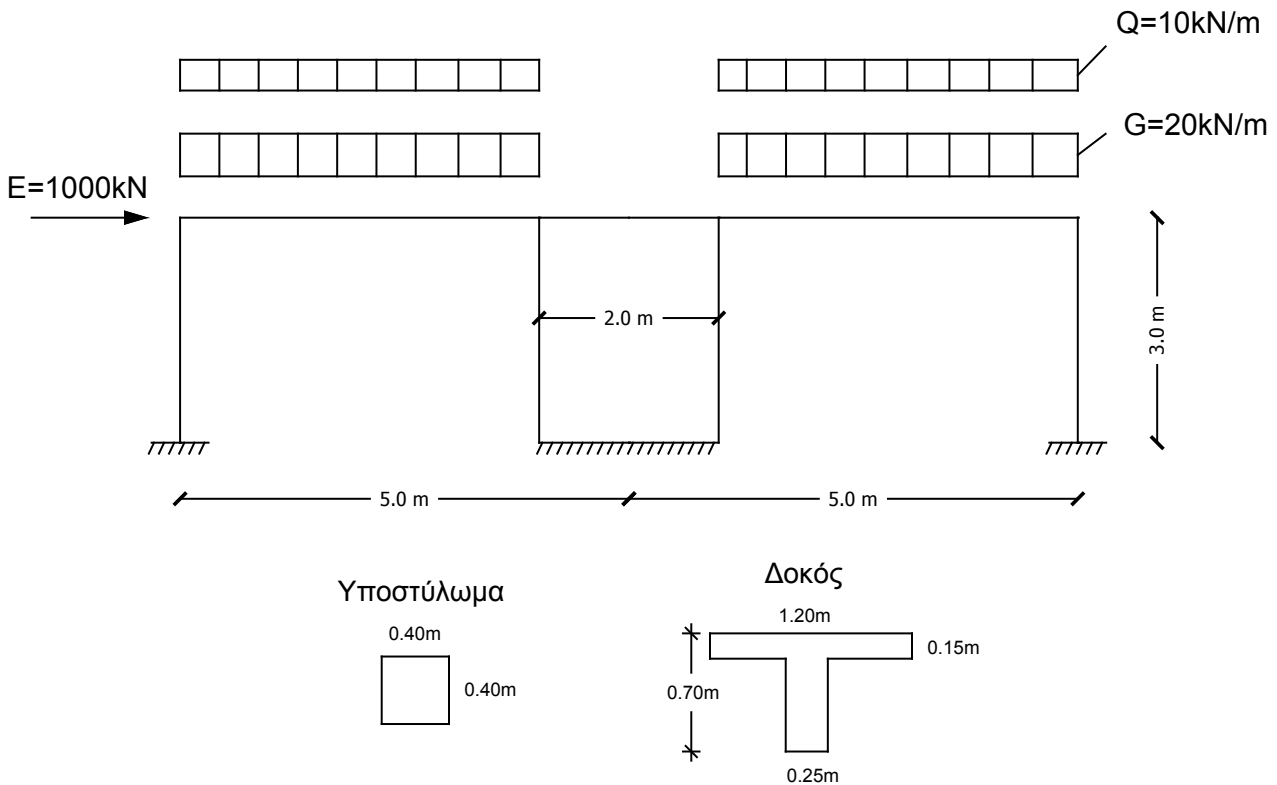
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις συμπεριφοράς τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος και ικανότητα ανάγνωσης και κατανόησης σχετικών επιστημονικών κειμένων, πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος, όπως και εφαρμογή του παραδείγματος του Κεφαλαίου 6.

7.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση του επίπεδου πλαισίου που περιγράφεται στο Σχήμα 7.1, με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων για το τοίχωμα διαστάσεων 25/200. Η επίλυση να γίνει για τον συνδυασμό αστοχίας κατακόρυφων φορτίων και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Η οριζόντια δύναμη E θεωρείται σεισμικό φορτίο, το κατανεμημένο φορτίο G μόνιμη δράση και το Q μεταβλητή δράση.
- Να ληφθεί υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7$ kPa, λόγο Poisson=0.0, αβαρές και με μηδενική πυκνότητα.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα να ληφθούν σε στάδιο II (ρηγματωμένες διατομές).
- Στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 7.1 Επίπεδος φορέας οπλισμένου σκυροδέματος με τοίχωμα.

7.2. Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα

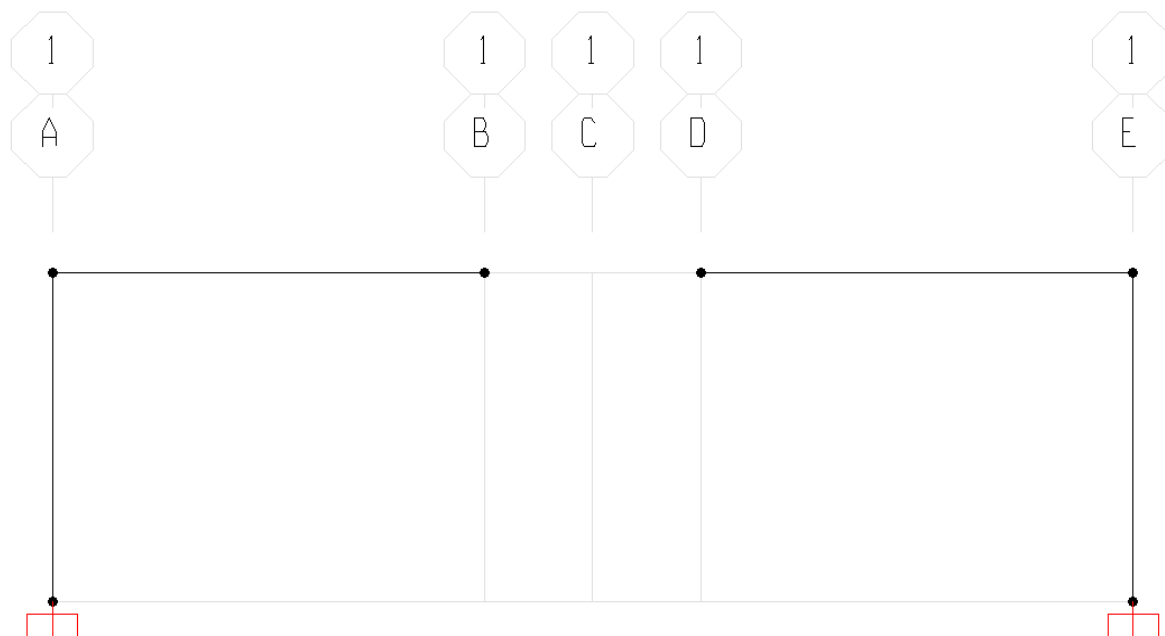
Το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι πανομοιότυπο με αυτό του Κεφαλαίου 6, με τη διαφορά της προσομοίωσης του τοιχώματος που ζητείται να γίνει με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται συνεπώς άνοιγμα του αρχείου [Chapter 06.sdb](#) και αποθήκευση με την ονομασία [Chapter 07.sdb](#).

7.2.1. Εισαγωγή επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων τοιχώματος

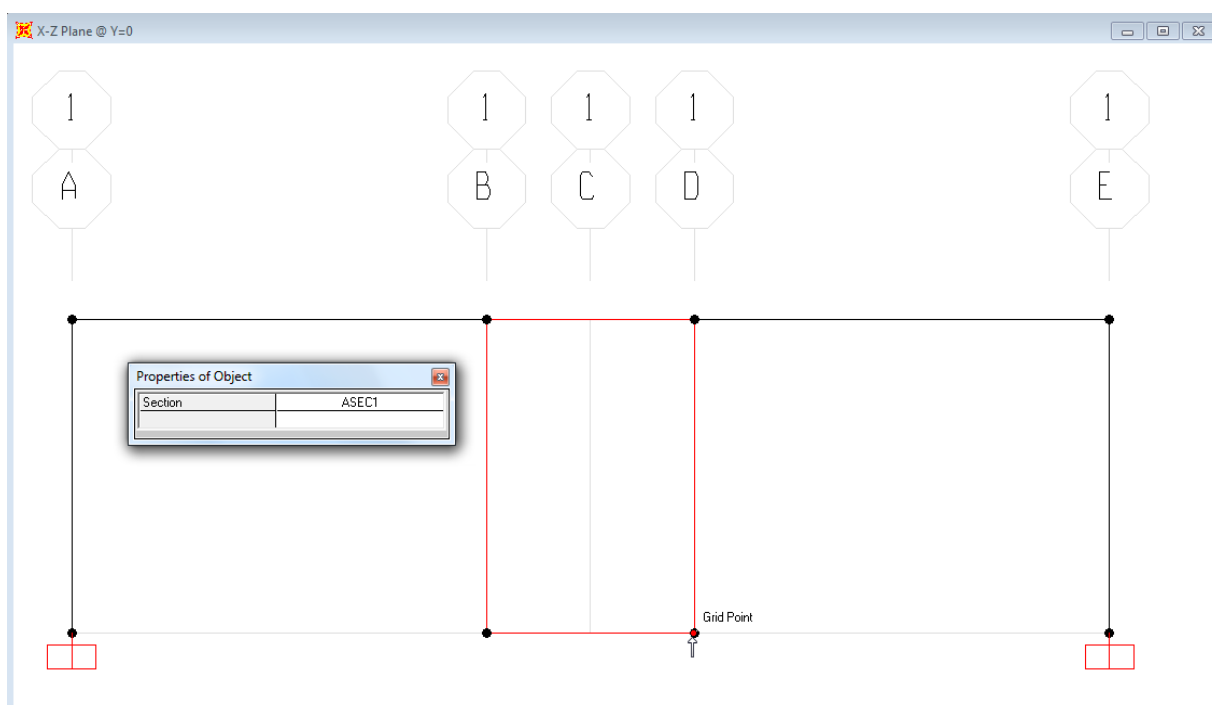
Καθώς το τοίχωμα θα προσομοιωθεί με επιφανειακά στοιχεία, διαγράφεται τόσο το μεσαίο γραμμικό στοιχείο, που χρησίμευσε για την προσομοίωση του τοιχώματος στο προηγούμενο παράδειγμα (ισοδύναμος στύλος), όσο και τα δυο τμήματα στερεού βραχίονα. Η διαγραφή μπορεί να γίνει με επιλογή των στοιχείων και [delete](#) από το πληκτρολόγιο.

Για τη διευκόλυνση της σχεδίασης του επιφανειακού στοιχείου, απαιτείται ο ορισμός δυο νέων βοηθητικών γραμμών καννάβου ([Define](#) → [Coordinate Systems/Grids](#)), στις θέσεις $X=4m$ και $X=6m$ που ορίζουν τα σημεία στα άκρα του τοιχώματος. Ο επανακαθορισμός της ονομασίας της κάθε βοηθητικής γραμμής (A, B, C κτλ) είναι προαιρετικός. Η εικόνα του φορέα με τον τροποποιημένο κάνναβο φαίνεται στο Σχήμα 7.2.

Η σχεδίαση του επιφανειακού στοιχείου γίνεται στο παράθυρο της όψης xz , από την εντολή [Draw](#) → [Draw Rectangular Area](#), κάνοντας [click](#) διαδοχικά στην πάνω αριστερά και την κάτω δεξιά γωνία που ορίζεται από τις βοηθητικές γραμμές καννάβου (Σχήμα 7.3). Μετά τη σχεδίαση, με χρήση του πλήκτρου [Escape](#), γίνεται απενεργοποίηση του εργαλείου σχεδίασης.

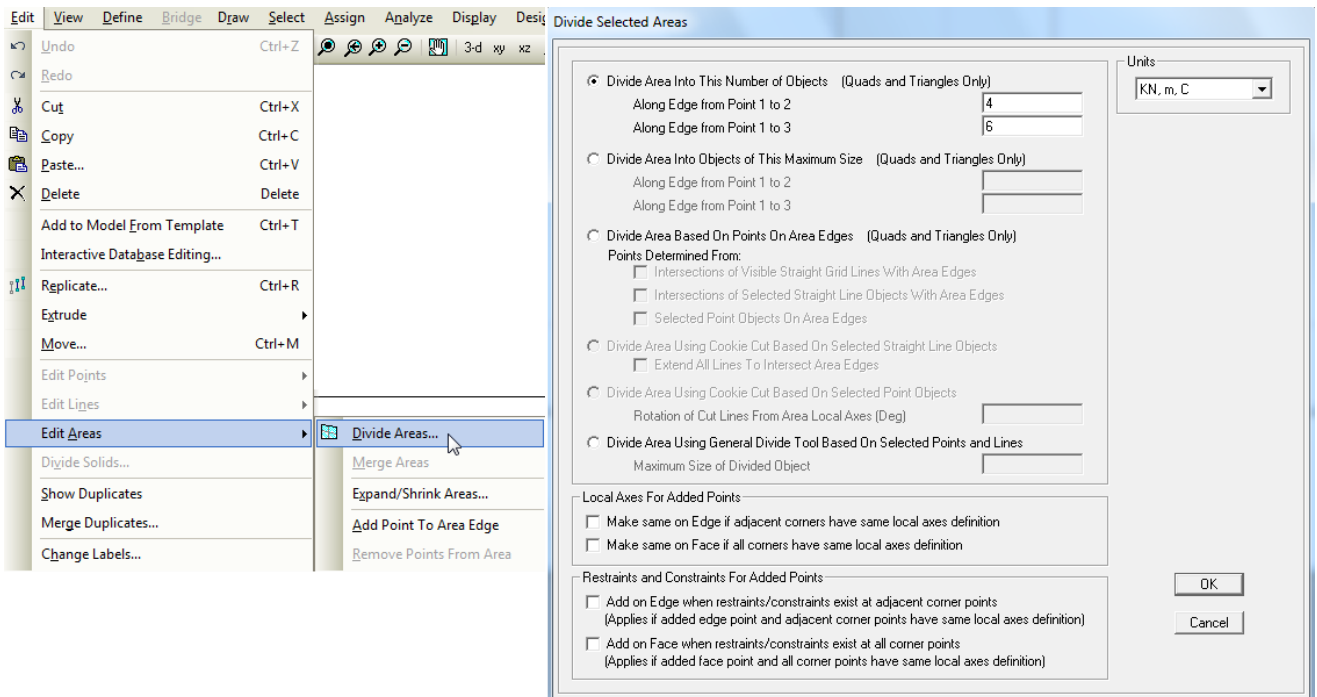


Σχήμα 7.2 Εικόνα φορέα μετά τη διαγραφή των γραμμικών στοιχείων τοιχώματος και τον επανακαθορισμό των βοηθητικών γραμμών καννάβου.

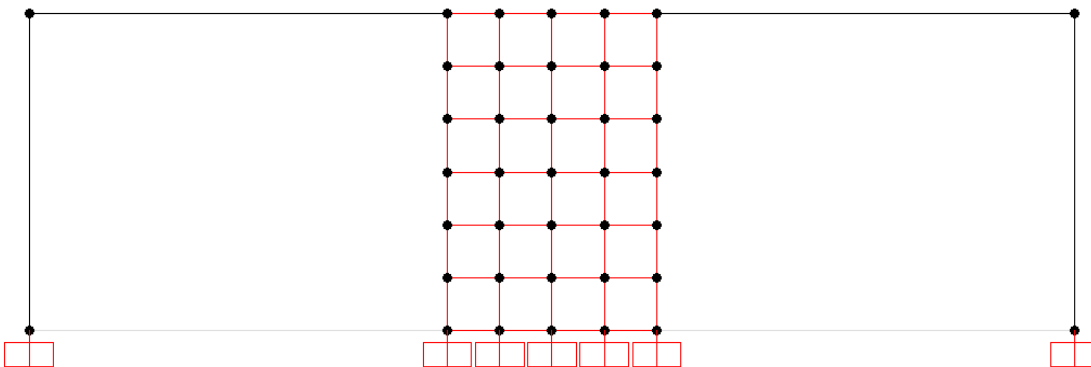


Σχήμα 7.3 Σχεδίαση επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου με τη βοήθεια των γραμμών καννάβου.

Για την ορθότερη απόδοση της συμπεριφοράς του τοιχώματος (Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013· Ξενίδης, Αβραμίδης, & Τριαματάκη, 1998), γίνεται επιλογή του επιφανειακού στοιχείου και διακριτοποίηση του σε μικρότερα με την εντολή *Edit* → *Edit Areas* → *Divide Areas*, όπου και ορίζεται η διάσπαση σε 4 στοιχεία στην οριζόντια διεύθυνση και 6 στην κατακόρυφη (Σχήμα 7.4). Η υλοποίηση της πάκτωσης γίνεται με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας των κόμβων των επιφανειακών στοιχείων στη βάση του τοιχώματος. Η εικόνα που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Καθώς πλέον στο επίπεδο του ορόφου έχουν δημιουργηθεί νέοι κόμβοι, λαμβάνεται μέριμνα να ενσωματωθούν στο υφιστάμενο διάφραγμα [DIAPH1_3](#).



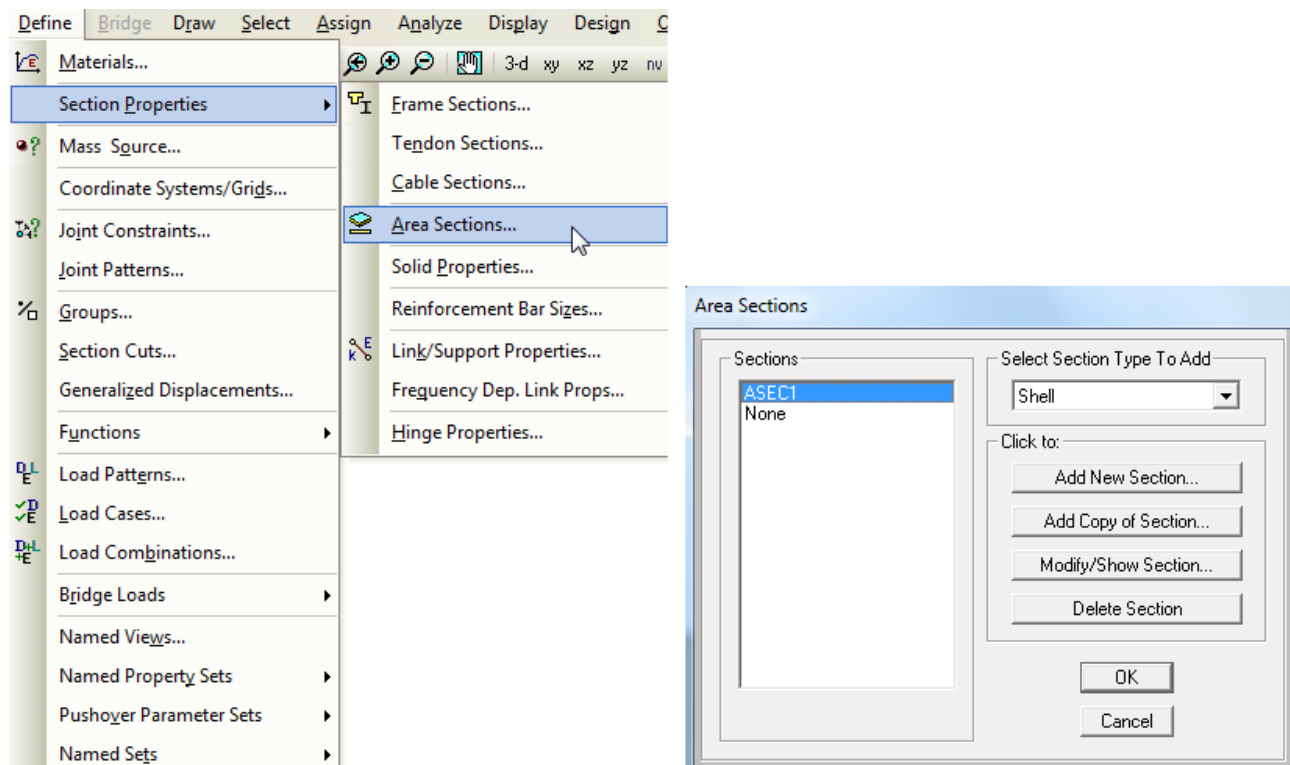
Σχήμα 7.4 Διακριτοποίηση επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου σε 4 στοιχεία στην οριζόντια και 6 στην κατακόρυφη διεύθυνση.



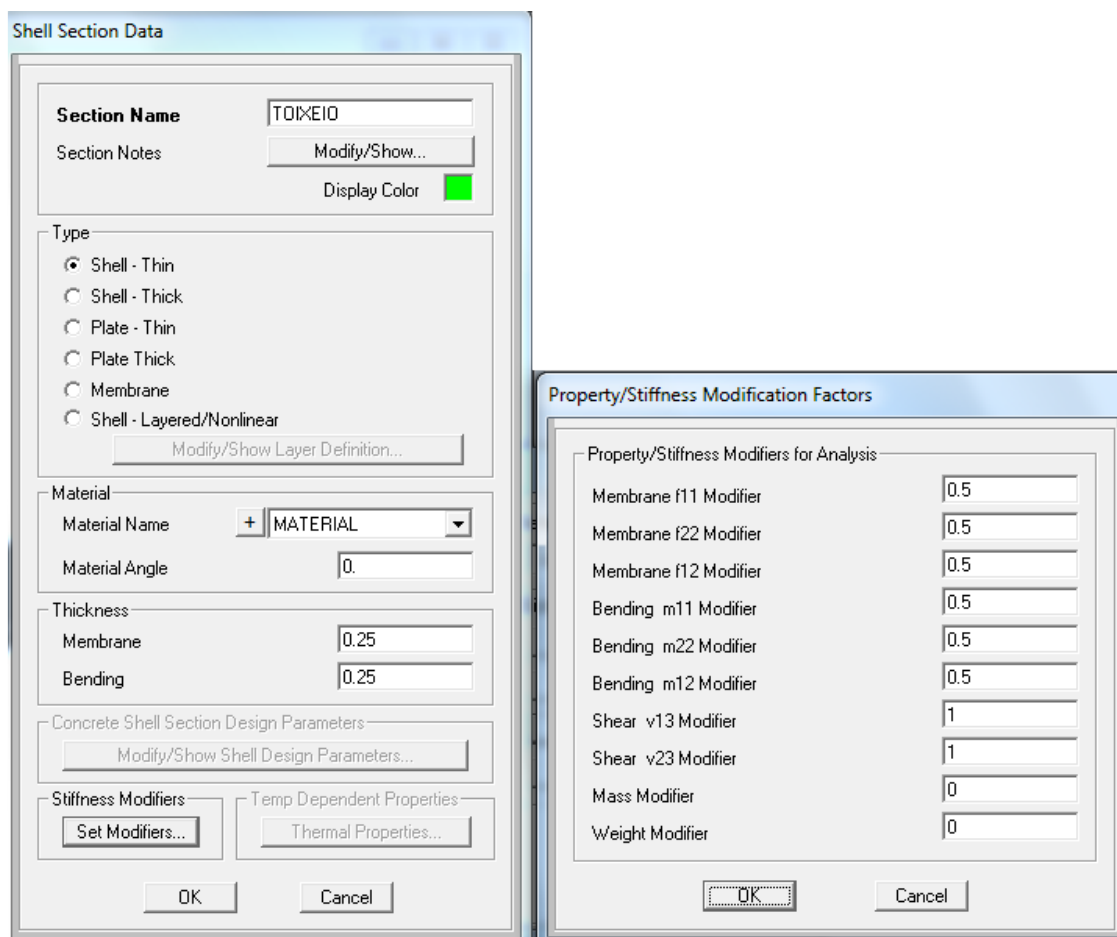
Σχήμα 7.5 Εικόνα φορέα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και πάκτωση στη βάση του τοιχώματος.

7.2.2. Ορισμός ιδιοτήτων διατομής επιφανειακών στοιχείων τοιχώματος

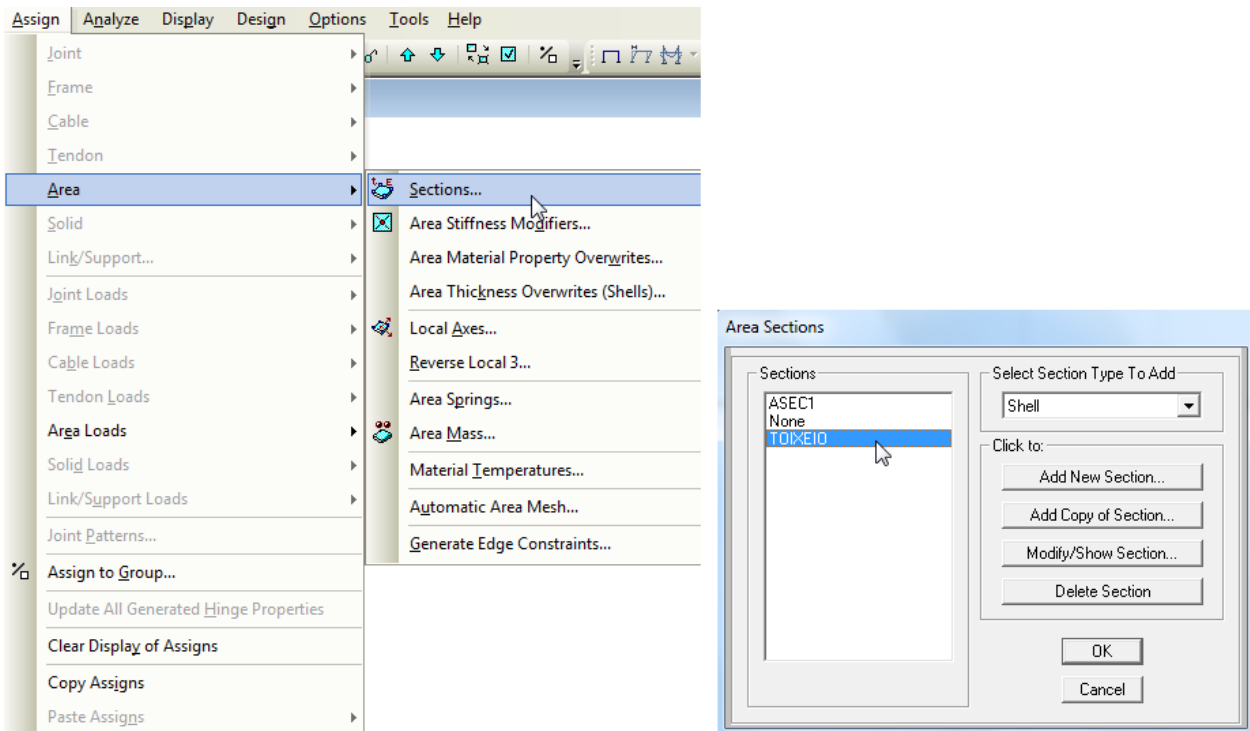
Η διατομή των επιφανειακών στοιχείων του τοιχώματος γίνεται από την εντολή *Define* → *Section Properties* → *Area Sections*. Εκεί μπορεί να προστεθεί μια νέα διατομή τύπου *Shell* (κελύφους) με το *Add New Section*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6 (Computers and Structures Inc., 2010). Το πάχος του τοιχώματος τίθεται στο *Thickness* (και στα δυο πεδία *Membrane* και *Bending*) του Σχήματος 7.7, ενώ το υλικό στο πεδίο *Material*. Η απομείωση της δυσκαμψίας του τοιχώματος ορίζεται στους σχετικούς συντελεστές τροποποίησης (*Modifiers*) στα πεδία *f11* και *f22* (συνήθως αρκεί το δεύτερο για τα κατακόρυφα τοιχώματα, με ελάχιστη διαφορά στα αποτελέσματα αν μεταβληθούν και οι δύο συντελεστές), ενώ η απομείωση της δυσστημίας στο πεδίο *f12* (CSI, n.d.). Παράλληλα, αντίστοιχοι συντελεστές πρέπει να τεθούν και στα πεδία *m11*, *m22* και *m12*, για την απομείωση της εκτός επιπέδου δυσκαμψίας του τοιχώματος. Αναλυτικές πληροφορίες για τις υπόλοιπες επιλογές του τύπου των επιφανειακών στοιχείων (*shell thin*, *shell thick*, *plate* κτλ) μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος, ώστε ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται να γίνεται κάθε φορά η κατάλληλη επιλογή στοιχείου. Μετά την ολοκλήρωση του ορισμού της διατομής των επιφανειακών στοιχείων, επιλέγονται τα πεπερασμένα στοιχεία από την επιφάνεια σχεδίασης του προγράμματος και γίνεται ανάθεση στη νέα διατομή με την εντολή *Assign* → *Area* → *Sections* (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.6 Εισαγωγή νέας διατομής επιφανειακών στοιχείων.



Σχήμα 7.7 Ιδιότητες διατομής επιφανειακών στοιχείων τοιχώματος.

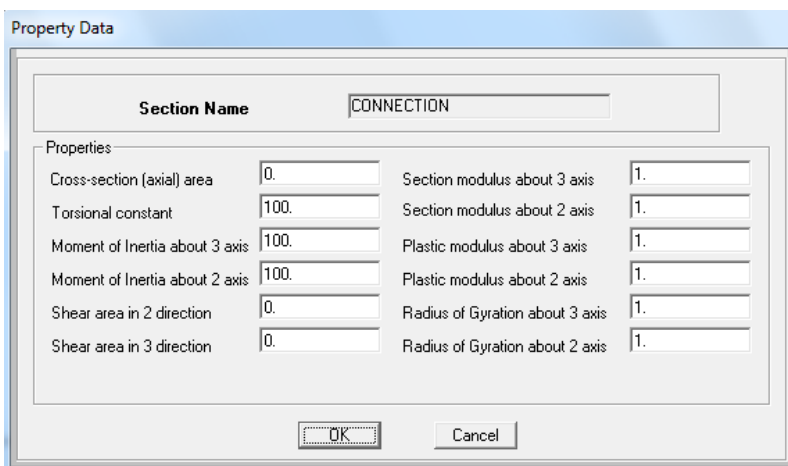


Σχήμα 7.8 Ανάθεση διατομής στα επιφανειακά στοιχεία του τοιχώματος.

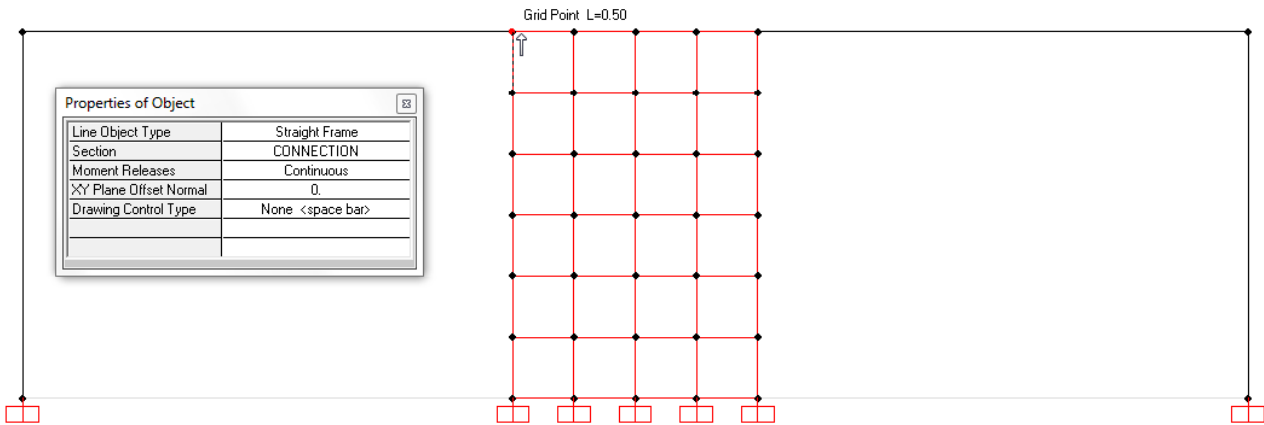
7.2.3. Εισαγωγή βοηθητικών στοιχείων σύνδεσης δοκού-τοιχώματος

Για την αποτελεσματικότερη προσομοίωση της μονολιθικής σύνδεσης του τοιχώματος με τη δοκό, κρίνεται σκόπιμο να δημιουργηθεί μια νέα διατομή γραμμικού στοιχείου (*CONNECTION*) τύπου *General*, με μεγάλη τιμή δυσκαμψίας και δυστρεψιάς και μηδενικές τιμές δυστένειας και δυσμησίας (Σχήμα 7.9). Ακριβέστερο προσομοίωμα, με χρήση δυο τύπων βοηθητικών δοκών με κατάλληλες ιδιότητες και διαφορετική τοποθέτηση στα σημεία σύνδεσης τοιχωμάτων με δοκούς, μπορεί να βρεθεί στους Ξενίδη και συνεργάτες (1998).

Τα γραμμικά στοιχεία σύνδεσης που αφορά η παραπάνω διατομή σχεδιάζονται κατακόρυφα (από κάτω προς τα πάνω), καλύπτοντας το ύψος ενός μόνο επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου (από κόμβο σε κόμβο). Η σχεδίαση γίνεται με την εντολή *Draw* → *Draw Frame/Cable/Tendon* (Σχήμα 7.10). Στα βοηθητικά γραμμικά στοιχεία που σχεδιάστηκαν, ανατίθεται η διατομή *CONNECTION* που δημιουργήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 7.9 Ιδιότητες βοηθητικού στοιχείου σύνδεσης της δοκού με τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τοιχώματος.



Σχήμα 7.10 Σχεδίαση βοηθητικού στοιχείου σύνδεσης της δοκού με τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τοιχώματος.

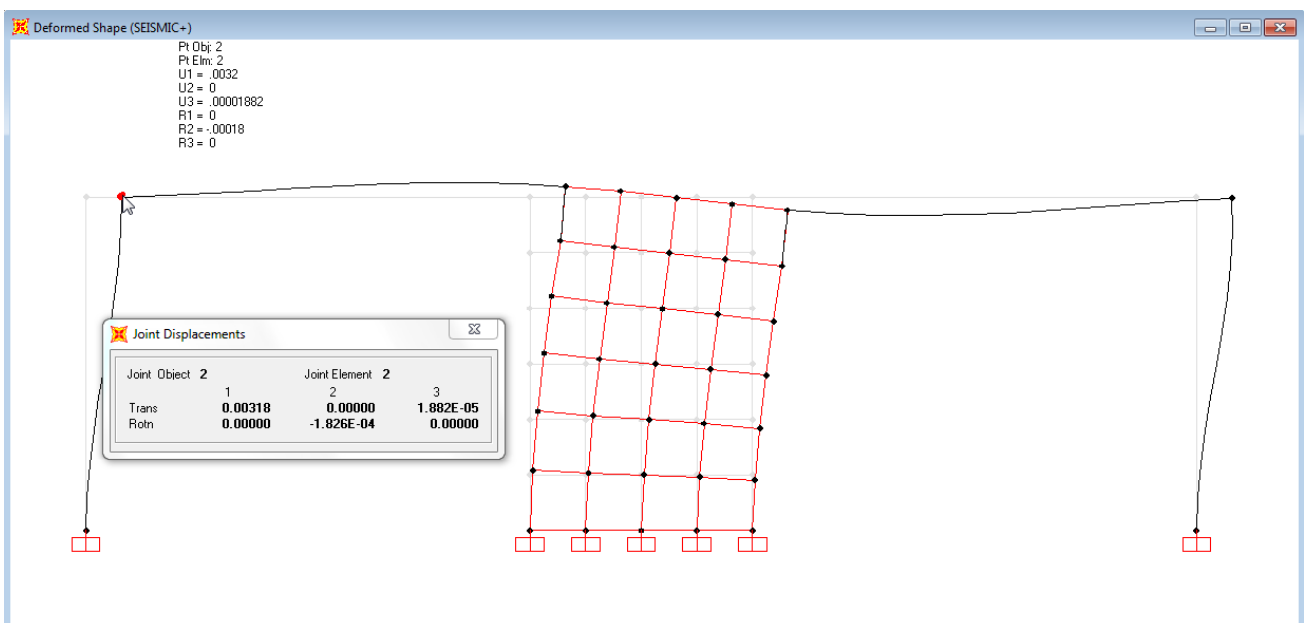
7.3. Ανάλυση φορέα

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*.

7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοιχώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

7.4.1. Παραμορφωμένη γραμμή φορέα και μετακινήσεις κόμβων

Από την εντολή *Display* → *Show Deformed Shape*, επιλέγεται η εμφάνιση της παραμορφωμένης γραμμής του φορέα για το συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+* (φορτία $G+0.3Q+E$), όπου και καταγράφονται οι μετατοπίσεις του αριστερά κόμβου (Σχήμα 7.11). Είναι εμφανής στη μορφή της παραμορφωμένης κατάστασης του φορέα, αλλά και με τη λειτουργία *Start Animation*, η σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία στο τμήμα του στερεού βραχίονα.

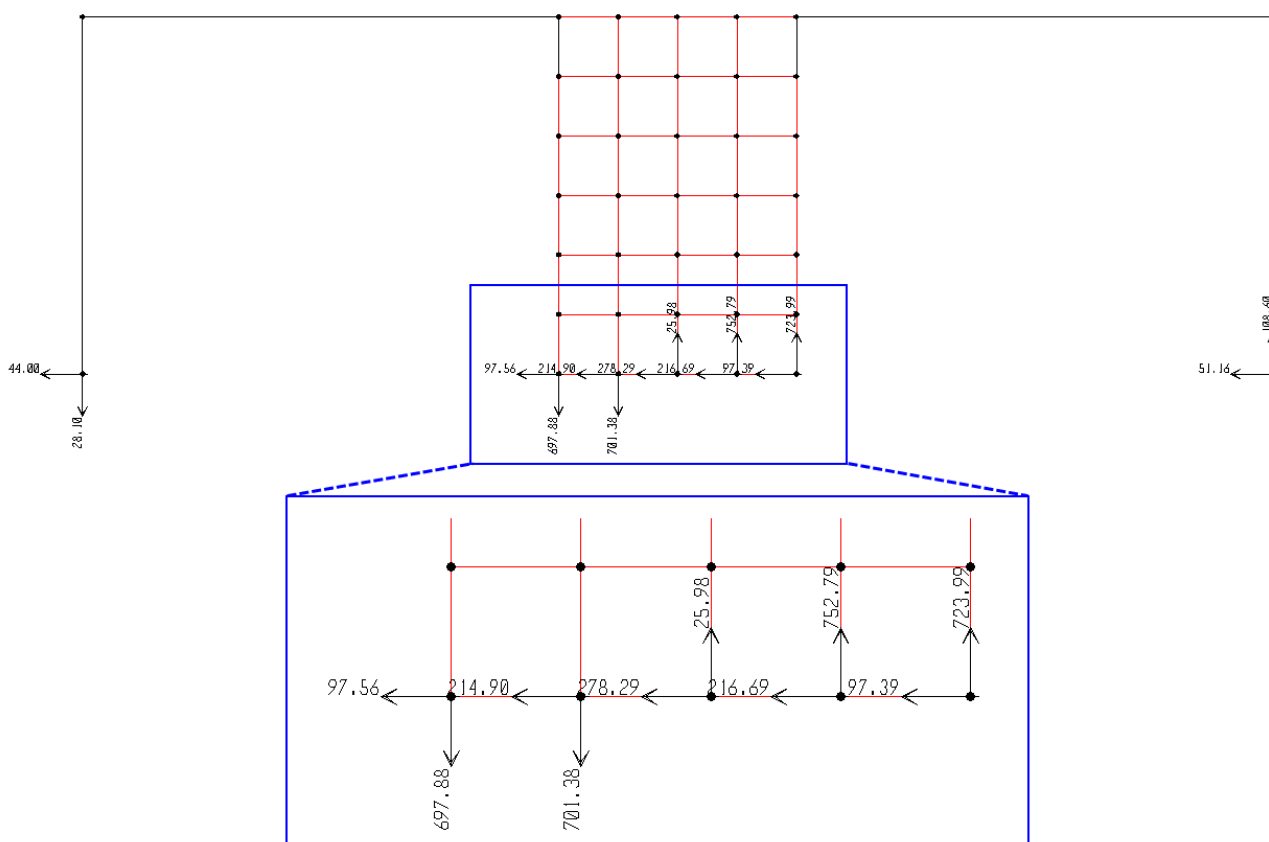


Σχήμα 7.11 Παραμορφωμένη γραμμή φορέα για συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+* ($G+0.3Q+E$).

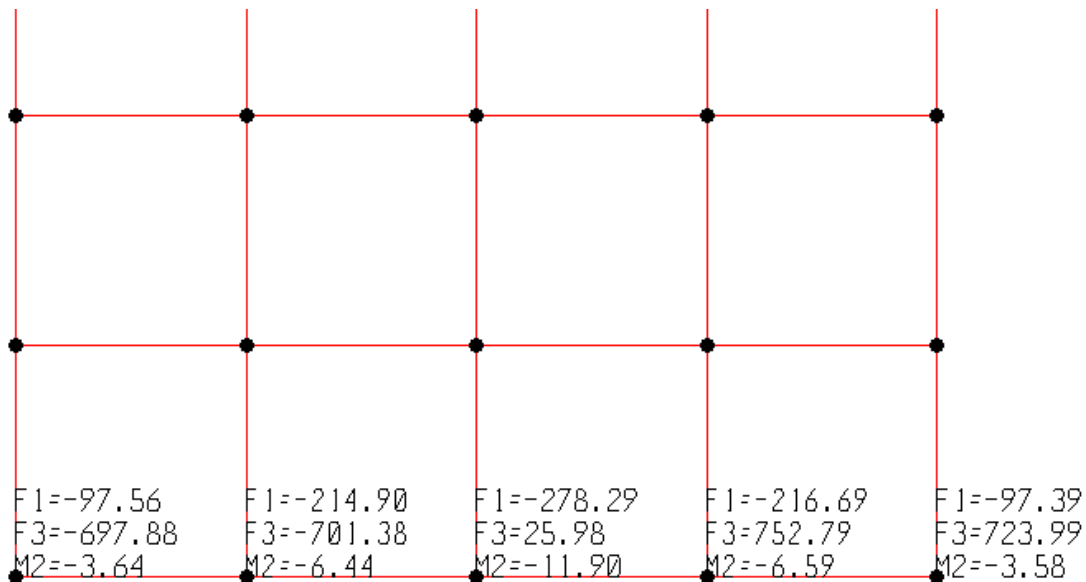
Πολυμεσικό Αντικείμενο 7.1	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει παραστατικά την εικόνα της παραμόρφωσης του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό δράσης SEISMIC +. Σημειώνεται πως η πλήρης κίνηση που εμφανίζεται δεν είναι ακριβής, καθώς στον συγκεκριμένο συνδυασμό δρουν στην πραγματικότητα φορτία προς τη μια μόνο κατεύθυνση, γίνεται όμως εύκολα αντιληπτή η αποτελεσματική σύνδεση των δοκών στο τοίχωμα μέσω βοηθητικών γραμμικών στοιχείων.</p>	

7.4.2. Αντιδράσεις στις στηρίξεις

Για την εμφάνιση των αντιδράσεων στήριξης του φορέα (*Display* → *Show Forces/Stresses* → *Joints*), επιλέγεται η **2d** όψη του και ζητείται διαδοχικά η εμφάνιση με και χωρίς την επιλογή *Show Results as Arrows* για το συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+** (φορτία **G+0.3Q+E**). Τα αποτελέσματα για τις δυο εναλλακτικές μορφές απεικόνισης, εστιάζοντας στη βάση του τοιχώματος, φαίνονται στα Σχήματα 7.12 και 7.13. Σημειώνεται πως αρνητική τιμή της **M2** στη στήριξη σημαίνει αριστερόστροφη φορά της ροπής κάμψης.



Σχήμα 7.12 Αντιδράσεις στις στηρίξεις με παράθεση τιμών σε 2d απεικόνιση (ενεργό *Show Results as Arrows*) για συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+** (φορτία **G+0.3Q+E**).



Σχήμα 7.13 Αντιδράσεις στις στηρίξεις με παράθεση τιμών σε 2d απεικόνιση (ανενεργό Show Results as Arrows) για συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+ (φορτία G+0.3Q+E).

Για την εξαγωγή της ροπής που παραλαμβάνεται στη βάση του τοιχώματος, θα πρέπει να γίνει ολοκλήρωση των τάσεων που αναπτύσσονται στα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Μια εναλλακτική προσέγγιση υπολογισμού μπορεί να γίνει με τις αντιδράσεις στις στηρίξεις του τοιχώματος, ολοκληρώνοντας ως προς το κέντρο του, σύμφωνα με τη σχέση (λαμβάνεται δεξιόστροφη φορά θετική, βάση του προσανατολισμού του άξονα Y):

$$M_{\text{τοιχ}} = (-697.88) \cdot 1.0 + (-701.38) \cdot 0.5 - 752.79 \cdot 0.5 - 723.99 \cdot 1.0 - 3.64 - 6.44 - 11.90 - 6.59 - 3.58 = -2181.11 \text{ kNm} \quad (7.1)$$

Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η τιμή της τέμνουσας που παραλαμβάνει το τοίχωμα:

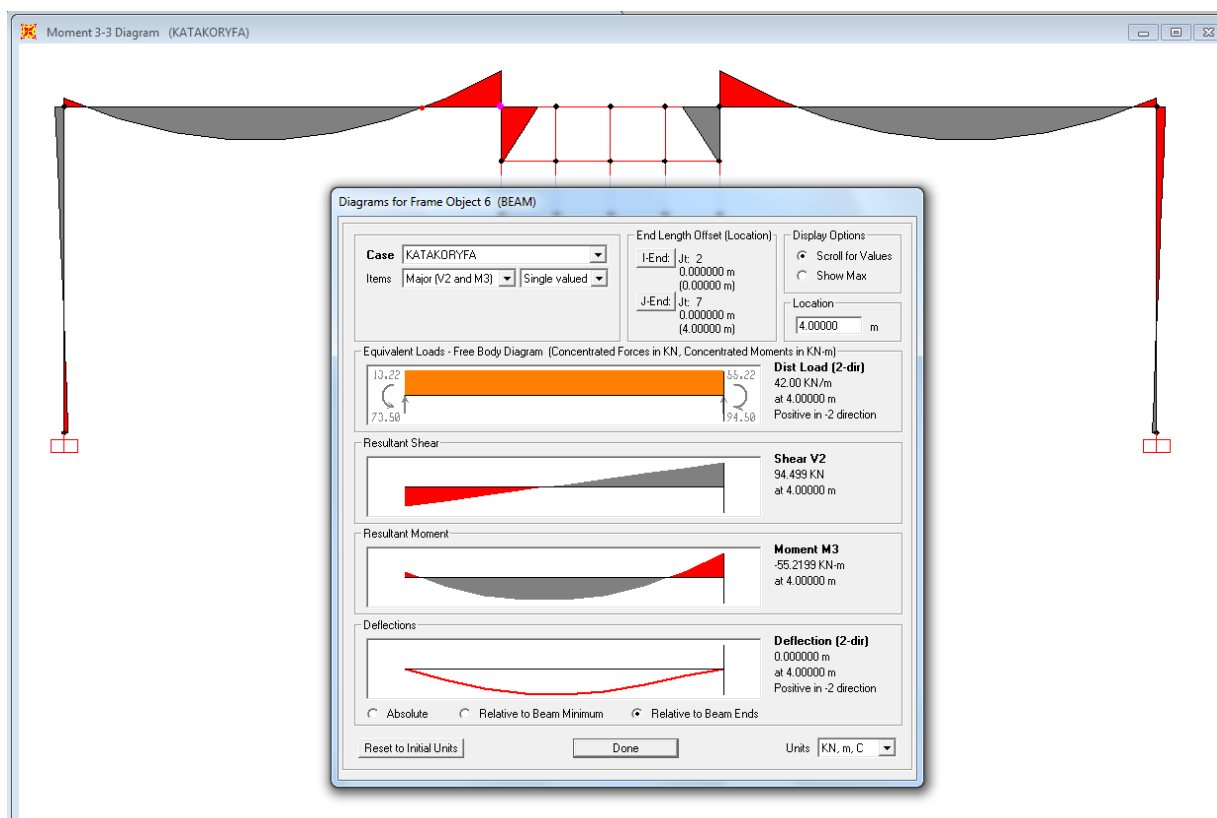
$$V_{\text{τοιχ}} = -97.56 - 214.90 - 278.29 - 216.69 - 97.39 = -904.83 \text{ kN} \quad (7.2)$$

7.4.3. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εμφανίζονται από την εντολή *Display → Show Forces/stresses → Frames/Cables*. Επιλέγεται η εμφάνιση του διαγράμματος καμπτικών ροπών *Moment 3-3* για τον συνδυασμό φόρτισης *KATAKORYFA (1.35G+1.50Q)*, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.14. Το τμήμα του διαγράμματος ροπών που εμφανίζεται πάνω στο βοηθητικό κατακόρυφο στοιχείο σύνδεσης δεν έχει κάποια φυσική σημασία και αγνοείται. Στη λεπτομέρεια εμφανίζεται η ροπή στο άκρο της αριστερά δοκού, στο σημείο σύνδεσης με το στερεό βραχίονα.

7.4.4. Πινακοποιημένα αποτελέσματα και αξιολόγηση

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του τοιχώματος με επιφανειακά στοιχεία, συγκρινόμενα με αυτά του προηγούμενου Κεφαλαίου όπου το ίδιο τοίχωμα είχε προσομοιωθεί με γραμμικά στοιχεία. Παρατηρείται πως τα δυο προσομοιώματα είναι πρακτικά ισοδύναμα, εμφανίζοντας πολύ μικρές διαφορές στα επιλεγμένα εντατικά μεγέθη. Η μοναδική περίπτωση όπου εμφανίζεται μια μεγαλύτερη διαφορά, της τάξης του 28%, αφορά τη ροπή για κατακόρυφο συνδυασμό φορτίων στο άκρο της δοκού στη σύνδεση με το τοίχωμα, η οποία σχολιάστηκε σχετικά στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Η εναλλακτική προσομοίωση της διατομής του βραχίονα που επιχειρήθηκε στο Κεφάλαιο 6, με την ονομασία Στερεός βραχίονας Β (Πίνακας 6.1), διαπιστώνεται πως δίνει αποτελέσματα στο άκρο της δοκού που βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία με την προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία.



Σχήμα 7.14 Διάγραμμα ροπών για συνδυασμό φόρτισης KATAKORYFA (1.35G+1.50Q).

Μέγεθος	Μετακίνηση κόμβου (G+0.3Q+E)	Ροπή βάσης τοιχώματος (G+0.3Q+E)	Τέμνουσα βάσης τοιχώματος (G+0.3Q+E)	Ροπή άκρου δοκού (G+0.3Q+E)	Ροπή άκρου δοκού (1.35G+1.5Q)
Γραμμικά στοιχεία	0.00333m	-2145.05kNm	-901.16kN	-249.99kNm	-77.04kNm
Επιφανειακά στοιχεία	0.00318m	-2181.11kNm	-904.83kN	-228.60kNm	-55.22kNm
Απόκλιση	4.50%	1.68%	0.41%	8.56%	28.32%

Πίνακας 7.1 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης για προσομοίωση του τοιχώματος με γραμμικά και με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 7^{ου} Κεφαλαίου

Computers and Structures, Inc. (2010). *CSI analysis reference manual for SAP2000, ETABS and SAFE*. Berkeley, California, USA.

Computers and Structures, Inc. (n.d.). *Modeling cracked section properties for shear wall and slab*. CSI Knowledge Base. Retrieved from <https://wiki.csiamerica.com/display/etabs/Modeling+cracked+section+properties+for+shear+wall+and+slab>

Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.

Ξενίδης, Χ., Αβραμίδης, Ι., & Τριαματάκη, Μ. (1998). Συγκριτική αξιολόγηση απλοποιημένων προσομοιωμάτων για πυρήνες κτιρίων Ο/Σ υπό στατική και δυναμική φόρτιση. *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του ΤΕΕ, 1,18(3)*, 9-25.