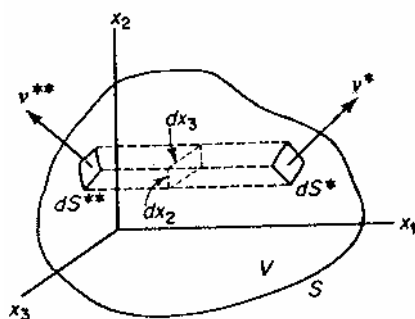


Παράρτημα Α

Το θεώρημα απόκλισης του Gauss¹

Θεωρούμε τον κυρτό χώρο V που φράσσεται από την επιφάνεια S , η οποία αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό στοιχείων, οι εξωτερικές κάθετοι των οποίων συνιστούν συνεχές διανυσματικό πεδίο.



Σχήμα Π.01

Έστω τότε συνάρτηση $A(x_1, x_2, x_3)$, η οποία ορίζεται στο χώρο $V+S$ και η οποία είναι συνεχής σε αυτό. Τότε, ολοκληρώνοντας, λαμβάνεται η παρακάτω σχέση:

$$\int_V \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1 dx_2 dx_3 = \int_S (A^* - A^{**}) dx_2 dx_3 \quad (1)$$

όπου A^* και A^{**} είναι οι τιμές του A στην επιφάνεια S στο δεξιό και στο αριστερό άκρο γραμμής παράλληλης προς τον άξονα x_1 . Οι παράγοντες $\pm dx_2 dx_3$ στο επιφανειακό ολοκλήρωμα είναι κατ' ουσία οι προβολές του πεδίου $x_2 x_3$ στα άκρα ευθείας παράλληλης προς τον άξονα x_1 . Εάν n_i είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τη διεύθυνση της εξωτερικής κάθετου στην επιφάνεια S , τότε $dx_2 dx_3 = -n_1^* dS^*$ στο δεξιό άκρο και $dx_2 dx_3 = -n_1^{**} dS^{**}$ στο αριστερό άκρο. Το επιφανειακό ολοκλήρωμα (1) γράφεται τότε:

$$\int_S A n_i^* dS^* + A^{**} n_i^{**} dS^{**} = \int_S A n_i dS$$

¹ θεώρημα απόκλισης = divergence theorem

Η σχέση (1) γράφεται τότε:

$$\int_V \frac{\partial A}{\partial x_1} dV = \int_S A n_1 dS$$

όπου dS και dV είναι στοιχεία επιφάνειας και όγκου αντίστοιχα. Αντίστοιχο αποτέλεσμα ισχύει και για το ολοκλήρωμα όγκου της ποσότητας $\partial A/\partial x_2$, ή $\partial A/\partial x_3$. Άρα,

$$\int_V \frac{\partial A}{\partial x_i} dV = \int_S A n_i dS \quad (2)$$

Η σχέση αυτή καλείται *θεώρημα απόκλισης του Gauss* (σε τρεις διαστάσεις) και ισχύει για κάθε κυρτό χώρο που μπορεί να υποδιαιρεθεί σε πεπερασμένο αριθμό κυρτών κανονικών περιοχών. Η γενίκευση του θεωρήματος για τανυστή A ισχύει και γράφεται ως εξής:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial x_i} A_{jkl\dots} dV = \int_S n_i A_{jkl\dots} dS \quad (3)$$

Βιβλιογραφία

1. Fung Y.C. *Foundations of Solid Mechanics*. Prentice Hall Inc., New Jersey, U.S.A., 1965.

Παράρτημα Β

Υπολογισμός των υδροστατικών δυνάμεων που ασκούνται στη γάστρα του πλοίου

1. Πρόγραμμα υπολογισμού υδροστατικών δυνάμεων

Για τον υπολογισμό των κομβικών δυνάμεων που οφείλονται στις υδροστατικές πιέσεις (π.χ. φόρτιση της γάστρας του σκάφους από τις πιέσεις του θαλασσινού νερού, φόρτιση σε τοιχώματα δεξαμενών υγρών φορτίων) αποφασίσθηκε η σύνταξη κώδικα που υπολογίζει τις δυνάμεις αυτές. Θα αναπτύξουμε τη μέθοδο υπολογισμού που προγραμματίστηκε:

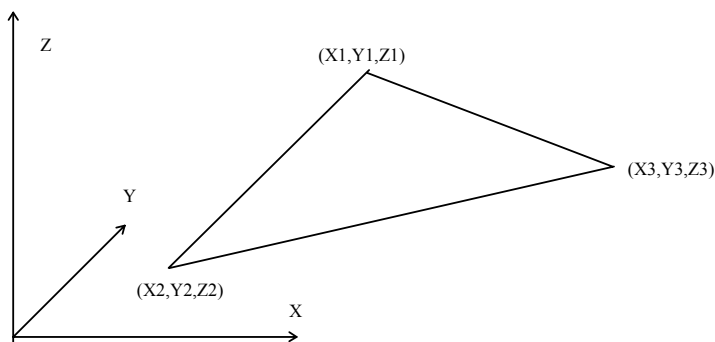
Έστω τριγωνικό στοιχείο με κορυφές 1, 2, 3 και συντεταγμένες κορυφών (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) και (X_3, Y_3, Z_3) (Σχήμα Β.1).

Έστω 12 και 13 τα διανύσματα μεταξύ των κορυφών 1-2 και 1-3 με αρχή την 1 και τέλος την 2 και 3 αντίστοιχα. Οι συντεταγμένες των διανυσμάτων δίνονται από τις σχέσεις:

$$\underline{12}: (X_2 - X_1, Y_2 - Y_1, Z_2 - Z_1)$$

$$\underline{13}: (X_3 - X_1, Y_3 - Y_1, Z_3 - Z_1)$$

Τότε το εμβαδόν E του τριγώνου 123 δίνεται από τη σχέση:



Σχήμα Β.1 Τριγωνικό στοιχείο σε σύστημα αναφοράς ($Oxyz$)
 $E = |\underline{12} \times \underline{13}| / 2$

δηλαδή από το μισό του μέτρου του εξωτερικού γινομένου των δύο διανυσμάτων. Αναπτύσσοντας κατά τα γνωστά τη σχέση αυτή, παίρνουμε το εξής αποτέλεσμα:

$$E = (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2} / 2$$

όπου:

$$A = Y_2 Z_3 - Y_2 Z_1 - Y_1 Z_3 - Y_3 Z_2 + Y_3 Z_1 + Y_1 Z_2$$

$$B = Z_2 X_3 - Z_2 X_1 - Z_1 X_3 - Z_3 X_2 + Z_3 X_1 + Z_1 X_2$$

$$C = X_2 Y_3 - X_2 Y_1 - X_1 Y_3 - X_3 Y_2 + X_3 Y_1 + X_1 Y_2$$

Έχουμε εκφράσει το εμβαδό του τριγωνικού στοιχείου ως συνάρτηση των συντεταγμένων των τριών κορυφών του. Ας φανταστούμε τώρα τη γάστρα του πλοίου βυθισμένη σε θαλασσινό νερό και ένα (μικρό) τριγωνικό τμήμα της επιφάνειάς της. Στο σημείο αυτό κάνουμε την παραδοχή ότι το στοιχείο είναι τόσο μικρό ώστε μπορούμε να αγνοήσουμε τη μεταβολή της υδροστατικής πίεσης στην επιφάνειά του. Έτσι θεωρούμε ότι το τριγωνικό στοιχείο δέχεται μια σταθερή κατανεμημένη φόρτιση ίση με την τιμή της υδροστατικής πίεσης στο κ.β. του.

Η φόρτιση αυτή δίνει μία συνισταμένη δύναμη με σημείο εφαρμογής το κ.β. του τριγώνου και διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν οι κορυφές του τριγώνου, αφού η υδροστατική δύναμη είναι κάθετη προς την επιφάνεια που ασκείται. Το μέτρο της δύναμης αυτής μπορεί να προκύψει πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια του τριγώνου E με την τιμή της υδροστατικής πίεσης στο κ.β. Η διεύθυνση προκύπτει από τα κατευθύνοντα συνημίτονα του επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

Το κ.β. του τριγώνου 123 δίνεται από τις σχέσεις:

$$X_G = (X_1 + X_2 + X_3) / 3$$

$$Y_G = (Y_1 + Y_2 + Y_3) / 3$$

$$Z_G = (Z_1 + Z_2 + Z_3) / 3$$

Το μέτρο της υδροστατικής πίεσης στο κ.β. του τριγώνου 123 είναι:

$$f_{hydr o} = \varepsilon Z_{h y d r o}$$

όπου:

$$\varepsilon = \text{ειδικό βάρος υγρού (σε N/m}^3\text{)}$$

$$Z_{hydr o} = Z - Z_G$$

όπου Z είναι η ελεύθερη επιφάνεια του υγρού στη θέση X_G (τα Z και Z_G μετρώνται ως προς το ίδιο σύστημα αναφοράς). Το μέτρο της υδροστατικής δύναμης που ασκείται στο κ.β. του τριγώνου 123 είναι:

$$F_{hydr o} = f_{hydr o} E$$

Η εξίσωση του επιπέδου που διέρχεται από τα σημεία 1, 2 και 3 του τριγωνικού στοιχείου δίνεται από τη σχέση:

$$[(Y_2-Y_1)(Z_3-Z_1)-(Y_3-Y_1)(Z_2-Z_1)](X-X_1)+[(Z_2-Z_1)(X_3-X_1)-(X_2-X_1)(Z_3-Z_1)](Y-Y_1)+[(X_2-X_1)(Y_3-Y_1)-(Y_2-Y_1)(X_3-X_1)](Z-Z_1)=0$$

Αν φέρουμε την εξίσωση του επιπέδου στη μορφή:

$$aX+bY+cZ+d=0$$

παρατηρούμε ότι: $a=A$, $b=B$, $c=C$ (τα οποία έχουν είδη υπολογισθεί). Τα συνημίτονα κατεύθυνσης μιας ευθείας κάθετης στο επίπεδο αυτό είναι:

$$\begin{aligned} C_x &= A/(A^2+B^2+C^2)^{1/2} \\ C_y &= B/(A^2+B^2+C^2)^{1/2} \\ C_z &= C/(A^2+B^2+C^2)^{1/2} \end{aligned}$$

Οι προηγούμενες σχέσεις καθορίζουν και τη διεύθυνση της υδροστατικής δύναμης. Έχουμε λοιπόν υπολογίσει το διάνυσμα της υδροστατικής δύναμης στο κ.β. του τριγωνικού στοιχείου. Απαιτούνται όμως οι δυνάμεις στους κόμβους του στοιχείου. Μπορεί εύκολα ναδειχθεί ότι η κεντροβαρική υδροστατική δύναμη μπορεί να αναχθεί σε τρεις ίσες κομβικές δυνάμεις που έχουν διεύθυνση ίδια με την αρχική και μέτρο το 1/3 του μέτρου της.

Πράγματι έστω τρίγωνο $AB\Gamma$ με κ.β. K (Σχήμα 3.5.2). Έστω ότι στο K ασκείται δύναμη $\mathbf{F}$ τυχαίας διεύθυνσης. Προφανώς η ροπή της $\mathbf{F}$ ως προς K είναι $\mathbf{M}(\mathbf{F}, K)=\mathbf{0}$. Θεωρούμε και τις τρεις κομβικές δυνάμεις $\mathbf{F}_A$, $\mathbf{F}_B$, $\mathbf{F}_\Gamma$ τέτοιες ώστε:

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_B = \mathbf{F}_\Gamma = \mathbf{F}/3$$

Για να δείξουμε ότι οι τρεις κομβικές δυνάμεις αποτελούν σύστημα στατικής ισοδυναμίας με αυτό της μίας κεντροβαρικής δύναμης, αρκεί να δείξουμε ότι:

$$1) \quad \sum \mathbf{F}_i = \mathbf{F} \qquad \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_\Gamma = \mathbf{F}$$

$$\text{και} \quad \mathbf{F}/3 + \mathbf{F}/3 + \mathbf{F}/3 = \mathbf{F}$$

που ισχύει και

$$2) \quad \sum \mathbf{M}_i(\mathbf{F}_i, K) = \mathbf{0} \qquad \mathbf{F}_A(AK) + \mathbf{F}_B(BK) + \mathbf{F}_\Gamma(\Gamma K) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{F}/3(AK + BK + \Gamma K) = \mathbf{0}$$

που ισχύει, εφόσον είναι γνωστό από τη διανυσματική ανάλυση ότι:

$$AK + BK + \Gamma K = \mathbf{0}$$

για οποιοδήποτε τρίγωνο.

Από τα προηγούμενα έχουμε τελικά ότι:

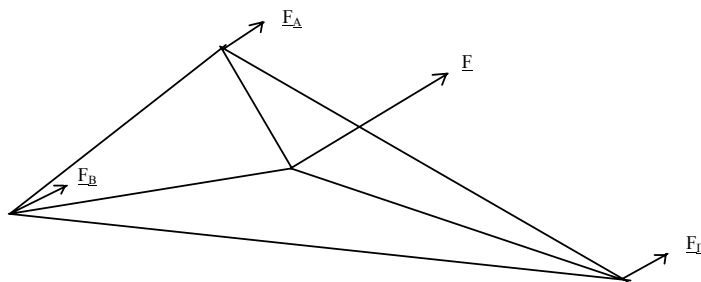
$$F_{AX} = F_{BX} = F_{GX} = 1/3 F_{hydr o} C_X$$

$$F_{AY} = F_{BY} = F_{GY} = 1/3 F_{hydr o} C_Y$$

$$F_{AZ} = F_{BZ} = F_{GZ} = 1/3 F_{hydr o} C_Z$$

Έχουμε δηλαδή υπολογίσει τις τρεις συνιστώσες της υδροστατικής δύναμης σε κάθε κόμβο του τριγωνικού στοιχείου σε συνάρτηση των συντεταγμένων των κορυφών του. Η γάστρα του πλοίου (και γενικά οποιοδήποτε πλέγμα) αποτελείται από τριγωνικά και τετράπλευρα στοιχεία. Στην πρώτη περίπτωση ο υπολογισμός είναι άμεσος. Στη δεύτερη θεωρούμε ότι το τετράπλευρο στοιχείο αποτελείται από δύο τριγωνικά στοιχεία και έτσι αναγόμεστε στην πρώτη περίπτωση. Αυτοί οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται σε κάθε στοιχείο του πλέγματος και οι δυνάμεις σε κάθε κόμβο προκύπτουν από την άθροιση των επιμέρους δυνάμεων των στοιχείων που συντρέχουν στον κόμβο αυτό. Πιο συγκεκριμένα αθροίζονται οι τρεις συνιστώσες των δυνάμεων που αντιστοιχούν στα στοιχεία που περιλαμβάνουν τον κοινό κόμβο. Οι συνιστώσες αυτές αναφέρονται ως προς το ολικό σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου, αφού ως προς αυτό αναφέρονται και οι συντεταγμένες των κόμβων.

Ο υπολογισμός των υδροστατικών φορτίων που ασκούνται σε μια επιφάνεια με τον τρόπο που περιγράφηκε προϋποθέτει ότι είναι γνωστές οι συντεταγμένες των κόμβων του πλέγματος της επιφάνειας και ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των κόμβων για το σχηματισμό των στοιχείων της επιφάνειας. Και τα δύο αυτά στοιχεία μπορεί κανείς να τα διαβάσει με το κατάλληλο format από το *ASCII* αρχείο εισόδου που φτιάχνει ο αποκωδικοποιητής. Τέλος εννοείται ότι τα παραπάνω έχουν νόημα για γνωστή γεωμετρία της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού.



Σχήμα Β.2

2. Υπολογισμός υδροστατικών φορτίων

Τέτοιες ρουτίνες συντάχθηκαν για τον υπολογισμό του Z_{hydro} (προηγούμενη παράγραφος). Αυτές καλούνται από το πρόγραμμα υδροστατικών δυνάμεων με δεδομένα τα X_G και Z_G για κάθε στοιχείο.

Καταρχήν, για τα υδροστατικά φορτία που δέχεται η γάστρα του πλοίου σε κατάσταση ήρεμου νερού κάνουμε τα εξής: Για κάθε κατάσταση φόρτωσης του σκάφους γνωρίζουμε τα βυθίσματα της ισάλου ισορροπίας. Παίρνοντας δύο βυθίσματα από αυτά, μπορούμε με γραμμική παρεμβολή (η ίσαλος είναι μια ευθεία γραμμή) να υπολογίσουμε το βύθισμα στην τυχαία θέση X_G του σκάφους, οπότε αφαιρώντας το Z_G βρίσκουμε το ύψος της στήλης υγρού που ζητάμε.

Ανάλογη είναι η διαδικασία και στην περίπτωση που έχουμε υγρά φορτία μέσα σε δεξαμενές. Από το βάρος των υγρών με τη βοήθεια του ειδικού βάρους υπολογίζουμε τον όγκο των υγρών σε κάθε δεξαμενή. Επίσης υπολογίζουμε την επιφάνεια πυθμένα της δεξαμενής και διαιρώντας τον όγκο του υγρού με αυτή βρίσκουμε το ύψος του υγρού στη δεξαμενή (αμελήσαμε μεταβολές που οφείλονται σε αλλαγή της στάθμης του υγρού λόγω μεταβολής της διαγωγιμότητας του σκάφους). Αφαιρώντας κάθε φορά το Z_G βρίσκουμε το ύψος της στήλης υγρού για κάθε στοιχείο της δεξαμενής. Ουσιαστικά εκείνο που αλλάζει από την προηγούμενη περίπτωση είναι η εξίσωση της ευθείας που περιγράφει κάθε φορά τη στάθμη του υγρού ή την ίσαλο πλευσης.

Κάπως πιο σύνθετη είναι η κατάσταση για τις ρουτίνες υπολογισμού των βυθισμάτων του πλοίου στην περίπτωση που αυτό βρίσκεται στο κοίλο ή στην κορυφή τροχοειδούς κύματος. Οι ρουτίνες είναι σχεδόν ίδιες με μία μικρή τροποποίηση στην εξίσωση του τροχοειδούς κύματος. Συγκεκριμένα στην περίπτωση που το πλοίο βρίσκεται σε κοίλο κύματος κάνουμε τα εξής:

Για κάθε τιμή του X_G υπολογίζουμε την τιμή γωνίας Θ που αποτελεί λύση της παραμετρικής εξίσωσης τροχοειδούς καμπύλης:

$$X_G = R\Theta - r \sin \Theta$$

όπου $R = L/2\pi$, $r = h/2$ (L , h το μήκος και το ύψος του τροχοειδούς κύματος αντίστοιχα). Ο υπολογισμός γίνεται με διαδοχικές δοκιμές, δηλαδή δίνουμε τιμές στη μεταβλητή Θ μέχρι το δεύτερο μέλος της εξίσωσης να συγκλίνει στο πρώτο.

Αφού υπολογισθεί το Θ βρίσκουμε την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας με τη δεύτερη παραμετρική εξίσωση τροχοειδούς καμπύλης:

$$Y = r \cos \Theta$$

Όταν το πλοίο για μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης βρεθεί από το ήρεμο νερό σε κοίλο κύματος, η ίσαλος ως προς την οποία αναφέρεται η τροχοειδής καμπύλη δεν είναι ίδια με την ίσαλο του ήρεμου νερού αλλά διαφέρει (εξακολουθεί όμως να είναι μια ευθεία γραμμή). Άρα το τελικό βύθισμα του πλοίου προκύπτει από την άθροιση:

$$Z = Z_I + Z_2 + Y$$

Το Z_1 είναι το βύθισμα σε ήρεμο νερό (είναι είδη γνωστή με τον τρόπο που περιγράφηκε στην αρχή της παραγράφου η ίσαλος ισορροπίας σε ήρεμο νερό) και είναι Z_2 μία διόρθωση που λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της ισάλου αναφοράς της τροχοειδούς καμπύλης ως προς την ίσαλο ήρεμου νερού.

Το Z_2 υπολογίζεται ως εξής: Υπολογίζεται το $Z'=Z_1+Y$ στις θέσεις δύο νομέων για τους οποίους είναι γνωστά τα βυθίσματα Z για κοίλο κύματος χρησιμοποιώντας πρόγραμμα H/Y . Υπολογίζονται σε συνέχεια και οι διαφορές $\Delta Z=Z-Z'$. Κάνοντας γραμμική παρεμβολή με γνωστές τις ΔZ αποκτάται το Z_2 σε κάθε θέση κατά μήκος του σκάφους. Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση που το πλοίο ισορροπεί σε κορυφή κύματος.

Βιβλιογραφία

1. Μπικάκη Γ. *Η μελέτη της μεταλλικής κατασκευής επιβατηγού-οχηματαγωγού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1996.

Παράρτημα Γ

Το πρόγραμμα ALGOR και εφαρμογές σε ναυπηγικές κατασκευές

1. Εισαγωγή

Το σύνολο των προγραμμάτων ALGOR είναι ένα εργαλείο μελέτης (σχεδιασμού και ανάλυσης) κατασκευών και βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο παρόν Παράρτημα θα περιγραφεί ο τρόπος χρήσης του ALGOR κατά την εκπόνηση της μελέτης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8. Αναφέρονται επίσης παραδείγματα χρήσης του σε περιπτώσεις ανάλυσης συγκεκριμένων κατασκευών. Τέλος γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης των δυνατοτήτων του ALGOR για τη χρήση του σε ναυπηγικές κατασκευές.

2. Το περιβάλλον σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου που προσομοιώνει την κατασκευή πραγματοποιείται με χρήση του προγράμματος *superdraw*. Το περιβάλλον του προγράμματος αυτού είναι τύπου *CAD (computer-aided design)*. Έτσι διαθέτει μια πληθώρα από γεωμετρικά εργαλεία: σημείο, ευθύγραμμο τμήμα, κύκλος, τόξο, *polyline*, *spline*, *B-spline*, *NURBS*. Όλες αυτές οι οντότητες αποτελούν τα εργαλεία για τη γεωμετρική αναπαράσταση μίας κατασκευής. Σημειώνεται ότι ο σχεδιασμός τρισδιάστατων επιφανειών τύπου *NURBS* γίνεται με χρήση του προγράμματος *supersurf*.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να περιστρέψει το μοντέλο, να κάνει μεγέθυνση και σμίκρυνση και να το μετακινήσει σε μια νέα θέση. Επίσης μπορεί να το δει από προκαθορισμένες όψεις, να ορίσει νέες όψεις και να χρησιμοποιήσει την εντολή *jetview* που επιτρέπει να γίνει ορατό το μοντέλο από οποιαδήποτε γωνία. Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού γενικού ή τοπικού καρτεσιανού, πολικού και σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων.

Φυσικά υπάρχουν και εντολές για απαλοιφή, αντιγραφή, και υποδιαίρεση σε ίσα μέρη των γεωμετρικών οντοτήτων. Η ημι-αυτόματη δημιουργία πλέγματος με χρήση της εντολής *construct mesh* επιτρέπει τη δημιουργία τριγωνικών και τετραγωνικών στοιχείων των οποίων οι διαστάσεις καθορίζονται από το χρήστη και μπορούν να μεταβάλλονται κατά αριθμητική και γεωμετρική πρόοδο.

Με τη χρήση του προγράμματος *supergen* μπορεί να διακριτοποιηθεί μία επιφάνεια αυτομάτως, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη περιοχές με απότομη μεταβολή της γεωμετρίας και με οπές. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ανάπτυξης πλέγματος

για τρισδιάστατα τετραεδρικά ή εξαεδρικά στοιχεία. Σημειώνεται τέλος η δυνατότητα εισαγωγής της γεωμετρίας από αρχεία τύπου *dxf* καθώς και η δημιουργία τέτοιων αρχείων. Στο περιβάλλον *superdraw* εισάγονται οι οριακές συνθήκες και η φόρτιση του μοντέλου, το οποίο προορίζεται για ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα μπορεί να μοντελοποιήσει πολλών ειδών φορτίσεις:

- Συγκεντρωμένες δυνάμεις και ροπές
- Πιέσεις
- Υδροστατικές πιέσεις
- Φορτίσεις λόγω (αδρανειακών) επιταχύνσεων (π.χ. βάρος)
- Φυγοκεντρικά φορτία
- Θερμοκρασίες

Μπορεί επίσης να δεχθεί προκαθορισμένες τιμές μετατοπίσεων στους κόμβους.

3. Το περιβάλλον παρουσίασης αποτελεσμάτων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με το πρόγραμμα *superview*. Με το πρόγραμμα αυτό μπορεί επίσης να ελεγχθεί η γεωμετρία του μοντέλου, η φόρτιση που έχει επιβληθεί καθώς επίσης και οι συνοριακές συνθήκες. Υπάρχουν και εδώ όλες οι δυνατότητες καθορισμού της όψης του μοντέλου που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να δει το μοντέλο με τις τεχνικές *hidden lines* και *light* μαζί με άλλες δυνατότητες αναπαράστασής του.

Στα πλαίσια της γραμμικής ανάλυσης το πρόγραμμα μπορεί να δώσει γραφήματα με τις τάσεις, τις μετατοπίσεις και τις παραμορφώσεις της κατασκευής. Ειδικά για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις δίνεται η δυνατότητα επιλογής αναπαράστασης των παρακάτω:

1. Της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τιμής,
2. Της ισοδύναμης τιμής κατά von Mises και
3. Της ισοδύναμης τιμής κατά Tresca

Χρήσιμη επίσης κρίνεται η δυνατότητα εκτίμησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων (με τη βοήθεια της εντολής *precision*). Τέλος, γιά να επιτευχθεί οπτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων (μετατοπίσεις), η κατασκευή μπορεί να αναπαρασταθεί σε παραμορφωμένη κατάσταση κάνοντας χρήση κατάλληλης κλίμακας.

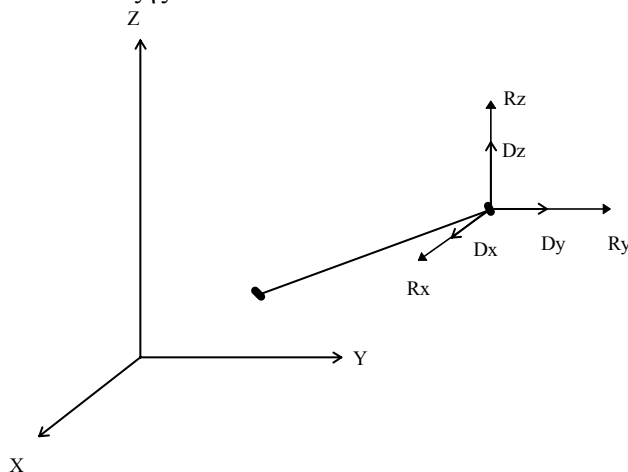
4. Παραδείγματα χρήσης του ALGOR

Το πακέτο ALGOR είναι γενικής χρήσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών:

- *Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης.* Τέτοιου είδους προβλήματα συναντώνται σε περιπτώσεις κατασκευών με μεγάλα πάχη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση ενός φράγματος που εκτείνεται μεταξύ δύο ορεινών όγκων. Τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις.
- *Προβλήματα δικτυωτών φορέων,* που αναπαριστώνται με στοιχεία-ράβδους και δοκούς. Ο μηχανικός αντιμετωπίζει συχνά προβλήματα φορέων που αντιμετωπίζονται σαν απλά δικτυώματα των οποίων τα μέλη μπορούν να φέρουν μόνο αξονικά ή και καμπτικά φορτία. Σαν δικτύωμα μπορεί για παράδειγμα να προσομοιωθεί ο πλευρικός νομέας ενός σκάφους κατά τη μελέτη της αντοχής του.
- *Προβλήματα τρισδιάστατων συμπαγών κατασκευών.* Αυτή η κατηγορία προβλημάτων περιλαμβάνει για παράδειγμα το σχεδιασμό ενός μηχανολογικού εξαρτήματος όπως είναι ο στροφαλοφόρος άξονας της κύριας μηχανής πρόωσης ενός πλοίου. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τετραεδρικά και εξαεδρικά στοιχεία.
- *Ενισχυμένες λεπτότοιχες κατασκευές.* Αυτή η κατηγορία προβλημάτων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για το ναυπηγό μηχανικό. Πράγματι η μεταλλική κατασκευή ενός σκάφους αποτελείται από λεπτά ενισχυμένα ελάσματα. Τέτοιες περιπτώσεις αντιμετωπίζονται με χρήση μοντέλων που αποτελούνται από στοιχεία ελάσματα-κελύφη και στοιχεία-δοκούς.

5. Οι δυνατότητες διακριτοποίησης των ναυπηγικών κατασκευών

Με τη χρήση του ALGOR μπορούν να μοντελοποιηθούν τμήματα ή και ολόκληρη η μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου. Οι μέθοδοι μοντελοποίησης που μπορεί να ακολουθηθούν είναι οι εξής:



Σχήμα Α1 Το στοιχείο-δοκός

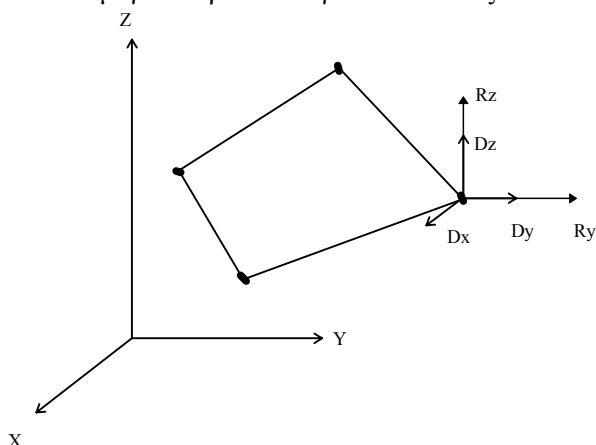
1. Δικτυώματα

Το έλασμα θεωρείται σαν πέλμα του ενισχυτικού με πλάτος ίσο με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών ενισχύσεων. Έτσι ολόκληρη η μεταλλική κατασκευή μπορεί να προσομοιωθεί από ένα σύνολο στοιχείων-δοκών.

Τα στοιχεία-δοκοί (Σχήμα A1) στο ALGOR περιλαμβάνουν τρεις κόμβους. Οι δύο πρώτοι ορίζουν τα άκρα του στοιχείου ως προς το γενικό σύστημα αναφοράς ενώ ο τρίτος χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό της διατομής του ενισχυτικού στο χώρο. Σε κάθε έναν από τους κόμβους των άκρων του στοιχείου αντιστοιχούν έξι βαθμοί ελευθερίας: τρεις περιστροφές R_x, R_y, R_z περί τους άξονες X, Y, Z του γενικού συστήματος αναφοράς και τρεις μετατοπίσεις D_x, D_y, D_z στις διευθύνσεις X, Y, Z του γενικού συστήματος αναφοράς. Κάθε στοιχείο-δοκός μπορεί να παραλάβει ροπές και δυνάμεις τυχαίας διεύθυνσης σε κάθε κόμβο των άκρων του.

2. Στοιχεία ελάσματα-κελύφη

Ολόκληρη η μεταλλική κατασκευή διακριτοποιείται κάνοντας χρήση στοιχείων ελασμάτων-κελυφών. Τα ενισχυτικά μπορούν επίσης να αναπαρασταθούν με στοιχεία-ελάσματα, που έχουν το πάχος του κορμού και του πέλματος του ενισχυτικού. Η μέθοδος αυτή είναι και η ακριβέστερη επειδή προσομοιώνεται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια η πραγματική κατασκευή. Προφανώς είναι και η πιο επίπονη ενώ ταυτόχρονα έχει και το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα A2 Στοιχείο έλασμα-κέλυφος

Τα στοιχεία ελάσματα-κελύφη (Σχήμα A2) περιλαμβάνουν τρεις ή τέσσερις κόμβους, ανάλογα με τον αριθμό των πλευρών. Τα στοιχεία αυτά είναι επίπεδα ή τρισδιάστατα, ενώ κάθε κόμβος διαθέτει πέντε βαθμούς ελευθερίας: δύο περιστροφές R_y, R_z περί τους άξονες Y, Z του γενικού συστήματος αναφοράς και τρεις μετατοπίσεις D_x, D_y, D_z , ως προς τις διευθύνσεις X, Y, Z του γενικού συστήματος αναφοράς. Κάθε στοιχείο έλασμα-κέλυφος μπορεί να παραλάβει ροπές και δυνάμεις τυχαίας διεύθυνσης σε κάθε κόμβο. Έτσι είναι κατάλληλο για την περίπτωση ελασμάτων πλοίου που κάμπτονται στο επίπεδό τους. Τα στοιχεία ελάσματα-κελύφη

είναι τύπου QM5 και βασίζονται στη θεωρία λεπτότοιχων ελασμάτων κατά Veubeke.

3. Στοιχεία ελάσματα-κελύφη και δοκοί

Στη μελέτη που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8 τα ελάσματα της μεταλλικής κατασκευής αναπαριστώνται με στοιχεία ελάσματα-κελύφη ενώ τα ενισχυτικά μοντελοποιούνται με στοιχεία-δοκούς. Στη συνέχεια γίνεται συνδυασμός σε ένα σύνθετο μοντέλο που προσομοιώνει τη μεταλλική κατασκευή. Αυτή η μέθοδος ακολουθείται και στην παρούσα εργασία.

Το πακέτο ALGOR διαθέτει *άκαμπτα* στοιχεία, *ελαστικές στηρίξεις*, επεξεργαστές υπολογισμού του βάρους, των ροπών αδράνειας και των ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου. Επίσης υπάρχει δυνατότητα χρήσης *σύνθετων υλικών* που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μικρά σκάφη. Τέλος η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων λυγισμού, κραδασμών, μη-γραμμικής ανάλυσης, απόκρισης σε φασματική διέγερση συμπληρώνουν το υπολογιστικό περιβάλλον του πακέτου.

Το βασικό μειονέκτημα του προγράμματος ALGOR για τη μελέτη ναυπηγικών κατασκευών είναι ότι δεν διαθέτει εύχρηστο τρόπο για την προσομοίωση των υδροστατικών φορτίων. Επίσης, δεν διαθέτει στοιχεία-ενισχυμένα ελάσματα όπως άλλα πακέτα που είναι εξειδικευμένα για ναυπηγικές χρήσεις ούτε στοιχεία-δοκούς που να είναι ειδικά σχεδιασμένα για ναυπηγικές εφαρμογές. Τέλος δεν διαθέτει στοιχεία-κελύφη μεγάλης καμπυλότητας που χρειάζονται στην ακριβέστερη μοντελοποίηση καμπύλων συνόρων. Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη ναυπηγικών κατασκευών αφού διαθέτει στοιχεία ελάσματα-κελύφη και στοιχεία δοκούς που είναι και τα κύρια δομικά στοιχεία των ναυπηγικών κατασκευών.

Βιβλιογραφία

1. Μπικάκη Γ. *Η μελέτη της μεταλλικής κατασκευής επιβατηγού-οχηματαγωγού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1996.

Παράρτημα Δ

Το Πρόγραμμα *MAESTRO*. Οδηγίες χρήσης.

1. Γενικά. Εισαγωγή στο πρόγραμμα

Μία εισαγωγική περιγραφή στο πρόγραμμα *MAESTRO* περιλαμβάνεται στο βιβλίο (Κεφάλαιο 10) ενώ το παρόν παράρτημα έρχεται να συμπληρώσει το κεφάλαιο αυτό. Με κανένα τρόπο δεν υποκαθιστά τα εγχειρίδια χρήσης στην αγγλική γλώσσα που συνοδεύουν το πρόγραμμα, τα οποία άλλωστε αφορούν και την εκάστοτε τρέχουσα έκδοσή του. Το παρόν κείμενο παρέχεται για να διευκολύνει την αρχική χρήση του, δίνοντας ορισμένες διευκρινήσεις και κάποια ορολογία στην ελληνική γλώσσα.

1.1 Περιγραφή του προγράμματος

Με το *MAESTRO* είναι δυνατή η διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία της κατασκευής ενός ολόκληρου πλοίου ή ενός τμήματός του για την ανάλυσή της, το σχεδιασμό της αλλά και η βελτιστοποίησή της.

Όπως με κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι δυνατή η αναπαράσταση και η θεώρηση της ακριβής γεωμετρίας της κατασκευής - κάτι συνήθως ακατόρθωτο με τις αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού - και η μετέπειτα μελέτη και ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων υπό την επίδραση του φορτίου που επιβάλλεται. Πέρα από ένα απλό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων όμως στο πακέτο περιλαμβάνεται και ένα πρόγραμμα γραφικών το οποίο επιτρέπει την σχετικά εύκολη απεικόνιση των στοιχείων που αποτελούν το σκάφος, διαδικασία που είναι -χωρίς αυτό- επίπονη και χρονοβόρα για την πολύπλοκη κατασκευή του πλοίου.

Αναλυτικότερα, το *MAESTRO* αποτελείται από τα εξής προγράμματα:

1. *MAESTRO Modeler (MM)* το οποίο είναι ένα πρόγραμμα γραφικών με το οποίο μπορούμε να μοντελοποιήσουμε εύκολα οποιοδήποτε τμήμα της κατασκευής θέλουμε, ακόμα και ολόκληρο το πλοίο κάνοντας χρήση κυρίως του δρομέα (cursor) και των επιλογών που εμφανίζονται στην οθόνη. Η βασική αυτή λειτουργία του προγράμματος μας βοηθάει να διακριτοποιούμε μεγάλες επιφάνειες που αποτελούνται από πολλά και διαφορετικά μεταξύ τους στοιχεία και ταυτόχρονα να βλέπουμε στην οθόνη την κατασκευή την ώρα που δημιουργείται το μοντέλο της και να επεμβαίνουμε όταν θέλουμε να διορθώσουμε κάτι ή να χωρίσουμε την κατασκευή σε μικρότερα και πιο ευέλικτα τμήματα. Κάθε αυτόνομο τμήμα στο οποίο μπορούμε να υποδιαιρέσουμε την κατασκευή και το οποίο

μπορεί να μελετηθεί είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με ολόκληρη την κατασκευή καλείται *module* (τομέας).

2. *MAESTRO Solver*, που είναι το κύριο τμήμα του υπολογιστικού εργαλείου. Ουσιαστικά είναι το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων το οποίο κάνει την ανάλυση της κατασκευής. Υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο κάτω από οποιαδήποτε φόρτιση. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα βέλτιστου σχεδιασμού της κατασκευής με έμφαση στις περιοχές όπου προβλέπεται αστοχία ή οι τάσεις είναι πολύ χαμηλές, οπότε επιτρέπεται η μείωση των παχών. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη δυναμική ανάλυση της κατασκευής με την εισαγωγή κατάλληλων στοιχείων και άλλων σχετικών παραμέτρων.
3. *MAESTRO Graphics (MG)* το οποίο παρέχει μια γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη μελέτη. Η απεικόνιση λαμβάνει τη μορφή χρωματικών περιγραφών των πεδίων των τάσεων και των παραμορφώσεων της κατασκευής, παρέχοντας έτσι μια πρώτη εικόνα των κατανομών και μεγεθών των τάσεων (και των λοιπών μεταβλητών). Εντοπίζονται έτσι άμεσα οι περιοχές στις οποίες προκύπτει υπέρβαση των αποδεκτών ορίων.

1.2 Εγχειρίδιο του προγράμματος

Το πρόγραμμα συνοδεύεται από το πλήρες εγχειρίδιό του που αποτελείται από τρεις τόμους. Το παρόν κείμενο αποτελεί έναν οδηγό στο ογκώδες εγχειρίδιο του προγράμματος και σκοπός του είναι να κάνει ευκολότερη την εξοικείωση με το πρόγραμμα, παραπέμποντας κάθε φορά στην κατάλληλη ενότητα του εγχειριδίου, τονίζοντας και διευκρινίζοντας τα απαραίτητα σημεία και παρέχοντας μια συνοπτική και συγκεντρωτική διαδικασία η οποία οδηγεί στην σωστή χρήση του προγράμματος.

Μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων που αποτελούν τους τρεις τόμους του εγχειριδίου του προγράμματος αναφέρεται παρακάτω:

Τόμος 1^{ος}

*Overview*¹ - περιέχει συγκεντρωτικές εισαγωγικές έννοιες για την δομή του προγράμματος.

*Installation Guide*² - διαδικασία εγκατάστασης του προγράμματος

*Basic Features Manual*³ - Περιέχει μια ανασκόπηση των βασικών όρων των πεπερασμένων στοιχείων και τον τρόπο με τον οποίο προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του *MAESTRO*. Παραθέτει και εξηγεί τα στοιχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα, την υποδιαίρεση του μοντέλου σε υποκατασκευές, τους δυνατούς τρόπους φόρτισης του, τον τρόπο εκλογής των κα-

¹ overview = επισκόπηση

² Installation Guide = Οδηγός Εγκατάστασης

³ Basic Features Manual = Εγχειρίδιο Βασικών Χαρακτηριστικών

τάλληλων οριακών συνθηκών και την χρήση των υπερστοιχείων σε συνάρτηση με τη λειτουργικότητα του προγράμματος. Τα δύο πρώτα κεφάλαια της ενότητας αυτής είναι βασικής σημασίας για μια πρώτη γνωριμία με το πρόγραμμα και τις δυνατότητες που αυτό παρέχει και συνιστάται στον αναγνώστη να απευθυνθεί σε αυτά μετά το πέρας του παρόντος κεφαλαίου. Τα υπόλοιπα τρία κεφάλαια της ίδιας ενότητας αναφέρονται σε προχωρημένες λειτουργίες του προγράμματος και κρίνεται σκόπιμο να μελετηθούν μετά την πρώτη επαφή με το πρόγραμμα.

*Modeler Tutorial*⁴ - Οδηγός εκμάθησης του τρόπου χρήσης του προγράμματος με το οποίο μπορεί ο χρήστης να προβεί στην μοντελοποίηση της κατασκευής που τον ενδιαφέρει. Με βάση την μοντελοποίηση τμήματος ενός πλοίου γίνεται μια περιγραφή ορισμένων βασικών λειτουργιών του και δίνεται παράδειγμα της εφαρμογής τους. Συνιστάται να μελετηθεί από τους χρήστες του προγράμματος αφότου όμως έχει ολοκληρωθεί η μελέτη και η εφαρμογή του παρόντος τεύχους.

*Operation Guide*⁵ - Δίνονται πληροφορίες σχετικά με την εκτέλεση του προγράμματος (τόσο του κυρίου όσο και των γραφικών), αναφέρονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, το είδος των αρχείων που προκύπτουν καθώς επίσης και κάποιες σύντομες οδηγίες για την εκτέλεση και τη χρήση του MG (πρόγραμμα γραφικών).

Examples - Περιλαμβάνονται δύο απλά παραδείγματα και περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα για την κατασκευή του αρχείου εισαγωγής (*input file*) και τα αποτελέσματα τα οποία υπάρχουν στο αρχείο αποτελεσμάτων (*output file*) που ακολουθεί την εκτέλεση του προγράμματος.

Τόμος 2^{ος}

*Data Preparation Manual*⁶ - Είναι το κυριότερο μέρος του εγχειριδίου μια και περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία, εντολές και παραμέτρους με τις οποίες επιτυγχάνεται η μοντελοποίηση της κατασκευής, η επιβολή φορτίων και οριακών συνθηκών και γενικότερα περιγράφονται όλα τα στοιχεία τα απαραίτητα για την σύνταξη του αρχείου εισαγωγής. Ο τόμος αυτός θα συνοδεύει τον χρήστη καθ' όλη τη διαδικασία της μοντελοποίησης και κρίνεται απαραίτητος - ώστε ο χρήστης να έχει τον απόλυτο έλεγχο της εργασίας του - ανεξάρτητα από τις ευκολίες τις οποίες παρέχει το MM, το οποίο απλώς είναι ένας γραφικός τρόπος κατασκευής του μοντέλου βασισμένος στο *Data Preparation Manual (DPM)*.

⁴ Modeler Tutorial = Οδηγός Εκμάθησης του Modeler (πρόγραμμα διακριτοποίησης)

⁵ Operation Guide = Οδηγός Λειτουργίας

⁶ Data Preparation Manual = Εγχειρίδιο Προετοιμασίας Δεδομένων

Τόμος 3^{ος}

Modeler Manual - Είναι το εγχειρίδιο με το οποίο ο χρήστης του προγράμματος θα χρησιμοποιήσει το *MM* για τη γραφική κατασκευή του μοντέλου. Δεν επιτρέπει τη επιβολή φορτίων και οριακών συνθηκών παρά μόνο την εισαγωγή των πεπερασμένων στοιχείων. Η χρήση του συμπληρώνεται από το *DPM*.

Graphics Manual - οδηγός για τη χρήση του *MG* για τον οπτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων του προγράμματος.

Σκοπός του παρόντος είναι, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, να γίνει μια σύντομη παρουσίαση της εφαρμογής με βάση την οποία διευκολύνεται η εκμάθηση του προγράμματος και επεξηγούνται λεπτομέρειες που είτε δεν αναφέρονται στο εγχειρίδιο είτε βρίσκονται διασπαρμένες. Ο υπεύθυνος χρήστης του προγράμματος θα αντιληφθεί ότι σύντομα θα πρέπει να προχωρήσει στην ουσιαστική μελέτη των εγχειριδίων για την εξεύρεση των λύσεων στα προβλήματα που θα του προκύψουν.

1.3 Ανάλυση με το *MAESTRO*

Το *MAESTRO* είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο μπορούμε σχετικά εύκολα και οικονομικά να προβούμε στην μελέτη μιας σύνθετης και πολύπλοκης λεπτότοιχης κατασκευής. Μας επιτρέπει την άμεση μοντελοποίηση της σε πεπερασμένα στοιχεία μεγάλων διαστάσεων (αραιό πλέγμα), ανάλυση η οποία κρίνεται επαρκής για τον έλεγχο της εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται σε ένα πλοίο και γενικότερα σε μια μεγάλη κατασκευή. Υπάρχει και η δυνατότητα ανάλυσης με μεγαλύτερη ακρίβεια σε περιοχές όπου η αρχική μελέτη έδειξε αυξημένες τάσεις καθώς και σε τμήματα της κατασκευής που κατά τον μελετητή χρήζουν μεγαλύτερης προσοχής και λεπτομερέστερης μελέτης, η οποία επιτυγχάνεται με πυκνότερη διακριτοποίηση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη συγκεκριμένη περιοχή (*fine mesh analysis*). Τέτοια σημεία μπορεί να είναι αυτά όπου εμφανίζεται ή περιμένουμε να εμφανιστεί, συγκέντρωση τάσεων ή σημεία όπου προκύπτει ραγδαία μεταβολή των τάσεων που υπολογίζονται αρχικά. Η ανάλυση αυτή ακολουθεί την κύρια ανάλυση του *MAESTRO* και γίνεται με το πρόγραμμα *DSA*, με το οποίο όμως δε θα ασχοληθούμε προς το παρόν.

Μια συνολική εικόνα του τρόπου χρήσης του προγράμματος, της σειράς εκτέλεσής του και του τρόπου με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους τα επιμέρους προγράμματα που το αποτελούν δίνει ο Πίνακας 1 στο τέλος του κειμένου.

Πρωταρχικός σκοπός του *MAESTRO* είναι ο *σχεδιασμός μιας νέας κατασκευής*, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί το ίδιο αποτελεσματικά και για την *ανάλυση μιας υπάρχουσας κατασκευής*.

Το πρόγραμμα είναι ειδικά διαμορφωμένο για τη μελέτη κατασκευών τοπολογικά παρόμοιων με τα πλοία (π.χ. μεγάλα οχήματα, αεροσκάφη, δεξαμενές κλπ) και ως εκ τούτου παρέχει δυνατότητες που βοηθούν τόσο τη μοντελοποίηση όσο και τη μελέτη παρόμοιων κατασκευών.

Στις κατασκευές αυτές (στη συνέχεια θα αναφερόμαστε μόνο στα πλοία) τόσο το κύριο σύστημα ενίσχυσης (διάταξη νομέων) όσο και τα άλλα ενισχυτικά που χρησιμοποιούνται ακολουθούν συνήθως μία παρόμοια διάταξη καθ' όλο το μήκος του πλοίου. Μια μεγάλη κατασκευή συνήθως αποτελείται από πολλούς *τομείς* (*modules*) συνδεδεμένους μεταξύ τους. Ένας τομέας έχει μια γεωμετρική κανονικότητα και ομοιομορφία όσον αφορά στα στοιχεία αντοχής του κατά τη διαμήκη κατεύθυνση. Ο κάθε τομέας υποδιαιρείται σε *στρώσεις* (*strakes*), οι οποίες είναι διαμήκεις σειρές ενισχυμένων ελασμάτων και νομέων, ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών, που συχνά συνοδεύονται από μια διαμήκη δοκό στο ένα άκρο τους. Ένας τομέας μπορεί να περιλαμβάνει τον αριθμό των στρώσεων και άλλων μεμονωμένων στοιχείων της κατασκευής που θα επιλέξει ο χρήστης.

Το Σχήμα 1 δίνει μια εικόνα των στρώσεων και των στοιχείων που τα αποτελούν, καθώς και τη θέση τους στον τομέα. Οι τομείς μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με διάφορους τρόπους έτσι ώστε να διαμορφώσουν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο του πλοίου. Οι τομείς καθορίζονται από την απόσταση των νομέων που τους αποτελούν και τη μορφολογία του καθενός.

Τόσο τα στοιχεία που εισάγονται στο πρόγραμμα όσο και τα αποτελέσματα που παρέχει είναι οργανωμένα σύμφωνα με τους τομείς στους οποίους έχει υποδιαιρεθεί η κατασκευή. Κάθε τομέας καθορίζεται, αναλύεται, μελετάται και βελτιστοποιείται ξεχωριστά.

1.4 Πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιεί το MAESTRO

Τα κυριότερα στοιχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι τα εξής:

1. *Hybrid Beam*⁷: Στοιχείο-δοκός για τη διακριτοποίηση νομέων και ενισχυτικών που συνεργάζονται με έλασμα. Στο στοιχείο αυτό θεωρείται ότι το έλασμα λειτουργεί ως ένα από τα πέλματα του ενισχυτικού, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του ενισχυτικού καθώς και έναν συντελεστή που καθορίζει ο χρήστης για το συνεργαζόμενο πλάτος του ελάσματος. Ως αξονική ακαμψία λαμβάνεται μόνο αυτή του ενισχυτικού καθώς η αντίστοιχη του ελάσματος λαμβάνεται υπόψη από το αντίστοιχο στοιχείο. Η θέση του ουδέτερου άξονα και η ροπή αδράνειας κάθε στοιχείου-δοκού υπολογίζεται αυτόματα.
2. *Stiffened Panel Element*⁸: ορθοτροπικό τετράπλευρο έλασμα ενισχυμένο κατά το εγκάρσιο ή το διάμηκες και που συνυπολογίζει αυτόματα την καμπτική ακαμψία των συγκολλημένων ενισχυτικών.
3. *Strut Element*⁹: ράβδος με αξονική μόνο ακαμψία.
4. *Membrane Element*¹⁰: στοιχείο με ακαμψία μόνο κατά το επίπεδο του.

⁷ Hybrid Beam = Υβριδική Δοκός

⁸ Stiffened Panel Element = στοιχείο ενισχυμένο έλασμα

⁹ Strut Element = στοιχείο-ράβδος

¹⁰ Membrane Element = μεμβρανικό στοιχείο

5. *Bracket Element*¹¹: Στοιχείο που μοντελοποιεί την απαιτούμενη ακαμψία στα άκρα των δοκών.
6. *Super Element*¹²: είναι ένα σύμπλεγμα στοιχείων χωρίς καμπτική ακαμψία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εγκάρσια τομή του μοντέλου.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει και πλήθος άλλων στοιχείων τα οποία είναι χρήσιμα στον μελετητή για την αποτελεσματικότερη μοντελοποίηση της κατασκευής. Το στοιχεία αυτά αναφέρονται στο *MM* και στο *DPM* και φαίνονται στο Σχήμα 2.

1.5 Διακριτοποίηση της κατασκευής με το *MAESTRO*

Το πρόγραμμα δημιουργεί μια σειρά διατομών σε αποστάσεις που προκαθορίζονται από το χρήστη και είναι σταθερές ή μεταβαλλόμενες, έχουν δε την ίδια μορφή πλέγματος και κόμβων. Η μορφή της διατομής καθορίζεται από τα σημεία αναφοράς τα οποία εισάγει ο χρήστης του προγράμματος ανάλογα με τα δεδομένα της κατασκευής. Όταν εισαχθούν οι κόμβοι καθορίζονται οι *στρώσεις* (strakes) σε κάθε ζεύγος κόμβων που βρίσκονται σε σειρά με τις πλευρές των στρώσεων. Κάθε στρώση έχει ομοιόμορφες διαστάσεις και διάταξη και εκτείνεται σε όλο το μήκος του τομέα.

Οι ιδιότητες και τα στοιχεία που αποτελούν τις στρώσεις μπορούν να αλλάξουν κατά το μήκος του πλοίου, διαγράφοντας την υπάρχουσα στρώση μεταξύ δύο διατομών και θεωρώντας μια άλλη στα ίδια σημεία ή κάποιο άλλο στοιχείο στη θέση της.

Οι νομείς μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε διατομή της κατασκευής ή με όποια άλλη σειρά επιθυμούμε. Το *διάστημα μεταξύ δύο παραπλήσιων νομέων* καλείται *bay* και προκαθορίζεται στις επιλογές της στρώσης. Το διάστημα μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο ενισχυμένο έλασμα ή μπορεί να αποτελείται και από περισσότερα, εάν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς ή μια πιο εξυπηρετική κατανομή του χρησιμοποιούμενου πλέγματος.

Το μήκος ενός τομέα μπορεί εύκολα να μεταβληθεί αλλάζοντας τον αριθμό ή την ισαπόσταση των διατομών.

Συνιστάται η κατασκευή να υποδιαιρείται σε επιμέρους υποκατασκευές όταν αυτό απαιτεί το μέγεθος της και η πολυπλοκότητά της. Έτσι επιτυγχάνεται ευκολότερα η διακριτοποίησή της και μπορεί να ελεγχθεί πιο ολοκληρωμένα από τον χρήστη του προγράμματος. Ορισμένες φορές μια υποκατασκευή χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η σωστή επιβολή των φορτίων, των περιορισμών και των αλληλεπιδράσεων της με τη γειτονική κατασκευή. Παράδειγμα αποτελεί η διακριτοποίηση ενός πλοίου για το οποίο δεν ενδιαφέρει η απόκριση του πρωαίου και του πυρναίου τμήματός του. Η κατασκευή διακριτοποιείται τότε σε δύο υποκατασκευές, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από ένα τομέα, εφόσον η απόσταση

¹¹ bracket element = στοιχείο μπρακέτο (αγκώνας)

¹² superelement = υπερστοιχείο

μεταξύ των νομέων παραμένει σταθερή και δεν υπάρχει άλλος λόγος για την περαιτέρω υποδιαίρεση τους. Η υποδιαίρεση σε υποκατασκευές μπορεί επίσης να διευκολύνει την βελτιστοποίηση της κατασκευής.

Το μήκος του πλοίου που θα διακριτοποιηθεί θα πρέπει να είναι ικανό ώστε να αντιπροσωπεύει ένα τυπικό και επαναλαμβανόμενο τμήμα του. Ένα ολόκληρο δι-αμέρισμά του, δηλαδή ο χώρος μεταξύ δύο εγκαρσίων φρακτών, πολλές φορές ε-παρκεί, εκτός εάν απαιτείται η καταγραφή της συμπεριφορά ολόκληρης της κατα-σκευής. Στα δεξαμενόπλοια και στα bulk carriers το μήκος του μοντέλου πρέπει να εκτείνεται σε τουλάχιστον τρία διαμερίσματα έτσι ώστε να μπορεί να εξεταστεί και η περίπτωση της εναλλακτικής φόρτωσης των κυτών.

Στο MAESTRO παρέχεται η δυνατότητα να καθορισθούν και να ληφθούν υπό-ψη κατά τον υπολογισμό των τάσεων διάφοροι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας έναντι της αβεβαιότητας στη φόρτιση, στην ποιότητα των υλικών, στην σωστή κα-τασκευή τους, στη διαμόρφωση και στη συγκόλλησή τους. Οι επιμέρους συντελε-στές καθορίζονται από τον μελετητή έτσι ώστε να μπορεί να υπολογισθεί το *επίπε-δο αξιοπιστίας* της κατασκευής¹³.

1.6 Καθορισμός των τομέων

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διακριτοποίηση με το MAESTRO περι-λαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

Στάδιο 1. *Endpoints*¹⁴: καθορίζονται για το ένα άκρο του μοντέλου, και αυτόματα δημιουργούνται σε κάθε διατομή που έχουμε δηλώσει ότι το αποτελεί. Πρέπει να καθορισθεί ένα σημείο για κάθε σταθμίδα, για κάθε σημείο μεταβολής της γεωμετρίας και για κάθε σημείο συμβολής καταστρωμάτων, διαμήκων φρακτών, πλευρικών ελασμάτων καθώς και κατά το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας της κατασκευής, εάν υπάρχει. Εάν το μοντέλο δεν είναι σταθερό καθ'όλο το μήκος του, τότε θα πρέπει να ορίζονται δύο ζεύγη σημείων, ένα για κάθε άκρο του τομέα.

Στάδιο 2 *Strakes-girders*¹⁵: Το πρώτο σημείο γίνεται η πλευρά 1 της στρώσης-ζυγού και το δεύτερο η πλευρά 2. Κάθε δοκός συνδέε-ται και αποτελεί μέρος της στρώσης-ζυγού με την οποία γειτο-νεύει ενώ μια στρώση-ζυγό δε μπορεί να διαθέτει περισσότερες από μια δοκούς (κατά το διάμηκες). Η δοκός πάντα τοποθετείται στην πλευρά 1 της στρώσης-ζυγού της οποίας αποτελεί μέρος

¹³ Κατά την ορθολογική σχεδίαση μιας κατασκευής χρησιμοποιείται η *μέθοδος της αξιοπιστίας κατα-σκευών (structural reliability method)*. Περισσότερες πληροφορίες για την εφαρμογή της στην κατα-σκευή του πλοίου παρατίθενται στο κείμενο *Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου. Θέματα Τοπικής Αντοχής*, Π.Α. Καρύδη, Αθήνα 2000 (Κεφάλαιο 14).

¹⁴ endpoint = σημείο άκρου

¹⁵ strake-girder = στρώση-ζυγό

και ποτέ στην άλλη πλευρά του γιατί τότε δεν θα ληφθεί υπόψη η παρουσία της.

Στάδιο 3 *Transverse frames*¹⁶: Μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε διατομή ή σε κάθε δεύτερη ή οποιαδήποτε επιθυμητή εναλλαγή τους. Οι δοκοί των νομέων που βρίσκονται στην ίδια στρώση-ζυγό έχουν ίδιες διαστάσεις. Ο άξονας *Ox* μιας δοκού έχει κατεύθυνση από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 2. Για κάθε δοκό πρέπει να δίνεται ο προσανατολισμός του κορμού του σε σχέση με το έλασμα.

1.7 Καθορισμός των φορτίων

Το *MAESTRO* παρέχει τις εξής δυνατότητες επιβολής φορτίων στο μοντέλο:

- Σημειακά φορτία (δυνάμεις και ροπές)
- Κατανεμημένα φορτία σε δοκούς
- Υδροστατική πίεση και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο σε ελάσματα, αδρανειακά φορτία
- Την καμπύλη φόρτισης του πλοίου
- Εσωτερικά και εξωτερικά φορτία σε δεξαμενές υγρών ή βυθισμένων τμημάτων της κατασκευής
- Φορτία από κύματα που μπορούν να υπερτεθούν σε κατάσταση πλεύσης σε ήρεμο νερό
- Ψευδοστατικές πιέσεις από σημειακές πηγές που μεταβάλλονται ανάλογα με την απόσταση τους από την πηγή
- Καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις σε κάθε επιθυμητή εγκάρσια τομή του μοντέλου, όταν δεν έχει μοντελοποιηθεί ολόκληρη η κατασκευή και θέλουμε να λάβουμε υπόψη την αλληλεπίδραση της με τα υπόλοιπα τμήματα της και επιπλέον σε συνεργασία με τις ανωτέρω φορτίσεις η κατασκευή μπορεί να έχει όποια κλίση κατά το εγκάρσιο θέλουμε και κατά το διάμηκες με ανάλογη μεταβολή στις πιέσεις που ασκούνται.

Τα φορτία υποδιαιρούνται σε ομάδες που καλούνται ‘**loadsets**’ και οι οποίες μπορούν να συνδυασθούν μεταξύ τους καθ’ οιονδήποτε τρόπο, καθορίζοντας την επιβαλλόμενη κατάσταση φόρτισης ‘**loadcase**’ η οποία είναι μια ομάδα φορτίων που ασκούνται ταυτόχρονα στο μοντέλο.

Οι πιέσεις που οφείλονται σε υγρό δημιουργούνται αυτόματα, για κάθε στρώση κάτω από την επιφάνειά του, ανάλογα με το υδροστατικό ύψος. Οι ψευδοστατικές πιέσεις των κυμάτων επίσης ασκούνται αυτόματα σε κάθε βρεχόμενη στρώση, όταν καθορίζεται το μήκος, το ύψος και τη γεωμετρία του κύματος.

Επιπλέον, εάν υπάρχουν κάποια τμήματα της αρχικής κατασκευής τα οποία δεν έχουν διακριτοποιηθεί και δεν περιλαμβάνονται στην ανάλυση, όλες οι τά-

¹⁶ transverse frame = (εγκάρσιος) νομέας

σεις που αναπτύσσονται στις οριακές διατομές τους υπολογίζονται από το πρόγραμμα, αρκεί να εισαχθούν οι τιμές της καμπτικής ροπής και της τέμνουσας δύναμης που ασκείται στα άκρα του μοντέλου από την υπόλοιπη κατασκευή.

1.8 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών

Αν η κατασκευή είναι συμμετρική περί το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο τότε μόνο το μισό μοντέλο της αρκεί για την μελέτη. Στην περίπτωση αυτή το MAESTRO αυτόματα επιβάλλει στο επίπεδο συμμετρίας τους απαιτούμενους περιορισμούς.

Στην περίπτωση που η κατασκευή είναι συμμετρική και ως προς εγκάρσιο επίπεδο τότε αρκεί το μοντέλο να είναι το ένα τέταρτο αυτής.

Για να αποφευχθεί η κίνηση του μοντέλου ως άκαμπτο σώμα καθώς επίσης και για να ορισθεί ένα σημείο (επίπεδο) αναφοράς για τις παραμορφώσεις θα πρέπει να επιβληθούν και κάποιοι επιπλέον περιορισμοί, οι οποίοι θα πρέπει να είναι οι ελάχιστοι δυνατοί.

Ανεξάρτητα από την συμμετρία της φόρτισης, κάθε κατάσταση φόρτισης θα πρέπει να προσεγγίζει κατά το δυνατόν τις πραγματικές συνθήκες. Θα πρέπει να αποτελείται από ένα σύνολο δυνάμεων που διασφαλίζουν ισορροπία του μοντέλου, έτσι ώστε οι μόνοι περιορισμοί που θα απαιτηθούν είναι αυτοί που διασφαλίζουν την αποφυγή της κίνησης του άκαμπτου φορέα. Οι αντιδράσεις που θα προκύψουν στα σημεία στήριξης θα είναι τότε σχετικά μικρές και δεν θα επιφέρουν κάποια αλλοίωση στην απόκριση του μοντέλου.

1.9 Χρήση υπερστοιχείων

Η χρήση των υπερστοιχείων επιτρέπει τη μοντελοποίηση των τμημάτων της κατασκευής που βρίσκονται σε εγκάρσιες τομές του τομέα, όπως οι εγκάρσιες φρακτές, τα μεγάλα μπρακέτα, κλπ. Εάν ο τομέας δεν είναι σταθερός κατά το μήκος του τότε το πρόγραμμα αυτόματα μεταβάλλει τις διαστάσεις των υπερστοιχείων ώστε να ταιριάζουν σε κάθε διατομή που θέλουμε και τα τοποθετεί στις διατομές αυτές. Ένα υπερστοιχείο αποτελείται από μεμβρανικά στοιχεία και από ράβδους και έχει μόνο κατά το επίπεδο του ακαμψία. Εάν απαιτείται και καμπτική ακαμψία του υπερστοιχείου αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη και καμπτικών δοκών. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πρόσθετοι κόμβοι μέσα στο υπερστοιχείο για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.

Επειδή τα υπερστοιχεία αποτελούνται κυρίως από στοιχεία τα οποία στο επίπεδο τους δεν διαθέτουν στρεπτική ακαμψία, είναι απαραίτητο να συνδέονται με την υπόλοιπη κατασκευή με *συνδέσεις (junctions)* που θα επιτρέψουν την ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο. Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο MM και στο DPM.

1.10 Αποτελέσματα ανάλυσης

Για κάθε κατάσταση φόρτισης που έχει ορισθεί υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις σε όλα τα προκαθορισμένα σημεία και στοιχεία που αποτελούν το μοντέλο. Ελέγχονται όλες τις πιθανές καταστάσεις αστοχίας και ανευρίσκονται τα σημεία που έχουν το μικρότερο περιθώριο ασφάλειας σε κάθε κατάσταση.

Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται όλες οι τάσεις που υπολογίζονται από το πρόγραμμα ενώ στο Σχήμα 4 απεικονίζονται οι τάσεις σε ένα τετράπλευρο έλασμα. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι συμβολισμοί των τάσεων που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα, ενώ στον Πίνακα 3 ο συμβολισμός των παραμέτρων επάρκειας της κατασκευής.

2. Χρήση του προγράμματος

2.1 Γενικά

Στο εδάφιο αυτό, δίνεται μια σύντομη παρουσίαση των ενεργειών που κάνουμε για να αναπτύξουμε το μοντέλο ενός πλοίου, να τρέξουμε το πρόγραμμα και να κάνουμε τους συμβατικούς ελέγχους.

Εφόσον έχουμε επιλέξει το τμήμα της κατασκευής που θα μοντελοποιήσουμε και έχουμε λάβει υπόψη τη συμμετρία του, τις διαστάσεις του και το σύστημα αναφοράς, μπορούμε να προχωρήσουμε στη μοντελοποίησή του ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

2.2 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε συνοπτικά όλα τα βήματα που ακολουθούμε για την μοντελοποίηση και την μελέτη με το *MAESTRO*, έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης να κατανοήσει ευκολότερα την διαδικασία που ακολουθείται και παράλληλα να έχει έναν οδηγό αναφοράς με τις ενέργειες που θα πρέπει να κάνει κάθε φορά. Η σειρά των ενεργειών σύμφωνα με τις ανάγκες του προγράμματος είναι η εξής:

1. Καθορισμός του αρχείου ιδιοτήτων της κατασκευής που πρόκειται να εξετάσουμε. Το αρχείο αυτό πρέπει να έχει προέκταση *~.prp* και περιέχει πληροφορίες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, τα στοιχεία της κατασκευής του (πάχη ελασμάτων, διαστάσεις νομέων και ενισχυτικών κλπ) και μπορεί να δημιουργηθεί εύκολα με τη βοήθεια ενός *editor* σύμφωνα με το ήδη υπάρχον αρχείο *properties.prp* το οποίο βρίσκεται στο *directory* του προγράμματος.
2. Τρέξιμο του προγράμματος *MM*.
3. Φόρτωση του αρχείου των ιδιοτήτων.
4. Καθορισμός των διαστάσεων και των μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν.
5. Καθορισμός των αξόνων του γενικού συστήματος αναφοράς.
6. Καθορισμός του αριθμού και της ισαπόστασης των νομέων.
7. Εισαγωγή των *end points* στα σημεία που έχουμε προκαθορίσει.

8. Εισαγωγή των στρώσεων.
9. Εισαγωγή των ελασμάτων, των νομέων και των ενισχυτικών.
10. Εισαγωγή των σταθμίδων.
11. Εισαγωγή των υπόλοιπων στοιχείων (στύλοι, μπρακέτα κλπ).
12. Ορισμός και εισαγωγή των υπερστοιχείων.
13. Διαγραφές στοιχείων, όπου απαιτούνται και εισαγωγή πρόσθετων κόμβων και στοιχείων.
14. Αποθήκευση του αρχείου (όνομα.mod) που περιέχει τη γεωμετρική απεικόνιση του μοντέλου και δημιουργία του αντίστοιχου αρχείου εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος με προέκταση ~.dat. Αποθήκευση του αρχείου αυτού.
15. Έξοδος από το MM.
16. Εισαγωγή αρχικών παραμέτρων, μονάδων και συντελεστών ασφαλείας μέσω ενός επεξεργαστή κειμένου στο αρχείο ~.dat.
17. Έναρξη του MAESTRO SOLVER.
18. Πρώτο δοκιμαστικό τρέξιμο του αρχείου για τον γραφικό έλεγχο του μοντέλου.
19. Επιστροφή στο MM και φόρτωση του αρχείου ~.mod.
20. Διόρθωση των λαθών που παρατηρήθηκαν προηγουμένως.
21. Καθορισμός και των υπόλοιπων τομέων, εάν υπάρχουν, ακολουθώντας τα ανωτέρω βήματα.
22. Δεύτερο δοκιμαστικό τρέξιμο του αρχείου για να κρίνουμε την επιτυχία της μοντελοποίησης.
23. Σύνδεση των τομέων και καθορισμός των υποκατασκευών, εάν υπάρχουν.
24. Δοκιμαστικό τρέξιμο και διόρθωση των πιθανών λαθών.
25. Σύνδεση των υποκατασκευών και σώσιμο του τελικού αρχείου σε ~.mod και σε ~.dat μορφή.
26. Εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών με τη βοήθεια ενός editor στο αρχείο ~.dat.
27. Εισαγωγή των φορτίων και των καταστάσεων φόρτισης μέσω του editor στο ίδιο αρχείο.
28. Τρέξιμο του αρχείου για τον καθορισμό των αντιδράσεων στους κόμβους που έχουμε εισάγει περιορισμούς.
29. Εισαγωγή της τιμής των αντιδράσεων στους κόμβους ως διατμητικής δύναμης στα άκρα του μοντέλου το οποίο αποτελεί τμήμα μεγαλύτερης κατασκευής. Όμοια εισάγουμε και την τιμή της καμπτικής ροπής στα άκρα εάν είναι γνωστή η διαμήκης κατανομή της.
30. Τελικό τρέξιμο του μοντέλου.
31. Έλεγχος του αρχείου των αποτελεσμάτων για την εμφάνιση μηνυμάτων λαθών και διόρθωση του μοντέλου σύμφωνα με αυτά.
32. Έλεγχος των αντιδράσεων στα σημεία στήριξης, των παραμενουσών τάσεων και της εξισορρόπησης των φορτίων και των αντιδράσεων που ασκούνται στο μοντέλο.
33. Γραφικός - οπτικός έλεγχος του μοντέλου, των παραμορφώσεων και των τάσεων με το πρόγραμμα MG.

34. Έλεγχος των τιμών και των στοιχείων που εμφανίζουν τάσεις αστοχίας και τα οποία δίνονται στο τέλος του αρχείου των αποτελεσμάτων.

2.3 Βήμα προς βήμα διακριτοποίηση της κατασκευής

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί η βήμα προς βήμα διακριτοποίηση με το *MAESTRO Modeler* για να βοηθήσει τον αρχάριο χρήστη του προγράμματος να σχηματίσει μια άμεση εικόνα των λειτουργιών του προγράμματος και παράλληλα να κατανοήσει τα βήματα που ακολουθούνται στην πράξη, για την ολοκλήρωση της μελέτης του.

Αφού αποφασισθεί ποιο τμήμα της κατασκευής θα διακριτοποιηθεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης και το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας, θα προσαρμόσουμε το ήδη υπάρχον αρχείο ιδιοτήτων σύμφωνα με τις ιδιότητες των στοιχείων που συνιστούν το μοντέλο.

Το αρχείο ιδιοτήτων (κατάληξη *~.prp*) περιέχει τις εξής πληροφορίες:

- Υλικά που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο και ιδιότητές τους
- Πάχη των ελασμάτων
- Διαστάσεις διατομών ενισχυτικών
- Διαστάσεις διατομής των νομέων

Η διάταξη των στοιχείων αυτών πρέπει να ακολουθεί αυτή που ακολουθείται στο διατιθέμενο πρότυπο αρχείο, μια εκτύπωση του οποίου παρατίθεται στο τέλος του παρόντος. Εφόσον εισάγονται στο αρχείο αυτό όλα τα απαραίτητα στοιχεία της κατασκευής, κατά τη διακριτοποίηση ο χρήστης ανατρέπει αυτόματα σε αυτό και λαμβάνονται όσα χρειάζονται κάθε στιγμή.

Εκκίνηση του MM

Πηγαίνουμε στο *Directory* του *MAESTRO* και πληκτρολογούμε *MM71* για εισαγωγή στο *MM*. Η οθόνη εμφανίζει τις εξής επιλογές: *MODULES*, *STRUCTURE*, *GENERAL JOB DATA*, *EXIT*. (Τα *GEN. JOB DATA* θα εισαχθούν αργότερα μέσω ενός editor στο αρχείο που θα δημιουργήσουμε με το *MM*.)

Επιλέγοντας *MODULES* στην επάνω γραμμή της οθόνης εμφανίζονται πλήκτρα με βασικές λειτουργίες για τη δημιουργία και την επεξεργασία του αρχείου (*SAVE*, *LOAD*, *CREATE MIRROR*, *NEW*, *EXIT* κλπ.) και στη δεξιά στήλη της οθόνης εμφανίζονται πλήκτρα που κάθε ένα αντιστοιχεί στην εισαγωγή κάποιου στοιχείου και των ιδιοτήτων του ή στην εισαγωγή άλλων δεδομένων. Η κάτω δεξιά στήλη περιλαμβάνει λειτουργίες και ευκολίες του προγράμματος π.χ. *VIEW*, *ZOOM*, *RECOVER*, *WIRE*, *FILL*, *HIDDEN*, *MORE* κλπ.

Αρχικά φορτώνουμε το αρχείο των ιδιοτήτων που έχουμε δημιουργήσει πατώντας στο *LOAD PROP*. της αρχικής οθόνης που αντιστοιχεί στο πλήκτρο *FILES* και πατώντας *ACCEPT* λαμβάνουμε μήνυμα εάν φορτώθηκε σωστά το αρχείο. Αργότερα θα επιστρέψουμε στην οθόνη *FILES* όταν προχωρήσουμε αρκετά με την διακριτοποίηση.

Προχωρούμε στη δεύτερη οθόνη *GEN. MODULE* (καλό είναι να ακολουθούμε τη σειρά με την οποία εμφανίζονται τα πλήκτρα). Δίνουμε τον αριθμό των επιθυμητών *sections* που θέλουμε να έχει το μοντέλο, στο πλήκτρο *#SECT* (η τιμή αυτή αρχικά είναι 10) και την ισαπόστασή τους στο πλήκτρο *SECT.LEN*. Εάν δεν θέλουμε ισαπόσταση πατάμε με το ποντίκι επάνω στο πλήκτρο *SECT.LEN*. και εμφανίζονται πλήκτρα με το επιθυμητό μήκος κάθε νομέα. Το πλήκτρο *LEN.CYL*. αναφέρεται σε *module* που περιέχει κυλίνδρους, οπότε το θέτουμε ίσο με το μηδέν.

Τα πλήκτρα *FRM.REF* & *FRM.OPP* έχουν εξ' ορισμού τιμές *NO* και *YES* που σημαίνει ότι στο σημείο αναφοράς (*reference point*) δεν θα υπάρχει νομέας ενώ στο αντίθετο σημείο (*opposite point*) θα υπάρχει. Αναφορά σχετική με το θέμα αυτό γίνεται και στην Παρατήρηση 8 της επόμενης ενότητας. Στην περίπτωση κατά την οποία μελετάμε ένα μεμονωμένο τομέα δηλώνουμε *Yes* και στις δύο επιλογές.

Το πλήκτρο *EFF.BRED* είναι η εξ' ορισμού τιμή του ισοδύναμου πλάτους ελάσματος που συνεργάζεται με το αντίστοιχο ενισχυτικό για όλα τα στοιχεία του μοντέλου εκτός εάν καθοριστεί αργότερα (στον ορισμό των στρώσεων) διαφορετικά. Αφήνουμε την αρχική τιμή του 1.

Το πλήκτρο *MAX B_s/T* εισάγει το λόγο του μέγιστου πλάτους προς το πάχος για το πέγμα των δοκών, παράμετρος που επιδρά στην αντοχή του ελάσματος λαμβάνοντας υπόψη την ελάττωση της αποδοτικότητάς του εξαιτίας του λυγισμού. Μια συντηρητική τιμή του λόγου αυτού είναι η τιμή 56. Εάν δεν καθορίσουμε τιμή το πρόγραμμα θέτει την τιμή 1000 που δεν έχει καμιά επίδραση.

Το πλήκτρο *REF.PL.X* θέτει την *X* συντεταγμένη στο *reference plane* (*section 0*). Η τιμή αυτή είναι εξ' ορισμού ίση με το μηδέν.

EVAL.LVL: καθορίζουμε το γενικό επίπεδο εκτίμησης των αποτελεσμάτων που θέλουμε να πάρουμε από το πρόγραμμα. Η τιμή που εισάγουμε εδώ ισχύει για όλα τα στοιχεία εκτός και εάν δηλωθεί διαφορετικά σε κάποιο απ' αυτά. Θέτοντας -1 δεν παίρνουμε τάσεις από το πρόγραμμα παρά μόνο μετατοπίσεις. Με 3 μπορούμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως τα αποτελέσματα που μπορεί να εξάγει το πρόγραμμα.

SEC/BAY: Η εξ' ορισμού τιμή της μεταβλητής αυτής είναι 1. Καθορίζεται ανάλογα με το πόσα πλαίσια (*panels*) θέλουμε να έχουμε μεταξύ δύο διαδοχικών νομέων.

JOIN TOL 1 & 2: ποσοστό της απόστασης των νομέων για την αυτόματη σύνδεση κόμβων μεταξύ τομέων ή υποκατασκευών που βρίσκονται μέσα στα ανωτέρω όρια. Αφήνουμε τις αρχικές τους τιμές.

Μετά την εισαγωγή των γενικών ιδιοτήτων του μοντέλου προχωράμε στον καθορισμό των στοιχείων που το αποτελούν. Για την εισαγωγή των στοιχείων είναι απαραίτητοι οι κόμβοι που θα αποτελέσουν το πλέγμα πάνω στο οποίο θα εισαχθούν τα πεπερασμένα στοιχεία. Οι κόμβοι θα πρέπει να υπάρχουν σε κάθε

θέση όπου θα πρέπει να εισαχθεί στοιχείο , φορτίο ή οριακές συνθήκες. Επίσης σε κάθε σημείο που έχουμε αλλαγή της γεωμετρίας της κατασκευής και όπου αλλού κρίνει ο μελετητής ότι χρειάζεται. Οι κόμβοι καθορίζονται από την επιλογή **ENDPOINTS**.

Με το πλήκτρο **COORD**, επιλέγουμε το είδος των συντεταγμένων που θα χρησιμοποιήσουμε στον καθορισμό των ακραίων σημείων. Μπορούμε να επιλέξουμε καρτεσιανές (ορθογωνικές) ή πολικές συντεταγμένες. Διαλέγουμε ορθογωνικές και προχωράμε στον αύξοντα αριθμό των σημείων που εισάγουμε δίνοντας για κάθε ένα από αυτά τις συντεταγμένες Y_{ref} και Z_{ref} (όπου Y είναι ο κατακόρυφος και Z ο οριζόντιος άξονας της κατασκευής). Η απόσταση κατά τον άξονα X καθορίστηκε από την απόσταση των νομέων που είχαμε ορίσει στην προηγούμενη εντολή. Πατώντας **ENTER** οι τιμές των Y , Z εισάγονται αυτόματα και στους κόμβους του αντίθετου άκρου του μοντέλου. Στην περίπτωση που θέλουμε το αντίθετο άκρο του μοντέλου να έχει διαφορετική μορφή από το άκρο που καθορίσαμε (π.χ. να συγκλίνει ή να αποκλίνει) τότε θα πρέπει να καθορίσουμε εκ νέου και τις συντεταγμένες Y_{opp} και Z_{opp} .

Τα πλήκτρα **DX.OPP** και **DX.REF** τα ενεργοποιούμε όταν θέλουμε να δηλώσουμε ότι κάποιος κόμβος βρίσκεται έξω από το εγκάρσιο επίπεδο της τομής που ορίζουν οι άλλοι κόμβοι και το οποίο καθορίζει την πρώτη τομή του μοντέλου (Section 0).

Η εισαγωγή των σημείων που ορίζουμε επικυρώνεται με το πλήκτρο **CREATE**, ενώ κάποια αλλαγή ή διαγραφή κόμβου με τα πλήκτρα **MODIFY** και **DELETE**. Τα τρία αυτά πλήκτρα εμφανίζονται σε όλα τα στοιχεία που περιέχει το πρόγραμμα.

Επίσης, όταν πατήσουμε με το ποντίκι τον αύξοντα αριθμό του στοιχείου που θέλουμε να εισάγουμε, θα εμφανιστεί ο αμέσως επόμενος αριθμός που πρέπει να εισαχθεί, ενώ εισάγοντας κάποιον από τους ήδη υπάρχοντες θα εμφανισθούν οι ιδιότητες του στοιχείου ή κόμβου που αντιστοιχεί στον αριθμό αυτό.

Εάν θέλουμε να εισάγουμε κάποιους κόμβους ανεξάρτητους από την διατομή αναφοράς, στους οποίους δεν θα συνδεθούν strakes αλλά κάποια άλλα μεμονωμένα στοιχεία (όπως πρόσθετες δοκούς - additional beams και πρόσθετα ελάσματα - additional plates), αυτοί μπορούν να εισαχθούν κάνοντας χρήση της λειτουργίας **ADD.NODES** στην οποία πρέπει να εισαχθούν και οι τρεις συντεταγμένες τους (X , Y , Z). Τέτοιοι κόμβοι χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε να μοντελοποιήσουμε περιορισμένα τμήματα που διαφέρουν από την κανονικότητα της κατασκευής στην οποία και εστιάζεται η χρήση του προγράμματος.

Μετά τον καθορισμό των κόμβων σειρά έχουν τα διάφορα στοιχεία που θα αποτελέσουν το μοντέλο, με κυριότερες τις στρώσεις. Πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο εισερχόμαστε στη οθόνη της στρώσης η οποία έχει τρεις σειρές με λειτουργίες. Στην πρώτη σειρά καθορίζονται οι ιδιότητες της στρώσης, στη δεύτερη σειρά βρίσκονται οι λειτουργίες που αφορούν τα ενισχυμένα ελάσματα που συνδέονται στη στρώση και στην τρίτη σειρά τα πλήκτρα για την εισαγωγή των ιδιοτήτων των νομέων.

Ακολουθώντας τη σειρά με την οποία εμφανίζονται τα πλήκτρα της πρώτης σειράς καθορίζουμε αρχικά το είδος της στρώσης που διακριτοποιούμε, τη λει-

τουργία TYPE στην οποία μπορούμε να δηλώσουμε τη στρώση ως BOTTOM, SIDE, DECK, OTHER, ανάλογα εάν θέλουμε να καθοριστεί αυτόματα καθώς και το υδροστατικό φορτίο που ασκείται στη στρώση όπως θα δηλώσουνε στον καθορισμό των φορτίων.

Στη συνέχεια εισάγουμε τον αύξοντα αριθμό της στρώσης στη θυρίδα N° και μετά τα σημεία στα οποία βρίσκεται EP1 και EP2. Προσοχή πρέπει να δοθεί στον καθορισμό των σημείων 1 και 2 γιατί μόνο στο σημείο 1 μπορεί να συνδεθεί και να ληφθεί υπόψη το συνεργαζόμενο πλάτος του ελάσματος στη δοκό. Οι άξονες του στοιχείου δείχνουν από το 1 στο 2 και πάντα παράλληλα στο YZ.

ELM.TYPE: είναι το είδος του ελάσματος που έχει το strake. Συνήθως είναι QL4, που είναι το έλασμα που έχει αξονοκαμπτική ακαμψία. Άλλες δυνατότητες που υπάρχουν είναι η εισαγωγή των στοιχείων MEMbrane, ALTernative, SEC, DUP, GAP, SH κλπ ανάλογα με τις ιδιότητες και τις ευκολίες που μας προσφέρει το καθένα στην κατασκευή. Εκτός του QL4, στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήσαμε τα SEC και ALT για δοκούς χωρίς συνεργαζόμενο έλασμα και για την εισαγωγή εναλλακτικών νομέων αντίστοιχα. Σχετικά με τα δύο τελευταία στοιχεία γίνεται αναφορά και στην επόμενη ενότητα.

MAT: Εμφανίζει έναν κατάλογο με τα υλικά που έχουμε προσθέσει στο αρχείο ιδιοτήτων και από την οποία επιλέγουμε το υλικό του ελάσματος της στρώσης.

THICK: Κατάλογος παχών των ελασμάτων της κατασκευής που έχουμε εισάγει στο αρχείο ιδιοτήτων. Επιλογή του κατάλληλου πάχους ελάσματος.

R.REF.-H.REF: παράμετρος που καθορίζει εάν η στρώση είναι επίπεδη ή όχι, ώστε να κάνει τους κατάλληλους υπολογισμούς για τη φόρτίσή του και τον υπολογισμό των υδροστατικών φορτίων. Εάν είναι επίπεδο αφήνουμε την τιμή μηδέν. Όπως όμως και να ορίσουμε το strake στο μοντέλο θα φαίνεται επίπεδο.

%BM.E1-E2: παράμετροι που καθορίζουν το ποσοστό του φορτίου και της καμπτικής ροπής που παραλαμβάνει κάθε κόμβος της στρώσης. Μπορούμε να δηλώσουμε να μην παραλαμβάνεται και ισομοιράζεται όλο το φορτίο στους κόμβους αλλά ένα μέρος του κατά τρόπο ώστε να παραλαμβάνεται μεγαλύτερο ποσοστό του από την κατασκευή που βρίσκεται συνδεδεμένη στο ένα άκρο του απ' ότι στο άλλο. Εάν δεν εξετάζουμε κάποια εξειδικευμένη περίπτωση θεωρούμε την τιμή τους μηδέν.

END.EFF: δείχνει το βαθμό που τα ενισχυτικά των ελασμάτων είναι ικανά να μεταφέρουν την καμπτική ροπή του module ώστε να υπολογιστεί στον τύπο της ροπής αδρανείας της διατομής. Οι επιλογές που υπάρχουν ανάλογα με το εάν συνυπολογίζεται η αποδοτικότητα του στα άκρα του τομέα είναι: BOTH, NONE, REF.END, OPP.END. Στην περίπτωση που εκτείνονται σε όλο το μήκος του τομέα επιλέγουμε BOTH.

SEC/BAY: καθορίστηκε για όλο το module στην οθόνη του GEN.MODULE. Εάν θέλουμε να το μεταβάλουμε σε κάποιο ή κάποια strake μπορεί να γίνει με την παράμετρο αυτή. Συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή 1.

EVAL.LEV: όμοια καθορίστηκε ανωτέρω αλλά μπορεί να προσαρμοστεί σε κάθε strake ανάλογα με την μελέτη και το ενδιαφέρον που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στο εκάστοτε σημείο. Θεωρώντας την τιμή 3 παίρνουμε την μέγιστη δυνατή ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στη δεύτερη σειρά της οθόνης των STRAKE καθορίζονται οι ιδιότητες των ενισχυτικών των ελασμάτων των στρώσεων.

ORIENT: L ή T για διαμήκη ή εγκάρσια ενισχυτικά αντίστοιχα.

#INT ή BBS: ο αριθμός των ενισχυτικών που θα τοποθετηθούν στο έλασμα ή το πλάτος που θέλουμε να έχουν μεταξύ τους τα ενισχυτικά. Αρκεί να εισαχθεί μία από τις δύο τιμές.

#EDGE: παράμετρος που καθορίζει εάν θα υπάρχει ενισχυτικό στην άκρη ή στις άκρες του ελάσματος. Μόνο για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα.

MAT: επιλογή υλικού των ενισχυτικών από τον κατάλογο των ιδιοτήτων που έχουμε εισάγει.

CROSS: επιλογή του σχήματος της διατομής των ενισχυτικών. Διαθέσιμες διατομές: TEE, BAR, BULB, ANGLE, ZEE, HAT(closed). Επιλέγοντας μια από τις υπάρχουσες διατομές αρκεί να εισαχθούν οι διαστάσεις του κορμού και του πέλματος της διατομής. Σε περίπτωση που θέλουμε να μοντελοποιήσουμε κάποια διατομή εκτός των ήδη υπαρχόντων, θα πρέπει να την εισάγουμε με την εντολή PILLAR, οπότε και θα πρέπει να καθορίσουμε το εμβαδόν της και την ροπή αδράνειάς της.

HSW: καθορισμός του ύψους του κορμού του ενισχυτικού. Επιλέγοντας ένα από τα υπάρχοντα στο αρχείο των ιδιοτήτων οι παράμετροι που αναφέρονται στις διαστάσεις των ενισχυτικών συμπληρώνονται αυτόματα.

TSW: καθορισμός του πάχους του κορμού του ενισχυτικού.

BSF, TSF: καθορισμός του πλάτους και του πάχους του πέλματος του ενισχυτικού.

EFF.TRIP: παράμετρος που καθορίζει τον βαθμό πάκτωσης στα άκρα του ενισχυτικού (π.χ. 0.5 για πλήρως πακτωμένα άκρα). Επίσης μπορεί να καθορίσει και τον αριθμό των πλευρικών στηρίξεων που μπορεί να έχει το ενισχυτικό. Η τιμή του είναι συνήθως 1.

Στην τρίτη σειρά της οθόνης του STRAKE καθορίζονται οι ιδιότητες των νομέων που αυτό περιλαμβάνει.

ORIENT: συνήθως επιλέγεται T, εκτός εάν θέλουμε να καθορίσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τον προσανατολισμό του νομέα επάνω στο έλασμα (π.χ. γωνία συγκόλλησης κλπ).

MAT: επιλογή υλικού.

HFW, TFW, BFF, TFF: καθορισμός των διαστάσεων της διατομής του νομέα. Το σχήμα της διατομής είναι συνήθως T, αλλά μπορεί να εισαχθεί και I με την εισαγωγή κατάλληλης παραμέτρου, όπως αναφέρεται στην επόμενη ενότητα.

EF.BRED: παράμετρος που καθορίζει το συνεργαζόμενο πλάτος ελάσματος για τον νομέα αυτόν. Εάν δεν καθορισθεί κάποια τιμή ισχύει η τιμή που είχε εισαχθεί στο GEN.MOD. για ολόκληρο το module. Πατώντας επάνω στο πλήκτρο αυτό εμφανίζεται σειρά επιλογών για τον καθορισμό του συνεργαζόμενου πλάτους που υπολογίζεται με βάση την μέθοδο του SCHADE ή του LLOYD'S (Lloyd's Register of Shipping) ανάλογα με το είδος του φορτίου που ασκείται στον νομέα, κατανεμημένο ή συγκεντρωμένο αντίστοιχα. Οι παράμετροι που περιέχει κάθε επιλογή υπολογίζονται αυτόματα καθορίζοντας μόνο το είδος του φορτίου.

SHR.RED: συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την υστέρηση διάτμησης στον κορμό του νομέα και χρησιμοποιείται για να δώσει μια βελτιωμένη εικόνα της διατμητικής παραμόρφωσης του νομέα. Θεωρώντας την τιμή 1 την αγνοούμε.

Με τον καθορισμό των στρώσεων έχει ολοκληρωθεί το βασικό μοντέλο της κατασκευής. Απομένει πλέον ο καθορισμός των λοιπών κατασκευαστικών στοιχείων που θα περιλαμβάνονται στο μοντέλο έτσι ώστε να επιτύχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στα αποτελέσματα της μελέτης.

Η εισαγωγή των διαμήκων δοκών (σταθμίδων) γίνεται από την εντολή **GIRDER** και για την εισαγωγή των ιδιοτήτων τους ακολουθούνται ενέργειες αντίστοιχες με αυτές των νομέων.

ASS.STR: Δηλώνουμε τον αριθμό της στρώσης που λαμβάνεται από το ζυγό (girder) ως plate flange. Εάν υπάρχει και άλλη στρώση στην άλλη πλευρά της δοκού την αποκαλούμε δεύτερη στρώση (second strake) και ο αριθμός της εισάγεται στη θέση SEC.STR.

ORIENT: καθορίζουμε τον προσανατολισμό της διαμήκου δοκού επάνω στη στρώση. Γωνία 0° για οριζόντιο strake με τη δοκό επάνω και 180° για τη δοκό κάτω από το έλασμα. Αντίστοιχα 90° για κατακόρυφη στρώση με τη δοκό στη δεξιά πλευρά του ελάσματος και 270° στα αριστερά.

SECTION: Επιλογή της διατομής της δοκού. Διατομή ανοικτού ή κλειστού τύπου.

HGW, TGW, BGF, TGF: επιλογή των διαστάσεων από τον κατάλογο του αρχείου ιδιοτήτων.

EF.BRED: επιλογή του συνεργαζόμενου πλάτους ελάσματος, ανάλογα με το είδος του φορτίου. Παρόμοια με την αντίστοιχη εντολή στη στρώση.

SHR.RED: συντελεστής για τον υπολογισμό της υστέρησης διάτμησης του κορμού εάν έχει ανοίγματα. Συνήθως παίρνει την τιμή 1.

ILS: Οι ενδιάμεσες πλευρικές στηρίξεις της δοκού. Συνήθως θέτουμε 0.

END EFF: επίδραση της δοκού στα άκρα του τομέα όπως και στη στρώση.

Τα επόμενα στοιχεία που εισάγουμε είναι τα **SUPERELEMENTS** για τα οποία αρκεί ο καθορισμός ενός από αυτά όσες φορές και εάν υπάρχουν στην κατασκευή.

Με την εμφάνιση της οθόνης του SUPER ELEMENT (S.E.) επιλέγουμε GENERAL και καθορίζουμε τον αύξοντα αριθμό και το όνομά του SE. Με το πλήκτρο FRAMES δηλώνουμε εάν το SE θα αντικαταστήσει το νομέα στην διατομή που θα εισαχθεί ή θα συνυπάρχει με αυτόν.

EVAL.LEV: καθορισμός του είδους των πληροφοριών που παίρνουμε στα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του SE.

SECTION: δηλώνουμε σε ποιες διατομές του μοντέλου θα τοποθετηθούν τα SE.

NODE: εσωτερικοί κόμβοι του SE που καθορίζονται από τον χρήστη και είναι ανεξάρτητοι από τους κόμβους που αποτελούν σημεία αναφοράς του μοντέλου. Απαιτείται η εισαγωγή των Y, Z συντεταγμένων σε μία τομή. Το πρόγραμμα θα τις μεταφέρει και στις υπόλοιπες τομές.

ELEMENTS: εισαγωγή των στοιχείων (ελάσματα και δοκοί) που αποτελούν το SUPER ELEMENT.

JUNCTIONS: Εντολή για τη δημιουργία συνδέσμων των SE με τους νομείς για την αποφυγή στροφής του SE. Καθορίζουμε τον αύξοντα αριθμό του κόμβου του SE ο οποίος θα συνδεθεί με τον αντίστοιχο κόμβο της στρώσης που θα καθορίσουμε.

Η εισαγωγή των στοιχείων που συνήθως αποτελούν κάθε κατασκευή πλοίου ολοκληρώνεται με την εισαγωγή πρόσθετων ελασμάτων και δοκών που βρίσκονται σε θέσεις όπου δεν ακολουθείται η μορφή που καθορίζουν τις στρώσεις.

Στην επιλογή **ADD.BEAM** εισάγουμε τον αύξοντα αριθμό της δοκού και καθορίζουμε τη θέση της με τα σημεία και τις τομές απ' όπου θα ξεκινάει και θα καταλήγει: (EP1, SEC1) και (EP2, SEC2).

REPLACE: δηλώνουμε εάν η πρόσθετη δοκός θα αντικαταστήσει ή θα συνυπάρξει με την κύρια δοκό, εάν υπάρχει, του αντίστοιχου νομέα.

Οι υπόλοιπες εντολές είναι παρόμοιες με αυτές που καθορίστηκαν πιο πάνω.

ADD.PANELS: Μπορούν να εισαχθούν επάνω στις ήδη υπάρχουσες στρώσεις ή να αφαιρεθεί κάποια από αυτές και να δημιουργηθούν νέα ελάσματα στις θέσεις που επιθυμούμε. Η εισαγωγή τους γίνεται αντίστοιχα με αυτή των στρώσεων.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει και άλλα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται σε περισσότερο πολύπλοκες μοντελοποιήσεις που δεν θα εξετασθούν όμως προς το παρόν.

Μετά την εισαγωγή των στοιχείων επιστρέφουμε στην οθόνη **FILES** όπου και αποθηκεύουμε το αρχείο, δίνοντάς του το όνομα που επιθυμούμε, σε μορφή *Όνομα*.MOD. Με το πλήκτρο WRITE.DAT δημιουργούμε το αντίστοιχο αρχείο με προέκταση .DAT το οποίο είναι και το αρχείο των δεδομένων που θα εισαχθούν στο πρόγραμμα επίλυσης. Τέλος επιλέγουμε EXIT για να τερματίσουμε το MAESTRO MODELER.

Μέχρι στιγμής έχουμε εισάγει μόνο τα πεπερασμένα στοιχεία που αποτελούν το μοντέλο. Πρέπει ακόμα να εισαχθούν ορισμένες παράμετροι οι οποίες θα καθορίσουν το είδος της ανάλυσης που θα ακολουθήσει το πρόγραμμα επίλυσης (SOLVER), όπως επίσης οι οριακές συνθήκες και τα φορτία που ασκούνται στο μοντέλο.

Με την βοήθεια ενός επεξεργαστή κειμένου εισάγουμε στο αρχείο *Όνομα*.DAT που δημιουργήσαμε τις ακόλουθες εντολές στην αρχή του:

ANALYSIS: εντολή που καθορίζουμε ότι το πρόγραμμα θα προχωρήσει με την **Ανάλυση** του μοντέλου που ακολουθεί και όχι με τον σχεδιασμό του ή τη βελτιστοποίηση του. Αμέσως μετά στην ίδια σειρά θα ακολουθήσει ένας μη μηδενικός αριθμός, ενώ εάν ακολουθεί το μηδέν τότε το πρόγραμμα θα προχωρήσει σε ένα δοκιμαστικό τρέξιμο του αρχείου χωρίς να είναι απαραίτητη η εισαγωγή των φορτίων και των οριακών συνθηκών. Η τελευταία αυτή λειτουργία είναι πολύ χρήσιμη και πρέπει να ακολουθείται σε τακτά διαστήματα κατά την μοντελοποίηση ώστε να γίνεται έλεγχος της ορθότητας της εισαγωγής των δεδομένων, κάτι που εάν αγνοήσουμε θα είναι πολύ δύσκολο αργότερα να κάνουμε τις απαιτούμενες διορθώσεις. Μετά τον πρώτο αριθμό ακολουθεί ένας δεύτερος, επίσης μη μηδενικός θετικός, ο οποίος δηλώνει στο πρόγραμμα ότι πρέπει να αποθηκεύσει σε ένα αρχείο με προέκταση .DEF τις παραμορφώσεις που προκύπτουν από την ανάλυση για περαιτέρω πιθανή επεξεργασία, ώστε να μην απαιτείται ο εκ νέου υπολογισμός τους από το πρόγραμμα.

Στην επόμενη γραμμή θα εισαχθούν κάποιες άλλες παράμετροι της ανάλυσης που θα δηλώνουν τα εξής:

Ο πρώτος αριθμός θα δηλώνει πόσα και ποια αρχεία θέλει ο μελετητής να δημιουργηθούν για να χρησιμοποιηθούν αργότερα στο πρόγραμμα MAESTRO GRAPHICS. Θέτοντας μηδέν δηλώνουμε ότι δεν απαιτούνται τέτοια αρχεία, ενώ με το 1 θα δημιουργηθούν αρχεία που θα περιλαμβάνουν την γεωμετρία της κατασκευής και τα ασκούμενα φορτία. Όλα τα απαραίτητα αρχεία γραφικών μπορούν να δημιουργηθούν με την παράμετρο 2, η οποία δηλώνει ότι θέλουμε να προκύψουν αρχεία γραφικών που να περιέχουν τη γεωμετρία, τα φορτία, τις παραμορφώσεις, τις τάσεις και τις παραμέτρους επάρκειας της κατασκευής.

Ο δεύτερος αριθμός δηλώνει εάν έχουμε ή όχι θεωρήσει συμμετρία κατά τη μοντελοποίηση της κατασκευής. Με το μηδέν δηλώνουμε ότι δεν έχουμε κάνει χρήση συμμετρίας και ότι έχουμε μοντελοποιήσει ολόκληρη την κατασκευή, ενώ με 1 δηλώνουμε ότι έχουμε χρησιμοποιήσει συμμετρία μόνο για την γεωμετρία της κατασκευής και με το 2 δηλώνουμε ότι έχουμε κάνει χρήση τόσο της γεωμετρικής συμμετρίας όσο και της συμμετρίας στη φόρτιση της κατασκευής. Κατά τη μελέτη πλοίων συνήθως θέτουμε τον αριθμό 2.

Με τον τρίτο αριθμό δηλώνουμε το επίπεδο των αποτελεσμάτων και των ιδιοτήτων των πεπερασμένων στοιχείων που επιθυμούμε να πάρουμε από το πρόγραμμα. Οι βασικές πληροφορίες δίνονται θέτοντας 1 ή 2 εάν έχουμε περισσότερες απαιτήσεις. Ο μέγιστος δυνατός αριθμός πληροφοριών προκύπτει με τον αριθμό 7 που όμως χρησιμοποιείται από έμπειρους χρήστες μια και εμφανίζει πάρα πολλές πληροφορίες οι οποίες είναι πολύ πιθανό να παραπλανήσουν τον αρχάριο χρήστη του προγράμματος.

Με την εντολή **UNITS** εισάγουμε στο πρόγραμμα τις μονάδες που θα χρησιμοποιήσει στους υπολογισμούς (επιτάχυνση βαρύτητας, πυκνότητα υλικών κλπ) και οι οποίες θα πρέπει να έχουν ακολουθηθεί καθ' όλη τη μέχρι τώρα μοντελοποίηση στην εισαγωγή των στοιχείων αλλά και στη συνέχεια για τον καθορισμό των φορτίων.

Τέλος, εισάγουμε τα κριτήρια και τους συντελεστές με τους οποίους καθορίζουμε στο πρόγραμμα πότε θα έχουμε αστοχία της κατασκευής. Για την εισαγωγή των κριτηρίων αυτών το πρόγραμμα παρέχει ορισμένες δυνατότητες σύμφωνα με τις οποίες μπορούμε να κάνουμε χρήση των κριτηρίων νηογνωμόνων, ανάλογα με το είδος του πλοίου που μελετάμε.

Συνηθέστερη επιλογή είναι αυτή της παραμέτρου **CRITERIA DEFAULT** ακολουθούμενη από τους αριθμούς 1.50 και 1.25 που είναι δύο συντελεστές ασφάλειας, ο πρώτος για κατάρρευση κάποιου μέλους της κατασκευής και ο δεύτερος για αστοχία της αποδοτικότητας του (π.χ. τοπική διαρροή).

Δοκιμαστικό τρέξιμο

Έχοντας εισάγει όλες τις απαραίτητες εντολές για τη διακριτοποίηση της κατασκευής θα πρέπει να κάνουμε ένα δοκιμαστικό τρέξιμο του αρχείου για να διαπιστώσουμε την ύπαρξη τυχών λαθών και παραλήψεων ώστε να τα διορ-

θώσουμε. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας στην εντολή ANALYSIS την αντίστοιχη μεταβλητή ίση με μηδέν.

Στο directory του προγράμματος πληκτρολογούμε MAESTRO, εντολή που εκκινεί το MAESTRO SOLVER. Το πρόγραμμα τότε μας ζητάει το όνομα του αρχείου με προέκταση .DAT που έχουμε δημιουργήσει και συνεχίζει με την εκκίνηση του PART1 (ανάλυση της γεωμετρίας του μοντέλου) του προγράμματος. Εάν με τον τερματισμό του δεν εμφανισθούν προειδοποιητικά μηνύματα ή μηνύματα λάθους τότε πρέπει να εκκινήσουμε και το MAESTRO GRAPHICS, πληκτρολογώντας MGDSA ώστε να κάνουμε και έναν γραφικό έλεγχο του μοντέλου. Μόλις εμφανισθεί η αρχική οθόνη του MG εισάγουμε το όνομα του αρχείου στην θέση FILE, MODEL οπότε και εμφανίζεται το μοντέλο της κατασκευής στην οθόνη. Εάν το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο τότε μπορούμε να προχωρήσουμε με την εισαγωγή των οριακών συνθηκών και των φορτίων στο αρχείο .DAT ώστε να ολοκληρώσουμε τη μοντελοποίηση, αλλιώς θα πρέπει να κάνουμε τις απαραίτητες διορθώσεις.

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η χρήση του MM πολλές φορές περιορίζεται στην εισαγωγή των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου και στους κόμβους που αποτελούν το πλέγμα, ενώ η διόρθωση του μοντέλου και η εισαγωγή και ο έλεγχος των λεπτομερειών πρέπει να γίνεται μέσω του επεξεργαστή κειμένου με οδηγό το DPM.

Σε περίπτωση τερματισμού του προγράμματος με λάθη θα πρέπει να ανατρέξουμε στο αρχείο με την προέκταση .OUT στο οποίο βρίσκονται τα αποτελέσματα του προγράμματος υπό την μορφή ASCII αρχείου και να εξετάσουμε σε ποιο σημείο και γιατί, εμφανίζεται το σφάλμα και εάν επεξηγείται να προχωρήσουμε στη διόρθωση του επενεργώντας στις κατάλληλες παραμέτρους των αντίστοιχων εντολών.

Εφόσον ολοκληρωθεί ο έλεγχος μπορούμε να προχωρήσουμε στην εισαγωγή, μέσω του επεξεργαστή κειμένου, των οριακών συνθηκών και της φόρτισης.

Τόσο η εισαγωγή των οριακών συνθηκών όσο και αυτή των φορτίων γίνεται όταν έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση όλης της κατασκευής και έχουν συνδεθεί μεταξύ τους όλα τα modules και οι υποκατασκευές. Η εισαγωγή συνθηκών και φορτίων γίνεται για ολόκληρη την κατασκευή και όχι για κάθε τμήμα της χωριστά.

Η εισαγωγή των οριακών συνθηκών ξεκινάει με την εντολή **BOUNDARY** η οποία καθορίζει ποια είναι οι ακραίοι τομείς που αποτελούν το μοντέλο. Εάν η κατασκευή έχει διακριτοποιηθεί σε όλο της το μήκος δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή της εντολής αυτής εφόσον δεν απαιτείται ο καθορισμός των φορτίων στα άκρα της από τα γειτονικά τμήματα που δεν έχουν διακριτοποιηθεί. Η εντολή αυτή ακολουθείται από τους τέσσερις αριθμούς που ορίζουν την υποκατασκευή και τον τομέα που βρίσκεται στο ένα άκρο και την υποκατασκευή και τον τομέα του άλλου άκρου.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα εισάγει αυτόματα τις απαραίτητες οριακές συνθήκες στο επίπεδο συμμετρίας εάν έχει δηλωθεί έτσι στην εντολή ANALYSIS και στην συνέχεια μέσω της εντολής **RESTRAINT** εισάγουμε τις απαραίτητες οριακές συνθήκες οι οποίες θα περιορίσουν την κίνηση του μοντέλου θεωρώντας

το ως άκαμπτο φορέα. Για κάθε κόμβο που θα περιορίσουμε απαιτείται ξεχωριστή εισαγωγή της εντολής αυτής, η οποία θα ακολουθείται από τον αριθμό της υποκατασκευής στην οποία βρίσκεται ο κόμβος αυτός, τον αριθμό του αντίστοιχου module, τον αριθμό του σημείου αναφοράς και τον αριθμό την τομής που βρίσκεται ο κόμβος. Κατόπιν ακολουθεί ένας εξαψήφιος αριθμός που αναφέρεται σε κάθε βαθμό ελευθερίας του κόμβου και ο οποίος αποτελείται από τον αριθμό 0 εάν ο αντίστοιχος βαθμός ελευθερίας είναι ελεύθερος ή από τον αριθμό 1 εάν είναι περιορισμένος. Η εισαγωγή των οριακών συνθηκών πρέπει να τερματισθεί με την εντολή **END**, ώστε να προχωρήσει ο μελετητής στην εισαγωγή των φορτίων.

Εφόσον ο μελετητής έχει αποφασίσει τα είδη των φορτίων και τις θέσεις που θα πρέπει να τοποθετηθούν, ξεκινάει την εισαγωγή τους στα δεδομένα του μοντέλου μέσω του επεξεργαστή κειμένου.

Αρχικά καθορίζει τις ομάδες των φορτίων που θα ασκηθούν στο μοντέλο και οι οποίες δηλώνονται με την εντολή **LOADSET**, ακολουθούμενη από τον αύξοντα αριθμό και την ονομασία.

Μετά δηλώνει εάν η φόρτιση είναι συμμετρική κατά την εγκάρσια κατεύθυνση με τις παραμέτρους Y ή N και στη συνέχεια εισάγει έναν συντελεστή που καθορίζει την ακρίβεια του ασκούμενου φορτίου (συνήθως τίθεται 1) και τέλος την επίδραση ή όχι του βάρους της κατασκευής κατά την φόρτιση της, που προκύπτει από το γινόμενο της μάζας των στοιχείων που αποτελούν το μοντέλο με την επιτάχυνση της βαρύτητας. Η δυνατότητα αυτή δηλώνεται με τον αριθμό 1. Μπορεί επίσης να εισαχθεί και κάποια άλλη κατεύθυνση του g εάν το επιθυμεί ο μελετητής (π.χ. στην περίπτωση πλοίου υπό κλίση) με τον προσδιορισμό των γωνιών κατά τους δύο άξονες.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός και το είδος των φορτίων που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη ομάδα αρχικά για αυτά που ασκούνται σε ολόκληρο το μοντέλο και στη συνέχεια αυτών που ασκούνται χωριστά σε κάθε τομέα.

Όσον αφορά στα φορτία που ασκούνται σε ολόκληρο το μοντέλο οι εντολές που πρέπει να καθοριστούν είναι:

IMMERSION: εντολή που δηλώνει στο πρόγραμμα να λάβει υπόψη του τα υδροστατικά φορτία που ασκούνται σε όλα τα ελάσματα και στρώσεις που έχουν δηλωθεί ως **SIDE** και **BOTTOM** σε ένα καθορισμένο βύθισμα του πλοίου. Εκτός από το βύθισμα μπορεί να εισαχθεί και η διαγωγή ή η εγκάρσια κλίση που μπορεί να πλεύσει το πλοίο.

Με την εντολή **WAVE** μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πλοίο βρίσκεται σε ψευδο-στατική ισορροπία καθορίζοντας το ύψος του κύματος, το μήκος του και τη γωνία πρόσπτωσης του κυματικού συστήματος.

Στη συνέχεια εισάγονται τα φορτία που ασκούνται χωριστά σε κάθε τομέα ανάλογα με το είδος τους; δηλαδή σημειακά, κατανεμημένα κλπ., και αναφέρονται πόσα φορτία από το κάθε είδος ασκούνται στο μοντέλο.

Για τα σημειακά φορτία αναφέρουμε τον κόμβο και την τομή που βρίσκεται το φορτίο και στη συνέχεια την δύναμη ή την ροπή που ασκείται σε καθένα από τους τρεις άξονες στο σημείο αυτό.

Τα κατανεμημένα φορτία δηλώνονται με την εντολή PRESS, ακολουθούμενη από τον αριθμό της στρώσης στην οποία ασκούνται και από το μέγεθος του φορτίου. Είναι δυνατή η εισαγωγή του φορτίου όχι σε ολόκληρο τη στρώση αλλά σε ένα έλασμα μόνο αυτής ή και σε περισσότερα. Οι δεξαμενές που περιέχουν υγρά μπορούν να δηλωθούν με την εντολή DATUM αντί της PRESS κατά την οποία αρκεί το ύψος της στάθμης του για τον προσδιορισμό της κατάλληλης πίεσης.

Η εισαγωγή των δεδομένων που αποτελούν την κάθε ομάδα φορτίων τερματίζεται με την εντολή END και ακολουθεί ο καθορισμός των συνδυασμών των φορτίων που έχουν ήδη εισαχθεί, ο οποίος γίνεται μέσω της εντολή CASE.

Για κάθε κατάσταση φόρτωσης που θέλουμε να μελετήσουμε εισάγουμε μετά από κάθε εντολή CASE, η οποία ακολουθείται από τον αύξοντα αριθμό και την ονομασία της, τον συντελεστή μεγέθυνσης με τον οποίο θέλουμε να πολλαπλασιασθούν τα φορτία που ορίσαμε προηγουμένως και από τον αριθμό των LOADSETS που την αποτελούν.

Τέλος καθορίζουμε την τιμή της καμπτικής ροπής και της διατμητικής δύναμης που ασκείται στα άκρα του μοντέλου από τις πιθανές γειτονικές κατασκευές καθώς επίσης και τις τιμές της οριζόντιας κάμψης στην οποία μπορεί να υπόκεινται το μοντέλο. Η εισαγωγή των καταστάσεων φόρτισης του μοντέλου τερματίζεται με την εντολή ENLOADS.

Μετά την εισαγωγή και των φορτίων μπορούμε να τρέξουμε το πρόγραμμα για να πάρουμε τα αποτελέσματα τα οποία μπορούμε να ελέγξουμε με το MG. Είναι πιθανό να εμφανισθούν μηνύματα λάθους κατά την λειτουργία του προγράμματος τα οποία κάθε φορά που τερματίζεται το πρόγραμμα θα πρέπει να τα διερευνούμε και να τα διορθώνουμε μέχρι να καταλήξουμε στο σωστό μοντέλο της κατασκευής.

2.3 Διευκρινήσεις στο πρόγραμμα

Κατά την χρήση του προγράμματος παρατηρήθηκε ότι ορισμένες λειτουργίες που αναφέρονταν στο εγχειρίδιο δεν είχαν εφαρμογή στο πρόγραμμα και κάποιες λεπτομέρειες που ήταν διασκορπισμένες μέσα σε αυτό αποδείχθηκαν ιδιαίτερης σημασίας για την σωστή και επιτυχημένη έκβαση της μελέτης. Παρακάτω αναφέρονται τόσο τα σημεία στα οποία υπάρχουν διαφορές από το εγχειρίδιο όσο και ορισμένα άλλα που χρήζουν της προσοχής του μελετητή. Είναι σίγουρο ότι ο επίμονος χρήστης του προγράμματος θα ανακαλύψει και άλλα τέτοια σημεία τα οποία αρχικά θα τον δυσκολέψουν και θα πρέπει να διαθέσει αρκετό από τον χρόνο του και την υπομονή του για να τα ξεπεράσει. Είναι ένα σημείο που εμφανίζεται σχεδόν σε όλα τα αντίστοιχα προγράμματα εάν όχι υπό τη μορφή λαθών σίγουρα υπό τη μορφή λεπτομερειών στις οποίες δεν έχει δοθεί η απαραίτητη προσοχή και διευκρινήσεις.

Η ενότητα αυτή κλείνει με μια αναφορά στην μέθοδο εντοπισμού τους που συνήθως ακολουθείται στις περιπτώσεις αυτές.

Τα σημεία για τα οποία γίνεται λόγος πιο πάνω συνοψίζονται στις ακόλουθες γραμμές:

1. Κατά τη μελέτη ενός μη ενισχυμένου (απλού) ελάσματος πλάκας με το MAESTRO, οι τάσεις που προκύπτουν στα ελάσματα που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίησή του εμφανίζονται σχεδόν μηδενικές σε αντίθεση με τις παραμορφώσεις οι οποίες είναι παραπλήσιες με τις αναμενόμενες (και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο περισσότερα στοιχεία χρησιμοποιούμε για την μοντελοποίηση της). Στην περίπτωση των ενισχυμένων ελασμάτων τόσο οι τάσεις όσο και οι μετατοπίσεις εμφανίζουν τις αναμενόμενες τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι το πρόγραμμα, λαμβάνοντας υπόψη το μειωμένο πλάτος του συνεργαζόμενου με το ενισχυτικό ελάσματος λόγω του φαινομένου της υστέρησης διάτμησης, υπολογίζει τη θέση του ουδέτερου άξονα της διατομής του ενισχυμένου ελάσματος και στη συνέχεια τις τάσεις που ασκούνται τόσο στο έλασμα όσο και στο ενισχυτικό. Όμως όταν δεν υπάρχει ενισχυτικό τότε ο ουδέτερος άξονας συμπίπτει με την αρχή των αξόνων που βρίσκεται στο μέσον του πάχους του ελάσματος, δηλαδή στο σημείο μηδέν με αποτέλεσμα και οι τάσεις να προκύπτουν μηδενικές (ή ανάλογες με το σφάλμα του υπολογιστή). Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται στη μελέτη ενός μεμονωμένου ελάσματος και όχι όταν αυτό αποτελεί τμήμα μιας κατασκευής.
2. Παραμένοντας στην περίπτωση του ελάσματος, ακόμα και αν αυτή αποτελεί μέρος κάποιας ευρύτερης κατασκευής και θέλουμε να το χωρίσουμε σε περισσότερα στοιχεία από όσα μας επιβάλουν οι θέσεις όπου βρίσκονται οι νομείς και τα ενισχυτικά, εμφανίζεται το εξής πρόβλημα: ενώ κατά την απόσταση μεταξύ δύο νομέων (κατά τον άξονα X) μπορούμε να έχουμε περισσότερα του ενός στοιχεία-ελάσματα (δηλώνοντας στην μεταβλητή sections/bay στον ορισμό των στρώσεων τον αντίστοιχο αριθμό των ελασμάτων που επιθυμούμε) κατά την εγκάρσια απόσταση μεταξύ δύο σταθμίδων ή μεταξύ διαμήκους φρακτής και σταθμίδας αυτό δεν είναι εφικτό, ούτε με την αλλαγή κάποιας μεταβλητής αλλά ούτε και με την υποδιαίρεση του τμήματος αυτού σε περισσότερες στρώσεις χωρίς την ύπαρξη ενισχυτικών στις πλευρές τους. Αυτό συμβαίνει διότι το πρόγραμμα τότε λαμβάνει υπόψη του μικρότερο πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος (όχι αυτό μεταξύ των δύο σταθμίδων αλλά αυτό μεταξύ των δύο στρώσεων) με αποτέλεσμα τον υπολογισμό της λανθασμένης ακαμψίας του στοιχείου αυτού. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η εισαγωγή συνεργαζόμενου πλάτους ελάσματος μεγαλύτερου του πραγματικού, αλλά αυτή η λύση είναι χρονοβόρα και συνιστάται να αποφεύγεται εκτός και εάν παίζει καθοριστικό ρόλο στην σωστή αναπαράσταση του πλέγματος των κόμβων. Μια πιο σωστή λύση είναι η χρήση του προγράμματος DSA.
3. Όταν θέλουμε να ασκήσουμε στα άκρα του μοντέλου που έχουμε αναπτύξει την διατμητική δύναμη και την καμπτική ροπή που προκύπτει από την κατανομή τους σε όλο το μήκος του πλοίου, αρκεί να υπολογίσουμε και να ορίσουμε τις δύο αυτές τιμές στο αρχείο εισαγωγής των δεδομένων οπότε το πρόγραμμα κατανέμει τις τιμές αυτές σε όλη την διατομή σε κάθε

άκρο του μοντέλου. Όμως αυτό συμβαίνει μόνο στην περίπτωση όπου το κάθε άκρο του μοντέλου αποτελείται από ένα μόνο τομέα. Εάν στο ένα τουλάχιστον άκρο βρίσκονται δύο ή περισσότεροι τομείς, τότε το πρόγραμμα, επειδή κατατάσσει τους υπολογισμούς του ανεξάρτητα για κάθε τομέα, θα το λάβει υπόψη του μόνο στο ένα από τα δύο με αποτέλεσμα λανθασμένη κατανομή της φόρτισης.

4. Πριν αποφασιστεί η υποδιαίρεση της κατασκευής σε modules και σε υποκατασκευές θα πρέπει να δούμε στην έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιούμε τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό τους που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Π.χ. το πρόβλημα της προηγούμενης παραγράφου θα μπορούσε να λυθεί με την προσθήκη μιας υποκατασκευής ή ενός module στο άκρο του μοντέλου που θα κάλυπτε τα δύο άλλα. Όμως ο αριθμός των υποκατασκευών που μπορούμε να το υποδιαιρέσουμε ίσως να μην επέτρεπε μια τέτοια λύση, με αποτέλεσμα να πρέπει να μοντελοποιηθεί η κατασκευή από την αρχή, ακολουθώντας μια διαφορετική διάταξη στην υποδιαίρεσή της. Η έκδοση του MAESTRO που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη του οχηματαγωγού επέτρεπε τον χωρισμό σε μία μόνο υποκατασκευή που να περιλαμβάνει μέχρι τρία modules. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τα υπόλοιπα στοιχεία του προγράμματος π.χ. στρώσεις, ακραία σημεία κλπ.
5. Με το MAESTRO μπορούμε εύκολα να μοντελοποιήσουμε ενισχυμένα ελάσματα (διαμήκη ή εγκάρσια) κάνοντας χρήση του στοιχείου stiffened panel. Στο στοιχείο αυτό δηλώνουμε τις θέσεις και τον αριθμό των ενισχυτικών που θέλουμε καθώς επίσης το είδος και τις διαστάσεις τους. Το είδος των ενισχυτικών δηλώνεται είτε κατά την μοντελοποίηση με το MM είτε με έναν editor, δίνοντας τον αριθμό που αντιπροσωπεύει το κάθε είδος ενισχυτικού σύμφωνα με το DPM. Τα είδη των ενισχυτικών που μπορούμε να μοντελοποιήσουμε είναι τα εξής (σε παρένθεση ο αριθμός που αντιστοιχεί για μοντελοποίηση με το DPM) : Tee (0), Bar (1), Bulb (2), Angle (3), Zee (4), Hat (closed) (5). Από τις προαναφερθείσες διατομές, εάν δηλώσουμε στο stiffened panel να λάβει υπόψη του ενισχυτικά τύπου bulb(2) τότε το πρόγραμμα σταματάει στο part 4 εμφανίζοντας μήνυμα με την ένδειξη ERROR χωρίς να εξηγεί τις αιτίες του σφάλματος. Το πρόβλημα βέβαια διορθώνεται με αλλαγή του είδους της διατομής διατηρώντας τις ίδιες διαστάσεις εάν αυτό δεν δημιουργεί πρόβλημα στη μοντελοποίηση της κατασκευής. Στα άλλα είδη διατομών δεν παρατηρήθηκε κάποιο πρόβλημα.
6. Το πρόγραμμα παρέχει ορισμένες ευκολίες όσον αφορά στη μοντελοποίηση των strakes. Με την εισαγωγή κάθε στρώσης δηλώνουμε και την περιοχή της κατασκευής όπου αυτό βρίσκεται π.χ. side, bottom, deck, other κλπ. και έτσι το πρόγραμμα μπορεί να επιβάλλει αυτόματα τα φορτία ανάλογα με τη θέση που έχουμε δηλώσει για το καθένα. Έτσι, στις στρώσεις που έχουν δηλωθεί ως *bottom* ασκείται υδροστατική πίεση ανάλογα

με το βύθισμα του πλοίου, στο *side* ασκείται επίσης υδροστατική πίεση μέχρι το ύψος όπου της ισάλου γραμμής ενώ εάν θέλουμε να μην κάνουμε χρήση της ευκολίας αυτής μπορούμε να το δηλώσουμε ως *other*. Δηλώνοντας όμως ένα ενισχυμένο έλασμα ως *bottom* τότε η ροή του προγράμματος σταματάει, βγάζοντας ένα μήνυμα λάθους το οποίο δεν διευκρινίζει από που προέρχεται αλλά παραπέμπει σε υπορουτίνες της FORTRAN που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με το να θεωρήσουμε τις στρώσεις του πυθμένα ως *other* και να επιβάλλουμε ξεχωριστά για το καθένα την υδροστατική πίεση που ασκείται χωρίς να κάνουμε χρήση της εντολής Immersion η οποία επιβάλλει στις βυθισμένες στρώσεις το απαραίτητο φορτίο. Μια εναλλακτική λύση είναι να δηλώσουμε ότι έχουμε και στον πυθμένα *side* οπότε δίνοντας ως ύψος βρεχόμενη επιφάνειας το βύθισμα του πλοίου μπορούμε να κάνουμε χρήση της εντολής Immersion. Επίσης το πρόβλημα δεν εμφανίζεται εάν δεν χρησιμοποιήσουμε ενισχυτικά για τα ελάσματα του πυθμένα.

7. Όταν εισάγουμε στο πρόγραμμα ένα υπερστοιχείο, το πρόγραμμα μπορεί εάν θέλουμε, να το τοποθετήσει σε πολλές ή ακόμα και σε κάθε διατομή του μοντέλου μας εάν το δηλώσουμε και μάλιστα να μεταβάλει και τις διαστάσεις του κάθε φορά ανάλογα με το εάν η τρέχουσα διατομή είναι διαφορετική από την αρχική. Με τον τρόπο αυτόν μπορούμε να μοντελοποιήσουμε εγκάρσιες φρακτές, μεγάλα μπρακέτα, έδρες στον πυθμένα κλπ. Στο πλοίο που μοντελοποιήσαμε είχαμε εισάγει τις έδρες του πυθμένα ως ένα super element και δηλώσαμε στο πρόγραμμα να το θεωρήσει σε κάθε διατομή που υπάρχει ενισχυμένος νομέας. Οι διατομές αυτές ήσαν συνολικά 19. Εισάγοντας όμως τον αριθμό αυτόν στην αντίστοιχη εντολή του προγράμματος, το πρόγραμμα εμφάνιζε μήνυμα λάθους και σταμάταγε την επεξεργασία. Κατόπιν δοκιμών βρέθηκε ότι η μέγιστη τιμή υπερστοιχείων που μπορεί να λάβει υπόψη του είναι 15. Για τα υπόλοιπα αρκεί να εισάγουμε ένα άλλο παρόμοιο στοιχείο με τα ίδια χαρακτηριστικά αλλά με διαφορετικό αύξοντα αριθμό και να το τοποθετήσουμε στις υπόλοιπες θέσεις.
8. Κατά τη σύνδεση δύο τομέων σε μία υποκατασκευή καθώς επίσης και κατά τη σύνδεση δύο υποκατασκευών, θα πρέπει, από τους τομείς που συνδέονται στο ένα να υπάρχει ο ακραίος νομέας, έδρα, φρακτή ή άλλο κατασκευαστικό στοιχείο που αποτελεί μέρος της κατασκευής και βρίσκεται στο όριο του τομέα ενώ στο αντίστοιχο άκρο του άλλου module το ίδιο στοιχείο θα πρέπει να έχει αφαιρεθεί. Επειδή το κάθε module μοντελοποιείται ξεχωριστά από τα υπόλοιπα άσχετα εάν συνδέονται ή όχι, είναι ένα σημείο το οποίο συνήθως διαφεύγει της προσοχής του μελετητή με αποτέλεσμα την εμφάνιση λάθους στη ροή του προγράμματος. Ο καθορισμός του ακραίου νομέα μπορεί να γίνει από το MM στην λειτουργία GEN. MODULE δηλώνοντας NO στο FRM.REF. Ενώ στο αντίστοιχο FRM.REF του module που πρόκειται να συνδεθεί δηλώνουμε Yes.

9. Αντίστοιχα με την προηγούμενη παρατήρηση ένα άλλο σημείο στο οποίο χρειάζεται προσοχή κατά τη διακριτοποίηση (και το οποίο βέβαια δεν εμφανίζει λάθος στη ροή του προγράμματος αλλά στα αποτελέσματά του) είναι κατά την περίπτωση όπου ο μελετητής κάνει χρήση της συμμετρίας της κατασκευής. Τα κατασκευαστικά στοιχεία που συμπίπτουν με το επίπεδο συμμετρίας θα πρέπει να λαμβάνονται με τέτοιες διαστάσεις ώστε κατά την συγκρότηση ολόκληρου του μοντέλου από το πρόγραμμα να εισαχθούν με τις πραγματικές τους διαστάσεις. Παραδείγματος χάριν, εάν ως επίπεδο συμμετρίας της κατασκευής ληφθεί το διάμηκες επίπεδο τότε τα διαμήκη ενισχυτικά και οι διαμήκεις φρακτές που συμπίπτουν με το επίπεδο συμμετρίας θα πρέπει να εισαχθούν με πάχος μισό από το πραγματικό τους αλλιώς κατά τους υπολογισμούς του προγράμματος θα προκύψουν εσφαλμένα αποτελέσματα.
10. Ένα σημείο που χρήζει προσοχής είναι αυτό που αφορά στη σύνδεση των κόμβων που συνδέουν τους τομείς για τη δημιουργία μιας υποκατασκευής καθώς επίσης και τη σύνδεση των υποκατασκευών για τη δημιουργία του τελικού μοντέλου ολόκληρης της κατασκευής. Το πρόγραμμα κάνει χρήση της εντολής AUTOJOIN, βάσει της οποίας συνδέει αυτόματα όσους κόμβους βρίσκονται εντός των προκαθορισμένων ανοχών. Τα όρια αυτά δίνονται ως ποσοστό της απόστασης των νομέων και καθορίζονται στην ενότητα General Information στο Group I του αρχείου εισαγωγής των δεδομένων. Σε περίπτωση που τα σημεία που έχουμε προκαθορίσει είναι εκτός των ανωτέρω ορίων, εμφανίζεται μήνυμα λάθους που προειδοποιεί ότι η σύνδεση των σημείων αυτών δεν έχει γίνει. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να συνδεθούν κάνοντας χρήση της εντολής JOIN καθορίζοντας το ζευγάρι των σημείων που θέλουμε να συνδεθούν ή αλλάζοντας τα όρια που λαμβάνει υπόψη το πρόγραμμα. Τα εξ' ορισμού όρια του προγράμματος είναι 1% και 5% της ισαπόστασης των νομέων για το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα.
11. Το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει δύο στοιχεία για χρήση με τις στρώσεις που ορισμένες φορές μπορεί να φανούν πολύ χρήσιμα κυρίως σε περιπτώσεις στις οποίες η μορφολογία της κατασκευής δεν είναι η αυτή σε όλο το μήκος του πλοίου ή δεν ακολουθεί τις συνήθεις διατάξεις. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν μέρος των στρώσεων και αντικαθιστούν άλλα στοιχεία του (ελάσματα, νομείς) ή προστίθενται στα ήδη υπάρχοντα. Το πρώτο ονομάζεται ALT (Alternate Strake, Alternative transverse frames) και χρησιμοποιείται στην περίπτωση που οι νομείς του πλοίου εναλλάσσονται με νομείς διαφορετικών διαστάσεων είτε κάθε δεύτερο νομέα (π.χ. στη συνημμένη μελέτη του Ο/Γ), είτε κατά άλλη ακολουθία όπως στην περίπτωση της εναλλαγής των απλών νομέων με τους ενισχυμένους είτε και συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Συνδέονται στα ίδια σημεία με τα αρχικά strakes και περιλαμβάνουν μόνο τους εναλλακτικούς νομείς, χωρίς κανένα

άλλο κατασκευαστικό στοιχείο. Το δεύτερο στοιχείο ονομάζεται SEC (Second Flange of Frame Member) και χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να εισάγουμε στην κατασκευή έναν νομέα ή μία δοκό διατομής διπλού ταν (I) που δεν συνδέεται με έλασμα. Συνήθως το πρόγραμμα θεωρεί το έλασμα που συνδέεται με τους νομείς ως το δεύτερο πέλμα του νομέα. Στην περίπτωση όμως που δεν έχουμε έλασμα δεν μπορεί να καθοριστεί το πάχος του δεύτερου πέλματος του νομέα και αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του στοιχείου αυτού. Σε περίπτωση που δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή καμπτικής δοκού αλλά μιας κολώνας που δέχεται μόνο αξονική καταπόνηση μπορεί να εισαχθεί μια ράβδος από την κατηγορία των στοιχείων Pillars.

12. Ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή είναι ο προσανατολισμός των νομέων ή των σταθμίδων ή των ενισχυτικών που βρίσκονται συνδεδεμένα με έλασμα. Δηλαδή να εισαχθούν στην κατάλληλη θέση με την κατάλληλη φορά, κλίση και στη σωστή πλευρά του ελάσματος. Επίσης, ακόμα και στην περίπτωση που ένα strake δεν έχει νομείς είναι απαραίτητος ο προσεκτικός καθορισμός του προσανατολισμού τους διότι από αυτόν εξαρτάται και το πρόσημο των επιβαλλομένων φορτίων. Θετικά λαμβάνονται τα φορτία που δρουν στη μη ενισχυμένη πλευρά του ελάσματος ενώ αρνητικά αυτά που δρουν στην επιφάνεια που υπάρχουν και οι νομείς. Εξ' ορισμού στο MAESTRO ισχύει ότι τα ενισχυτικά σε ένα ενισχυμένο έλασμα βρίσκονται στην ίδια πλευρά με τους νομείς.
13. Κατά την επίλυση του μοντέλου είναι δυνατό να εμφανιστούν προειδοποιητικά μηνύματα για τη μη ακριβή εκτέλεση του προγράμματος. Τα μηνύματα αυτά μπορεί να αφορούν σε λάθη της μοντελοποίησης ή σε ασυνέχειες του μοντέλου, σε ασύνδετα στοιχεία ή ακόμα και σε υπερβολικές διαφορές της τιμής των τάσεων σε γειτονικά στοιχεία κλπ. Παρά το γεγονός ότι δεν αποτελούν σίγουρα εστία λαθών και το πρόγραμμα συνεχίζει κανονικά τη λειτουργία του τα μηνύματα αυτά πρέπει να διερευνώνται και να διορθώνονται γιατί αφενός μεν μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένα αποτελέσματα αφετέρου είναι ικανά, όταν εμφανιστεί μεγάλος αριθμός τους, να διακόψουν τη λειτουργία του προγράμματος χωρίς την αναφορά ότι έχει εντοπιστεί λάθος σε συγκεκριμένο στοιχείο.

Εκτός από τις παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω πλήθος άλλων σημείων θα απασχολήσουν τον χρήστη του προγράμματος και θεωρείται πιθανό να βρεθούν και άλλα σημεία όπου το πρόγραμμα θα σταματάει εμφανίζοντας μηνύματα λάθους χωρίς όμως να διευκρινίζει τις αιτίες τους και τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να διορθωθούν. Στα συνηθέστερα από τα λάθη που γίνονται από τον χρήστη υπάρχει μια αρκετά καλή υποστήριξη από το πρόγραμμα με τις απαραίτητες διευκρινήσεις για τη διόρθωσή τους. Όσον αφορά τώρα στην περίπτωση όπου δεν δίνεται εξήγηση του μηνύματος που εμφανίζεται ή που το πρόγραμμα

σταματάει χωρίς την εμφάνιση κάποιου μηνύματος μπορεί να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία για τον εντοπισμό και τη διόρθωση του μοντέλου.

Πρώτη ενέργεια που πρέπει να γίνει είναι μια γενική επισκόπηση του αρχείου εισαγωγής των δεδομένων για να διαπιστωθεί εάν έχει ακολουθηθεί η σωστή σειρά των ενεργειών που περιγράφονται στο εγχειρίδιο του προγράμματος και ο σωστός τρόπος γραφής των εντολών που έχουν εισαχθεί από τον χρήστη. Προσοχή πρέπει να δοθεί στις εντολές που πρέπει να περιλαμβάνουν παράμετρο ότι σταματάει η λειτουργία τους ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να προχωρήσει στην επεξεργασία της επόμενης. Αφού γίνουν οι ενέργειες αυτές θα πρέπει ο χρήστης να αρχίσει τη διερεύνηση του μοντέλου ώστε να διαπιστώσει το σημείο που βρίσκεται το σφάλμα. Η πιο συνήθης μέθοδος που ακολουθείται είναι η μέθοδος της δοκιμής και απορρίψης (trial and error). Δηλαδή, αρχίζει σταδιακά η αντίστροφη διαδικασία της ανάπτυξης του μοντέλου με συνεχή 'τρεξίματα' του προγράμματος μέχρι να διαπιστωθεί το στοιχείο ή τα στοιχεία που προκαλούν το πρόβλημα. Έτσι, ο χρήστης αρχικά αποσυνθέτει το μοντέλο στις υποκατασκευές που το αποτελούν και τρέχει το πρόγραμμα για κάθε μία χωριστά ώστε να διαπιστώσει σε ποια υποκατασκευή παρουσιάζεται το πρόβλημα. Κατόπιν αποσυνθέτει την υποκατασκευή στα modules που την αποτελούν και προβαίνει στην μελέτη του κάθε ενός ξεχωριστά μέχρι να βρει σε ποιο από αυτά δεν τρέχει το πρόγραμμα.

Εφόσον βρεθεί ότι οι τομείς που έχουν πρόβλημα αρχίζει τη σταδιακή αφαίρεση από αυτούς των στοιχείων που είναι λιγότερο χρήσιμα και βασικά στη δημιουργία του (π.χ. μπρακέτα, υπερστοιχεία κλπ). Εάν το πρόβλημα δεν εντοπιστεί στα στοιχεία αυτά συνεχίζει με την αφαίρεση των ζυγών (girders), των νομέων των ελασμάτων ή των ενισχυτικών που βρίσκονται πάνω στα ελάσματα κλπ. Μόλις διαπιστώσει σε ποιο από τα παραπάνω στοιχεία βρίσκεται το πρόβλημα τότε επιστρέφει στο αρχικό μοντέλο και αφαιρεί από αυτό μόνο τα στοιχεία που βρήκε για να ελέγξει εάν είναι μόνο αυτά που δημιουργούν το πρόβλημα και όχι και ο συνδυασμός τους με κάποια άλλα. Όταν σιγουρευτεί για τον εντοπισμό τους αρχίζει τη διερεύνηση ώστε να δει ποια παράμετρος της συγκεκριμένης κατηγορίας στοιχείων είναι αυτή που εμφανίζει το σφάλμα. Έτσι, αλλάζει είδος ενισχυτικών, όσες παραμέτρους χρησιμεύουν σε εξεζητημένες λειτουργίες και όποιο άλλο στοιχείο κρίνει ότι μπορεί να είναι η αιτία. Τις περισσότερες φορές το στοιχείο αυτό μπορεί να αντικατασταθεί από κάποιο άλλο του προγράμματος αλλιώς θα πρέπει ο μελετητής να προβεί στην εύρεση μια λύσης που να ικανοποιεί το πρόβλημα και να προσαρμόζεται στην κατασκευή.

Η όλη διαδικασία του εντοπισμού και της διόρθωσης των λαθών είναι επίπονη και χρονοβόρα και μάλιστα τόσο πιο δύσκολη όσο περισσότερα πολύπλοκα είναι το μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για τους οποίους συνιστάται ο διαχωρισμός της κατασκευής σε υποκατασκευές και τομείς με όσο το δυνατόν πιο απλό τρόπο ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος τους.

Βιβλιογραφία

1. Τσομπάρη Ι., Καρύδη Π. *Μελέτη καταστρώματος οχηματαγωγού με το πρόγραμμα MAESTRO*. Τεχνική Έκθεση Νο. 4, Ε/Π ΠΑΒΕ 94, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.

2. ακολουθούμε την βήμα προς βήμα μοντελοποίηση τμήματος ενός οχηματαγωγού πλοίου στο οποίο θέλουμε να μελετήσουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται στο κατάστρωμα υπό το βάρος των οχημάτων που μεταφέρει, τόσο κατά την πλεύση του σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Τέλος ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά σε διάφορα σφάλματα του προγράμματος και σε ελλείψεις οι οποίες δεν αναφέρονται στα εγχειρίδιά του ή σε σημαντικές λεπτομέρειες που βρίσκονται διασκορπισμένες και που αποκαλύφθηκαν κατά την επεξεργασία της εφαρμογής αυτής, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο διερευνήθηκαν και αντιμετωπίστηκαν.

Παράρτημα Ε

Λύση της εξίσωσης δοκού-κολόνας με τη μέθοδο της δυναμικής χαλάρωσης

Στο παράρτημα αυτό περιλαμβάνεται ο πηγαίος κώδικας προγράμματος επίλυσης της εξίσωσης δοκού-κολόνας στην ελαστική περιοχή, με τη μέθοδο της δυναμικής χαλάρωσης. Περιλαμβάνεται επίσης και παράδειγμα αρχείου εισόδου για το πρόγραμμα.

```

C  PROGRAM COLUMN
C
C  Description - The large-deflection equations for
C  beam-columns are solved using Dynamic Relaxation for
C  an axially compressed column with rotationally
C  clamped edges.
C
C  Department of Naval Architecture and Marine Engineering,
C  National Technical University of Athens
C
C
C  PROGRAM COLUMN
C  IMPLICIT REAL*4 (A-H,K-Z)
C  INTEGER P1,P,Pfin,Pmax,N,Nmax,Nout,Meshx
C  COMMON/BEAM/Exs(25),Dtsx(25),Dsodx(25),Dtsox(25),Dsdx(25),
C  &Stress,Exm,Ecr,Er,Sr,Sxcr,Axf(25),Axm(25),AxfB(25),Daxfdx(25),
C  &AxfB1(25),Iout,Ks,Ks1,Ks2,Kus,Kus1,Kus2,Energy,Ub,S(25),Us(25),
C  &Vels(25),So(25),Ds,Sp(25),Dus,Usp(25),Velus(25),Dx,Dx1,Dx2,Dx3,
C  &Dx5,Mb,E,Nu,T,L,B,N,Nmax,Nout,P1,Pfin,Pmax,A,PI,Sma,IM,IM11,IM12,
C  &Meshx,Load(100),P,Gu,Gup,Somax,Rs(25),Rus(25),Dudxs(25),Ucr,Iss,
C  &Icl
31  FORMAT(5X,I2,6(1X,G12.5))
C  OPEN(5, file='beamdat.d')
C  OPEN(6, file='beamout1.f')
C  OPEN(7, file='beamout2.f')
C
C  READ(5,*) E,Nu,Ks,Kus,Denfac
C  READ(5,*) T,L,B,Somax,Q
C  READ(5,*) Meshx,P1,Pfin,Pmax,Nmax,Nout
C  READ(5,*) Icl,Iss
C  READ(5,*) Iout,IRD,IRT
C  READ(5,*) (Load(I),I=1,Pmax)
C
C  Initialise arrays, variables and evaluate constants
C
C  CALL INITIAL
C
C
C  L O A D   I N C R E M E N T S
C
C
C  DO 1 P=P1,Pfin
C  Ub=Load(P)*Ucr
C
C  Factorisation of displacements
C
C  IF(P.EQ.1) GO TO 2
C  Gu=Load(P)-Load(P-1)
C  DO 3 I=1,IM11
C  Ds=(S(I)-Sp(I))*Gu/Gup
C  Dus=(Us(I)-Usp(I))*Gu/Gup
C  Sp(I)=S(I)
C  Usp(I)=Us(I)
C  S(I)=S(I)+Ds
3  Us(I)=Us(I)+Dus
C  Gup=Load(P)-Load(P-1)
2  CONTINUE

```

```

C
C
C      Dynamic Relaxation Cycle
C
C      DO 4 N=1,Nmax
C
C      Kinematic relationships, forces and moments
C
C      DO 5 I=2,IM
C      Dudxs(I)=(Us(I)-Us(I-1))/Dx
C      Dsdx(I)=(S(I+1)-S(I-1))*Dx1
C      Exs(I)=Dudxs(I)+Dsdx(I)*(Dsdx(I)/2.0+Dsodx(I))
5      Dtsx(I)=(S(I+1)-2.0*S(I)+S(I-1))*Dx2
C
C      DO 6 I=2,IM
C      Axf(I)=E*A*Exs(I)
6      Axm(I)=-E*Sma*Dtsx(I)
C      IF(Iss.EQ.1) Axm(2)=0.0
C      IF(Iss.EQ.1) Axm(IM)=0.0
C
C      Fictitious densities
C
C      DO 7 I=2,IM
C      AxfB(I)=AxfB1(I)+E*A*Dx3*ABS(Dsdx(I))
C      BGS=Mb+Dx5*ABS(Axf(I))+AxfB(I)*(ABS(Dtsx(I))+ABS(Dtsox(I)))
7      Rs(I)=4.0/BGS
C
C      DO 8 I=2,IM12
C      BGu=(AxfB(I+1)+AxfB(I))*Dx3
8      Rus(I)=4.0/BGu
C
C      Equations of equilibrium
C
C      DO 9 I=2,IM12
C      Daxfdx(I)=(Axf(I+1)-Axf(I))/Dx
C      Velus(I)=Kus2*Velus(I)+Kus1*Rus(I)*Daxfdx(I)*Denfac
9      Us(I)=Us(I)+Velus(I)
C
C      DO 10 I=3,IM12
C      DTMDx=(Axm(I+1)-2.0*Axm(I)+Axm(I-1))*Dx2
C      RsV=DTMDx+Axf(I)*(Dtsx(I)+Dtsox(I))+Q
C      Vels(I)=Vels(I)*Ks2+Ks1*Rs(I)*RsV
10     S(I)=S(I)+Vels(I)
C
C      Displacements on boundaries
C
C      S(1)=S(3)
C      S(IM11)=S(IM12)
C      IF(Iss.EQ.1) S(1)=-S(3)
C      IF(Iss.EQ.1) S(IM11)=-S(IM12)
C
C      Us(1)=2.0*Ub-Us(2)
C      Us(IM)=- (2.0*Ub+Us(IM12))
C
C      Kinetic energy of beam column
C

```

```

      Energy=0.0
      ENS=0.0
      ENus=0.0
      DO 11 I=2, IM12
      ENS=ENS+Vels(I)**2
11    ENus=ENus+Velus(I)**2
      Energy=(ENS+ENus)*B*L*T/2.0
C
C      OUTPUT SUBROUTINE
C
      IF(N.EQ.N/10*10) WRITE(0,99)
      N,S(IM/2+1),Vels(IM/2+1),Energy
99    FORMAT(2X,I5,2X,'S ',G12.5,2X,'Vels ',G12.5,2X,'E ',G12.5)

      IF(Iout.EQ.1) CALL OUTPUT
C
C      _____
C
4    CONTINUE
C
C      Results from current load increment
C
      Smax=S(IM/2+1)
      DR=(S(IM/2+1)+So(IM/2+1))/T
      Stress=0.0
      Stress=-Axf(2)/A
      Stress=Stress*1.0E-06
      Exm=2.0*Ub/L
      Er=Exm/Ecr
      Sr=Stress/Sxcr
      PRINT
      31,P,Smax,Us(IM/2+1),Vels(IM/2+1),Velus(IM/2+1),Energy
      WRITE(7,31) P,Stress,Smax,Exm,Sr,Er,DR
1    CONTINUE
      STOP
      END

```

SUBROUTINE INITIAL

C

```

IMPLICIT REAL*4 (A-H,K-Z)
INTEGER P1,P,Pfin,Pmax,N,Nmax,Nout,Meshx
COMMON/BEAM/ Exs(25),Dtsx(25),Dsodx(25),Dtsox(25),Dsdx(25),
&Stress,Exm,Ecr,Er,Sr,Sxcr,Axf(25),Axm(25),AxfB(25),Daxfdx(25),
&AxfB1(25),Iout,Ks,Ks1,Ks2,Kus,Kus1,Kus2,Energy,Ub,S(25),Us(25),
&Vels(25),So(25),Ds,Sp(25),Dus,Usp(25),Velus(25),Dx,Dx1,Dx2,Dx3,
&Dx5,Mb,E,Nu,T,L,B,N,Nmax,Nout,P1,Pfin,Pmax,A,PI,Sma,IM,IM11,IM1
&2,Meshx,Load(100),P,Gu,Gup,Somax,Rs(25),Rus(25),Dudxs(25),Ucr,I
&ss,Icl
IM=Meshx+2
IM11=IM+1
IM12=IM-1

```

C

```

DO 1 I=1,25
So(I)=0.0
Dsodx(I)=0.0
Dtsox(I)=0.0
Dsdx(I)=0.0
Dtsx(I)=0.0
Axf(I)=0.0
Daxfdx(I)=0.0
Axm(I)=0.0
AxfB(I)=0.0
AxfB1(I)=0.0
Rs(I)=0.0
Rus(I)=0.0
Us(I)=0.0
Velus(I)=0.0
S(I)=0.0
Sp(I)=0.0
Usp(I)=0.0
Dudxs(I)=0.0
Exs(I)=0.0
1 Vels(I)=0.0

```

C

```

BGS=0.0
Stress=0.0
Exm=0.0
Sr=0.0
DR=0.0
Ds=0.0
Dus=0.0
Gu=0.0
Gup=Load(1)

```

C

```

A=B*T
Sma=T*(B**3)/12.0
Kus1=1.0/(1.0+Kus/2.0)
Kus2=Kus1*(1.0-Kus/2.0)
Ks1=1.0/(1.0+Ks/2.0)
Ks2=Ks1*(1.0-Ks/2.0)
PI=ACOS(-1.0)
Sxcr=4.0E-06*PI**2*E*Sma/(A*L**2)
IF(Iss.EQ.1) Sxcr=Sxcr/4.0
Ecr=Sxcr*1.0E+06/E

```

```

      Ucr=L*Ecr/2.0
      Dx=L/FL0AT(Meshx)
      Dx1=0.5/Dx
      Dx2=1.0/(Dx*Dx)
      Dx3=1.0/Dx
      Dx5=4.0*Dx2
C
      DO 2 I=3, IM12
2      So(I)=Somax*SIN(PI*Dx*(I-2)/L)
      So(1)=So(3)
      So(IM11)=So(IM12)
      IF(Iss.EQ.1) So(1)=-So(3)
      IF(Iss.EQ.1) So(IM11)=-So(IM12)
      DO 3 I=2, IM
3      Dsodx(I)=(So(I+1)-So(I-1))*Dx1
      Dtsox(I)=(So(I+1)-2.0*So(I)+So(I-1))*Dx2
C
      DO 4 I=2, IM
4      Ax fB1(I)=E*A*Dx3*(2.0+ABS(Dsodx(I)))
      Mb=16.0*E*Sma*Dx2**2
      RETURN
      END

```

SUBROUTINE OUTPUT

C

```

      IMPLICIT REAL*4 (A-H,K-Z)
      INTEGER P1,P,Pfin,Pmax,N,Nmax,Nout,Meshx
      COMMON/BEAM/ Exs(25),Dtsx(25),Dsodx(25),Dtsox(25),Dsdx(25),
      &Stress,Exm,Ecr,Er,Sr,Sxcr,Axf(25),Axm(25),AxfB(25),Daxfdx(25),
      &AxfB1(25),Iout,Ks,Ks1,Ks2,Kus,Kus1,Kus2,Energy,Ub,S(25),Us(25),
      &Vels(25),So(25),Ds,Sp(25),Dus,Usp(25),Velus(25),Dx,Dx1,Dx2,Dx3,
      &Dx5,Mb,E,Nu,T,L,B,N,Nmax,Nout,P1,Pfin,Pmax,A,PI,Sma,IM,IM11,IM1
      &2,Meshx,Load(100),P,Gu,Gup,Somax,Rs(25),Rus(25),Dudxs(25),Ucr,I
      &ss,Ic1

```

C

```

  9  FORMAT(1H1)
 10  FORMAT(1H1,26(/))
 11  FORMAT(40X,27(' '))
 12  FORMAT(40X,'*',51X,'*')
 13  FORMAT(40X,
  &'*          L A R G E   -   D E F L E C T I O N          *')
 14  FORMAT(40X,
  &'*          E L A S T I C   A N A L Y S I S   O F   A          *')
 15  FORMAT(40X,
  &'*          R E C T A N G U L A R   B E A M   C O L U M N          *')
 20  FORMAT(1H1,10(/),23X,'Material Properties',38X,
  &'Geometrical Particulars')
 21  FORMAT(23X,20(''),38X,24(''))
 22  FORMAT(///,15X,'Youngs Modulus E = ',G12.5,' N/m2',26X,
  &'Length a = ',G12.5,' m')
 23  FORMAT(78X,'Breadth b = ',G12.5,' m')
 24  FORMAT(15X,'Poissons Ratio Nu = ',G12.5,28X,'Thickness t = ',
  &G12.5,' m')
 25  FORMAT(/,15X,'Number of iterations = ',I4,32X,
  &'No. of intervals = ',I2)
 26  FORMAT(/,15X,'Imposed displacement Ub = ',G12.5,1X,'m')
 31  FORMAT(/)
 32  FORMAT(/,15X,'Ks = ',F6.3)
 35  FORMAT(15X,'Kus= ',F6.3,50X,'Boundary conditions',/)
 33  FORMAT(9(2X,G12.5))
 34  FORMAT(1H1,4(/),22X,'Load Increment No.',2X,I2,20X,'P/Pcr =
  &',G12.5)
 71  FORMAT(75X,'Rotationally Clamped')
 72  FORMAT(75X,'Simply Supported')
 64  FORMAT(/,30X,'L O A D   I N C R E M E N T   N O . ',I2,/,
  &16X,' Deflections',27X,' Velocities',17X,'Energy',/,
  &110(''),/)
 65  FORMAT(5X,I4,2(2X,G12.5),10X,2(2X,G12.5),5X,G12.5)
 67  FORMAT(5(/),43X,' Local transverse initial
  imperfections',/)
 66  FORMAT(7(3X,G12.5))
 68  FORMAT(//,12X,'S',11X,'Us',11X,'Axm',10X,'Axf',12X,'Exs',1
  2X,'Rs',12X,'AxfB',/)

```

C

```

      IF((N.GT.1).OR.(P.GT.1)) GO TO 1
      WRITE(6,10)
      WRITE(6,11)
      WRITE(6,12)
      WRITE(6,13)
      WRITE(6,12)

```

```

WRITE(6,14)
WRITE(6,12)
WRITE(6,15)
WRITE(6,12)
WRITE(6,11)
WRITE(6,20)
WRITE(6,21)
WRITE(6,22) E, L
WRITE(6,23) B
WRITE(6,24) Nu, T
WRITE(6,25) Nmax, Meshx
WRITE(6,26) Ub
WRITE(6,32) Ks
WRITE(6,35) Kus
IF(Icl.EQ.1) WRITE(6,71)
IF(Iss.EQ.1) WRITE(6,72)
WRITE(6,67)
WRITE(6,33) (So(I), I=1,9)
1 IF(N.EQ.1) WRITE(6,9)
  IF(N.EQ.1) WRITE(6,64) P
  IF(N.EQ.N/10*10)WRITE(6,65)N,Us(IM/2),S(IM/2+1),Velus(IM/2),
&Vels(IM/2+1),Energy
  IF(N.NE.N/Nout*Nout) RETURN
  WRITE(6,31)
  WRITE(6,34) P, Load(P)
  WRITE(6,68)
  WRITE(6,66) (S(I),Us(I),Axm(I),Axf(I),Exs(I),Rs(I),AxfB(I),
&I=1, IM11)
  RETURN
END

```

Αρχείο δεδομένων (~.dat)

0.207E+12		0.3		0.035		0.20		0.50	
0.20E-03		0.250		0.020		0.25E-03		0.0	
18		1		1		40		250	250
0		1							
1		0		0					
0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	0.90	0.95	0.96	0.97	0.98
0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.10	1.15	1.20
1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70
1.75	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10	2.15	2.20

Παράρτημα ΣΤ

Πρόγραμμα μητρικής μελέτης κατασκευής *gril3d*

Στο παράρτημα αυτό περιλαμβάνεται ο πηγαίος κώδικας προγράμματος επίλυσης κατασκευών στην ελαστική περιοχή, με τη μητρική μέθοδο (μέθοδο των μετατοπίσεων). Περιλαμβάνονται επίσης παραδείγματα αρχείων εισόδου και αντίστοιχων αποτελεσμάτων το πρόγραμμα.

```

C . . . . .
C
C           Linear Elastic Analysis of a 3-D Grillage
C
C           using the Matrix Stiffness Method
C
C           This program was developed by Dr. P.A. Caridis
C           Department of Naval Architecture and Marine
C           Engineering, NTUA, Athens
C           April 1991.
C
C . . . . .
C
C   - Program gril3d.f can be used to analyse the response
C     of a 3-D structure with up to 100 joints. This
C     corresponds to a rectangular grillage having 8 beams
C     in each direction. Array sizes have to be modified
C     should larger structures be considered.
C   - The properties of each beam are allowed to vary
C     although the geometrical and material particulars are
C     assumed constant between joints.
C
C . . . . . C
C   REAL IZ,IY,K,KMEM,KSS,KS,K11,K12,K21,K22,L,LX,LY,LZ,
C   &LENXZ,LEN1,NU
C   COMMON/real/R(3,3),T(100,12,12),TT(100,12,12),K(12,12
C   &),P(600),D(600),PJNT(100,6),PMG(100,12),KSS(600,600),
C   &KS(600,600),XJC(100),YJC(100),X1(100),Y1(100),X2(100)
C   &,Y2(100),K11(6,6),K12(6,6),K21(6,6),K22(6,6),ANG(100)
C   &,L(100),PROD(12,12),RED(600,600),PML(100,12),BMOM(100
C   &,5),SX(100,5),X(5),DMG(100,12),DML(100,12),KMEM(100,1
C   &2,12),RML(100,12),RMG(100,12),PP(600),PJP(100,6),PFI
C   &X(100,6),RS(600),DMEM(100,5),Z1(100),Z2(100),ZJC(100),
C   &LX(100),LY(100),LZ(100),LENXZ(100),LEN1(100)
C   COMMON/ints/MNO,JNO,ISSNO,ICLNO,LC,NUMSEC,ID(100,6),J
C   &N(100),J1(100),J2(100),ISEC(100),IDLIN(600),JNUM(2),N
C   &DOF,IOUT(100),IYLD(100,5),ISPAC
C   COMMON/mats/ E(100),NU(100),B(100),TP(100),HW(100),TW(
C   &100),BF(100),TF(100),AREA(100),IZ(100),IY(100),TORC(1
C   &00),YZZ(100),RADZ(100),ZZ(100),YYY(100),RADY(100),ZY(
C   &100),UDL(100),YS(100)
C
C . . . . .
C
C   OPEN(5, FILE='gril3.dat')
C   OPEN(6, FILE='gril3.out')
C
C   Initialisations
C

```



```

1  ID(JNT, IDOF)=1
   DO 2 I=1, IOMAX
     READ(5, *) J
2  IOUT(J)=1
   DO 3 IMEM=1, MNO
     DO 3 I=1, 5
3  IYLD(IMEM, I)=0
C
C
C . . . . .
C
C
C   Length and orientation angle of each member
C
   DO 4 I=1, MNO
     J=J1(I)
     X1(I)=XJC(J)
     Y1(I)=YJC(J)
     Z1(I)=ZJC(J)
     J=J2(I)
     X2(I)=XJC(J)
     Y2(I)=YJC(J)
4  Z2(I)=ZJC(J)
C
   DO 5 I=1, MNO
     LX(I)=X2(I)-X1(I)
     LY(I)=Y2(I)-Y1(I)
     LZ(I)=Z2(I)-Z1(I)
     XX=LX(I)*LX(I)+LY(I)*LY(I)
     XY=XX+LZ(I)*LZ(I)
     L(I)=SQRT(XY)
     XZ=LX(I)*LX(I)+LZ(I)*LZ(I)
     LENXZ(I)=SQRT(XZ)
     LEN1(I)=L(I)*LENXZ(I)
     IF(ISPAC.EQ.1) GO TO 5
     RATIO=LY(I)/L(I)
     ANG(I)=ASIN(RATIO)
5  CONTINUE
   NDOF=6*JNO
C
C   Geometrical properties of all sections
C
   CALL PROPS
C
C   Echo of input data
C
   CALL INPUT
C
C . . . . .
C

```

```

C      Assemble member stiffness matrices
C
      DO 20 IMEM=1,MNO
      CALL STIF(IMEM,ISEC,E,NU,AREA,L,IZ,IY,TORC,K)
C
C      WRITE(6,39) IMEM
C      WRITE(6,42) (K(I,J),I=1,12),J=1,12)
C
C      Member transformation matrix
C
      CALL ROT(IMEM,ISPAC,ANG,R,T,TT,L,LX,LY,LZ,LEN1,LENXZ)
C
C      -----
C
C      Obtain particular solution with clamped joints for
C      distributed loads
C
      IF(UDL(IMEM).EQ.0.0) GO TO 10
      CALL PARSOL(IMEM)
C
C      Reactions at joints due to UDLs
C
C      a) from member local to member global coords
C
      DO 7 J=1,12
      PMG(IMEM,J)=0.0
      DO 7 I=1,12
7      PMG(IMEM,J)=PMG(IMEM,J)+TT(IMEM,I,J)*PML(IMEM,I)
C
C      b) from member global to joint global loads due to
C      UDLs
C
      JNT1=J1(IMEM)
      JNT2=J2(IMEM)
      DO 8 IDOF=1,6
      PJP(JNT1,IDOF)=PJP(JNT1,IDOF)+PMG(IMEM,IDOF)
      PJP(JNT2,IDOF)=PJP(JNT2,IDOF)+PMG(IMEM,IDOF+6)
      IF(ID(JNT1,IDOF).EQ.1) PFIX(JNT1,IDOF)=PJP(JNT1,IDOF)
      IF(ID(JNT2,IDOF).EQ.1) PFIX(JNT2,IDOF)=PJP(JNT2,IDOF)
      IF(ID(JNT1,IDOF).EQ.1) PJP(JNT1,IDOF)=0.0
8      IF(ID(JNT2,IDOF).EQ.1) PJP(JNT2,IDOF)=0.0
C
C      Column load vector containing reactions to UD loads
C
      DO 9 JNT=1,JNO
      DO 9 IDOF=1,6
      INOD=6*(JNT-1)
      9 PP(INOD+IDOF)=PJP(JNT,IDOF)
10  CONTINUE
C
C      -----

```

```

C
C      Structural load vector including member UDL loads and
C      joint loads
C
      DO 11 JNT=1, JNO
      DO 11 IDOF=1, 6
      INOD=6*(JNT-1)
11    P(INOD+IDOF)=PJNT(JNT, IDOF)-PP(INOD+IDOF)
C
      DO 12 J=1, 12
      DO 12 I=1, 12
12    KMEM(IMEM, I, J)=K(I, J)
C
C      Transform member stiffness matrix to global coordinate
C      system
C
      CALL STIFGL(IMEM)
C
      DO 13 JNT=1, JNO
      DO 13 IDOF=1, 6
      INOD=6*(JNT-1)
13    IDLIN(INOD+IDOF)=ID(JNT, IDOF)
C
C      Partition member stiffness matrix
C
      DO 14 J=1, 6
      DO 14 I=1, 6
      K11(I, J)=K(I, J)
      K12(I, J)=K(I+6, J)
      K21(I, J)=K(I, J+6)
14    K22(I, J)=K(I+6, J+6)
C
C      WRITE(*,101)IMEM
C      PRINT *,IMEM
      IF(IOUT(IMEM).EQ.0) GO TO 15
C      WRITE(6,45) IMEM
C      WRITE(6,44) ((R(I, J), I=1, 3), J=1, 3)
C      WRITE(6,46) IMEM
C      WRITE(6,42) ((T(IMEM, I, J), I=1, 12), J=1, 12)
C      WRITE(6,47) IMEM
C      WRITE(6,42) ((TT(IMEM, I, J), I=1, 12), J=1, 12)
C      WRITE(6,34) IMEM
C      WRITE(6,42) ((K(I, J), I=1, 12), J=1, 12)
C      WRITE(6,35) IMEM
C      WRITE(6,43) ((K11(I, J), I=1, 6), J=1, 6)
C      WRITE(6,36) IMEM
C      WRITE(6,43) ((K12(I, J), I=1, 6), J=1, 6)
C      WRITE(6,37) IMEM
C      WRITE(6,43) ((K21(I, J), I=1, 6), J=1, 6)
C      WRITE(6,38) IMEM

```

```

C      WRITE(6,43) ((K22(I,J),I=1,6),J=1,6)
C
C      Form structural stiffness matrix {K} using the direct
C      stiffness method
C
15     JNUM1=J1(IMEM)
        JF=1+6*(JNUM1-1)
        IF=JF
        DO 16 J=JF,JF+5
            JEL=J-JF+1
            DO 16 I=IF,IF+5
                IEL=I-IF+1
16     KS(I,J)=KS(I,J)+K11(IEL,JEL)
C
        JNUM2=J2(IMEM)
        IF=1+6*(JNUM2-1)
        JF=1+6*(JNUM1-1)
        DO 17 J=1,6
            DO 17 I=1,6
                IS=IF-1+I
                JS=JF-1+J
17     KS(IS,JS)=KS(IS,JS)+K12(I,J)
C
        IF=1+6*(JNUM1-1)
        JF=1+6*(JNUM2-1)
        DO 18 J=1,6
            DO 18 I=1,6
                IS=IF-1+I
                JS=JF-1+J
18     KS(IS,JS)=KS(IS,JS)+K21(I,J)
C
        IF=1+6*(JNUM2-1)
        JF=1+6*(JNUM2-1)
        DO 19 J=1,6
            DO 19 I=1,6
                IS=IF-1+I
                JS=JF-1+J
19     KS(IS,JS)=KS(IS,JS)+K22(I,J)
20     CONTINUE
        WRITE(*,102)
C
        DO 21 J=1,NDOF
            DO 21 I=1,NDOF
21     KSS(I,J)=KS(I,J)
C
C      Obtain reduced structural stiffness matrix
C
        DO 22 J=1,NDOF
            DO 22 I=1,NDOF
                IF((IDLIN(J).EQ.1).AND.(I.EQ.J)) KS(I,J)=1.0
22     IF((IDLIN(J).EQ.1).AND.(I.NE.J)) KS(I,J)=0.0

```

```

C
      DO 23 I=1, NDOF
      DO 23 J=1, NDOF
23    IF((KS(I,I).EQ.0.0).AND.(J.NE.I)) KS(I,J)=0.0
      DO 24 J=1, NDOF
      DO 24 I=1, NDOF
24    RED(I,J)=KS(I,J)
      DO 25 I=1, NDOF
25    IF(IDLIN(J).EQ.1) P(J)=0.0
      WRITE(*,103)
C
C    Solve reduced system of equations using Gauss
C    elimination
C
C    a) Stiffness matrix
C
      DO 26 I=1, NDOF-1
      DO 26 J=1, NDOF
      IF(J.LE.I) GO TO 26
      IF(KS(I,J).EQ.0.0) GO TO 26
      FACTOR=KS(I,J)/KS(I,I)
      KS(I,J)=KS(I,J)-FACTOR*KS(I,I)
      DO 27 M=I+1, NDOF
27    KS(M,J)=KS(M,J)-FACTOR*KS(M,I)
C
C    b) Load vector
C
      P(J)=P(J)-FACTOR*P(I)
26    CONTINUE
      WRITE(*,104)
C
C    Check ill-conditioning of stiffness matrix
C
      ICONT=1
      DO 28 I=1, NDOF
      IF(KS(I,I).LT.0.0) WRITE(*,40) I,KS(I,I)
      IF(KS(I,I).EQ.0.0) ICONT=0
28    IF(KS(I,I).EQ.0.0) WRITE(*,41) I
      IF(ICONT.EQ.0) GO TO 100
C
C    Back-substitute to obtain displacement vector
C
      DO 29 JJ=1, NDOF
      J=NDOF-JJ+1
      SUM=0.0
      DO 30 I=J+1, NDOF
30    SUM=SUM+KS(I,J)*D(I)
29    D(J)=(P(J)-SUM)/KS(J,J)
      WRITE(*,105)
C

```

```

C      Structure load vector {R} (incl. reactions at
C      supports)
C
      DO 31 J=1, NDOF
      RS(J)=0.0
      DO 31 I=1, NDOF
31      RS(J)=RS(J)+KSS(I, J)*D(I)
C
C      Structure load vector {R} including reactions due to
C      UD loads
C
      DO 32 I=1, NDOF
32      RS(I)=RS(I)+PP(I)
      DO 33 JNT=1, JNO
      DO 33 IDOF=1, 6
      INOD=6*(JNT-1)
33      RS(INOD+IDOF)=RS(INOD+IDOF)+PFIX(JNT, IDOF)
C
C      Obtain member load vectors in local coordinates
C
      CALL LOAD
C
C      Output
C
      WRITE(*,106)
      CALL OUT
      GO TO 34
44      FORMAT(3(10X,G12.5))
39      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,' - Stiffness matrix
&{k}',//)
45      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,' - Rotation matrix
&{Ro}',//)
46      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,' - Transformation
&matrix {T}',//)
47      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,' - Transpose of
&Transformation matrix {Tt}',//)
C 34      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,
C      &' - Stiffness matrix {k',1H','}' (= {Tt}{k}{T})',//)
35      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,
&' - Partitioned stiffness matrix {k11',1H','}',//)
36      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,
&' - Partitioned stiffness matrix {k12',1H','}',//)
37      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,
&' - Partitioned stiffness matrix {k21',1H','}',//)
38      FORMAT(//,25X,'Member No. ',I2,
&' - Partitioned stiffness matrix {k22',1H','}',//)
40      FORMAT(//,5X,'*** WARNING - Negative Diagonal Term -
&I = ',I2,5X,'KS = ',G12.5,//)
41      FORMAT(//,5X,'*** WARNING - I = ',I2,5X,
&'Stiffness Matrix Found Indeterminate',
&//,25X,'PROGRAM ABORTS',/)

```

```
42  FORMAT(12(2X,G9.2))
43  FORMAT(6(5X,G12.5))
101  FORMAT(/,5X,'Member stiffness matrix {k} no',I3,'
    &partitioned',/)
102  FORMAT(/,5X,'Structural stiffness matrix {K}
    &assembled',/)
103  FORMAT(5X,'Reduction of {K} accomplished',/)
104  FORMAT(5X,'Upper triangular form of {K} obtained',/)
105  FORMAT(5X,'Displacements at all joints obtained',/)
106  FORMAT(5X,'Reactions at all joints obtained -
    &Solution completed',/)
200  FORMAT(5X,'I = ',I2,2X,'M = ',I2,2X,'J = ',I2,2X,'KS
    &',G12.5)
203  FORMAT(' I = ',I2,' IDOF= ',I2,' RS = ',G12.5)
100  CALL OUT
34   CONTINUE
     STOP
     END
```

```

SUBROUTINE INITL
C
COMMON/real/ VAR1(1138146)
COMMON/mats/ VAR3(2000)
COMMON/ints/ IVAR(2210)
C
C Initialisations
C
DO 1 I=1,1138146
1 VAR1(I)=0.0
DO 3 I=1,2000
3 VAR3(I)=0.0
DO 5 I=1,2210
5 IVAR(I)=0
RETURN
END
SUBROUTINE PROPS
C
REAL IY, IZ, NU
COMMON/mats/ E(100), NU(100), B(100), TP(100), HW(100),
&TW(100), BF(100), TF(100), AREA(100), IZ(100), IY(100), TOR
&C(100), YZZ(100), RADZ(100), ZZ(100), YYY(100), RADY(100),
&ZY(100), UDL(100), YS(100)
COMMON/ints/ MNO, JNO, ISSN0, ICLNO, LC, NUMSEC, ID(100,6), J
&N(100), J1(100), J2(100), ISEC(100), IDLIN(600), JNUM(2), N
&DOF, IOUT(100), IYLD(100,5), ISPAC
C
C Section properties for flat plating and attached
C stiffeners
C
DO 1 I=1, NUMSEC
AP=B(I)*TP(I)
AW=HW(I)*TW(I)
AF=BF(I)*TF(I)
AREA(I)=AP+AW+AF
IF(BF(I).EQ.0.0) TF(I)=0.0
IF(TF(I).EQ.0.0) BF(I)=0.0
C
C Flatbar stiffener
C
IF(BF(I).NE.0.0) GO TO 2
YZZ(I)=(AP*TP(I)/2.0+AW*(TP(I)+HW(I)/2.0))/AREA(I)
CGF1=B(I)/2.0
YYY(I)=(AP+AW)*CGF1/AREA(I)
C
IZ(I)=(B(I)*(TP(I)**3.0)+(HW(I)**3.0)*TW(I))/12.0+
&(HW(I)/2.0+TP(I)-YZZ(I))*2.0+HW(I)*TW(I)+
&B(I)*TP(I)*(YZZ(I)-TP(I)/2.0)**2.0
C
IY(I)=(AP*B(I)*B(I)+AW*TW(I)*TW(I))/12.0+
&AREA(I)*(B(I)-YYY(I))*(B(I)-YYY(I))

```

```

      GO TO 3
C
C      b) T-bar or angle-bar stiffener
C
2  YZZ(I)=(B(I)*(TP(I)**2.0)/2.0+(HW(I)**2.0)*
    &TW(I)/2.0+HW(I)*TP(I)*TW(I)+BF(I)*TF(I)*HW(I)+
    &BF(I)*TF(I)*TP(I)+BF(I)*(TF(I)**2.0)/2.
    &0)/(B(I)*TP(I)+HW(I)*TW(I)+BF(I)*TF(I))
    CGF1=B(I)/2.0
    CGF2=CGF1
    IANG=0
    IF(IANG.EQ.1) CGF2=CGF2+BF(I)/2.0
    YYY(I)=((AP+AW)*CGF1+AF*CGF2)/AREA(I)
C
    IZ(I)=(B(I)*(TP(I)**3.0)+TW(I)*(HW(I)**3.0)+
    &BF(I)*(TF(I)**3.0))/12.0+B(I)*TP(I)*(YZZ(I)-
    &TP(I)/2.0)**2.0+HW(I)*TW(I)*(HW(I)/2.0+TP(I)
    &-YZZ(I))**2.0+BF(I)*TF(I)*(HW(I)+TP(I)+TF(I)/2.0
    &-YZZ(I))**2.
C
    IY(I)=(AP*B(I)*B(I)+AW*TW(I)*TW(I)+AF*BF(I)*
    &BF(I))/12.0+AREA(I)*(B(I)-YYY(I))*(B(I)-YYY(I))
C
3  CONTINUE
C
    RADZ(I)=SQRT(IZ(I)/AREA(I))
    RADY(I)=SQRT(IY(I)/AREA(I))
    ZZ(I)=IZ(I)/YZZ(I)
    ZY(I)=IY(I)/YYY(I)
    TORC1=0.0
    TORC(I)=AP*TP(I)*TP(I)+AW*TW(I)*TW(I)+AF*TF(I)*TF(I)
    TORC(I)=TORC(I)/3.0
1  CONTINUE
C
    RETURN
    END

```

SUBROUTINE PARSOL(IMEM)

C

REAL IZ,IY,K,KMEM,KSS,KS,K11,K12,K21,K22,L,LX,LY,LZ,
&LENXZ,LEN1,NU

COMMON/real/R(3,3),T(100,12,12),TT(100,12,12),K(12,12
&),P(600),D(600),PJNT(100,6),PMG(100,12),KSS(600,600),
&KS(600,600),XJC(100),YJC(100),X1(100),Y1(100),X2(100)
&,Y2(100),K11(6,6),K12(6,6),K21(6,6),K22(6,6),ANG(100)
&,L(100),PROD(12,12),RED(600,600),PML(100,12),BMOM(100
&,5),SX(100,5),X(5),DMG(100,12),DML(100,12),KMEM(100,1
&2,12),RML(100,12),RMG(100,12),PP(600),PJP(100,6),PFI
&X(100,6),RS(600),DMEM(100,5),Z1(100),Z2(100),ZJC(100),
&LX(100),LY(100),LZ(100),LENXZ(100),LEN1(100)

COMMON/ints/MNO,JNO,ISSNO,ICLNO,LC,NUMSEC,ID(100,6),J
&N(100),J1(100),J2(100),ISEC(100),IDLIN(600),JNUM(2),N
&DOF,IOUT(100),IYLD(100,5),ISPAC

COMMON/mats/ E(100),NU(100),B(100),TP(100),HW(100),TW
&(100),BF(100),TF(100),AREA(100),IZ(100),IY(100),TORC(
&100),YZZ(100),RADZ(100),ZZ(100),YYY(100),RADY(100),ZY
&(100),UDL(100),YS(100)

C

C

Reactions pz1, pz2 and moments mz1, mz2 on loaded mem
ber

C

PML(IMEM,3)=-UDL(IMEM)*L(IMEM)/2.0

PML(IMEM,9)=PML(IMEM,3)

C

PML(IMEM,5)=-UDL(IMEM)*L(IMEM)*L(IMEM)/12.0

PML(IMEM,11)=-PML(IMEM,5)

RETURN

END

```

      SUBROUTINE STIF(I, ISEC, E, NU, AREA, L, IZ, IY, TORC, K)
C
      REAL IY, IZ, K, L, L1, L2, L3, NU
      DIMENSION E(100), NU(100), AREA(100), IZ(100), IY(100),
&TORC(100), K(12, 12), L(100), ISEC(100)
C
      IS=ISEC(I)
      L1=1.0/L(IS)
      L2=1.0/(L(IS)*L(IS))
      L3=1.0/(L(IS)*L(IS)*L(IS))
      TORQ=TORC(IS)/(2.0*L(IS)*(1.0+NU(IS)))
C
      DO 1 J1=1, 12
      DO 1 J2=1, 12
1     K(J1, J2)=0.0
C
C     Non-zero upper triangular elements of member stiffness
C     matrix {k}
C
      K(1, 1)  =+AREA(IS)*L1
      K(7, 1)  =-AREA(IS)*L1
      K(2, 2)  =+12.0*IZ(IS)*L3
      K(6, 2)  =+6.0*IZ(IS)*L2
      K(8, 2)  =-12.0*IZ(IS)*L3
      K(12, 2) =+6.0*IZ(IS)*L2
      K(3, 3)  =+12.0*IY(IS)*L3
      K(5, 3)  =-6.0*IY(IS)*L2
      K(9, 3)  =-12.0*IY(IS)*L3
      K(11, 3) =-6.0*IY(IS)*L2
      K(4, 4)  =+TORQ
      K(10, 4) =-TORQ
      K(5, 5)  =+4.0*IY(IS)*L1
      K(9, 5)  =+6.0*IY(IS)*L2
      K(11, 5) =+2.0*IY(IS)*L1
      K(6, 6)  =+4.0*IZ(IS)*L1
      K(8, 6)  =-6.0*IZ(IS)*L2
      K(12, 6) =+2.0*IZ(IS)*L1
      K(7, 7)  =+AREA(IS)*L1
      K(8, 8)  =+12.0*IZ(IS)*L3
      K(12, 8) =-6.0*IZ(IS)*L2
      K(9, 9)  =+12.0*IY(IS)*L3
      K(11, 9) =+6.0*IY(IS)*L2
      K(10, 10)=+TORQ
      K(11, 11)=+4.0*IY(IS)*L1
      K(12, 12)=+4.0*IZ(IS)*L1
C
C     Symmetry about leading diagonal
C
      DO 2 J1=1, 12
      DO 2 I1=1, 12

```

```

      K(I1,J1)=E(IS)*K(I1,J1)
2    IF(J1.GT.I1) K(I1,J1)=K(J1,I1)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE ROT(I,ISPAC,ANG,R,T,TT,L,LX,LY,LZ,
C      LEN1,LENXZ)
C
      REAL L,LX,LY,LZ,LEN1,LENXZ
      DIMENSION T(100,12,12),TT(100,12,12),R(3,3),ANG(100),
&L(100),LX(100),LY(100),LZ(100),LEN1(100),LENXZ(100)
C
C      Rotation Matrix {Ro}
C
      SS=SIN(ANG(I))
      CS=COS(ANG(I))
      ABSS=ABS(SS)
      ABCS=ABS(CS)
      IF(ABSS.LT.0.10E-02) SS=0.0
      IF(ABCS.LT.0.10E-02) CS=0.0
      IF(ISPAC.EQ.1) GO TO 1
C
      R(1,1)=CS
      R(2,1)=SS
      R(1,2)=-SS
      R(2,2)=CS
      R(3,3)=1.0
      GO TO 2
C
1    R(1,1)=LX(I)/L(I)
      R(2,1)=LY(I)/L(I)
      R(3,1)=LZ(I)/L(I)
      R(1,2)=-LX(I)*LY(I)*CS
      R(1,2)=R(1,2)-L(I)*LZ(I)*SS
      R(1,2)=R(1,2)/LEN1(I)
      R(2,2)=LENXZ(I)*CS/L(I)
      R(3,2)=-LY(I)*LZ(I)*CS
      R(3,2)=R(3,2)+L(I)*LX(I)*SS
      R(3,2)=R(3,2)/LEN1(I)
      R(1,3)=LX(I)*LY(I)*SS
      R(1,3)=R(1,3)-L(I)*LZ(I)*CS
      R(1,3)=R(1,3)/LEN1(I)
      R(2,3)=-LENXZ(I)*SS/L(I)
      R(3,3)=LY(I)*LZ(I)*SS
      R(3,3)=R(3,3)+L(I)*LX(I)*CS
      R(3,3)=R(3,3)/LEN1(I)
C
      ISET=0
      IF((LX(I).EQ.0.0).AND.(LZ(I).EQ.0.0)) ISET=1
      IF(ISET.EQ.0) GO TO 3
      R(1,2)=1.0
      R(3,2)=1.0

```

```

        R(1,3)=1.0
        R(3,3)=1.0
3      CONTINUE
C
C      Transformation Matrix {T}
C
2      T(I,1,1)=R(1,1)
        T(I,2,1)=R(2,1)
        T(I,1,2)=R(1,2)
        T(I,2,2)=R(2,2)
        T(I,3,3)=R(3,3)
        T(I,4,4)=R(1,1)
        T(I,5,4)=R(2,1)
        T(I,4,5)=R(1,2)
        T(I,5,5)=R(2,2)
        T(I,6,6)=R(3,3)
        T(I,7,7)=R(1,1)
        T(I,8,7)=R(2,1)
        T(I,7,8)=R(1,2)
        T(I,8,8)=R(2,2)
        T(I,9,9)=R(3,3)
        T(I,10,10)=R(1,1)
        T(I,11,10)=R(2,1)
        T(I,10,11)=R(1,2)
        T(I,11,11)=R(2,2)
        T(I,12,12)=R(3,3)
C
C      Transpose of transformation matrix {Tt}
C
        DO 4 J=1,12
          DO 4 I1=1,12
4         TT(I,I1,J)=T(I,J,I1)
          RETURN
        END

```

SUBROUTINE STIFGL(IMEM)

C

REAL K, KMEM, KSS, KS, K11, K12, K21, K22, L, LX, LY, LZ
C &, LENXZ, LEN1

COMMON/real/R(3,3), T(100,12,12), TT(100,12,12), K(12,12
&), P(600), D(600), PJNT(100,6), PMG(100,12), KSS(600,600),
&KS(600,600), XJC(100), YJC(100), X1(100), Y1(100), X2(100)
&, Y2(100), K11(6,6), K12(6,6), K21(6,6), K22(6,6), ANG(100)
&, L(100), PROD(12,12), RED(600,600), PML(100,12), BMOM(100
&,5), SX(100,5), X(5), DMG(100,12), DML(100,12), KMEM(100,1
&2,12), RML(100,12), RMG(100,12), PP(600), PJP(100,6), PFIX
&(100,6), RS(600), DMEM(100,5), Z1(100), Z2(100), ZJC(100),
&LX(100), LY(100), LZ(100), LENXZ(100), LEN1(100)

C

C

C

Member stiffness matrix in global coordinates {k'}

DO 1 J=1,12
DO 1 I=1,12
SUM=0.0
DO 2 M=1,12
2 SUM=SUM+K(M,J)*T(IMEM,I,M)
PROD(I,J)=SUM
1 CONTINUE
C
DO 3 J=1,12
DO 3 I=1,12
SUM=0.0
DO 4 M=1,12
4 SUM=SUM+TT(IMEM,M,J)*PROD(I,M)
K(I,J)=SUM
3 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE LOAD

C

```
REAL IZ,IY,K,KMEM,KSS,KS,K11,K12,K21,K22,L,LX,LY,LZ,
&LENXZ,LEN1,NU
```

```
COMMON/real/R(3,3),T(100,12,12),TT(100,12,12),K(12,12
&),P(600),D(600),PJNT(100,6),PMG(100,12),KSS(600,600),
&KS(600,600),XJC(100),YJC(100),X1(100),Y1(100),X2(100)
&,Y2(100),K11(6,6),K12(6,6),K21(6,6),K22(6,6),ANG(100)
&,L(100),PROD(12,12),RED(600,600),PML(100,12),BMOM(100
&,5),SX(100,5),X(5),DMG(100,12),DML(100,12),KMEM(100,1
&2,12),RML(100,12),RMG(100,12),PP(600),PJP(100,6),PFI
X(100,6),RS(600),DMEM(100,5),Z1(100),Z2(100),ZJC(100),
&LX(100),LY(100),LZ(100),LENXZ(100),LEN1(100)
```

```
COMMON/ints/MNO,JNO,ISSNO,ICLNO,LC,NUMSEC,ID(100,6),J
&N(100),J1(100),J2(100),ISEC(100),IDLIN(600),JNUM(2),N
&DOF,IOUT(100),IYLD(100,5),ISPAC
```

```
COMMON/mats/ E(100),NU(100),B(100),TP(100),HW(100),TW
&(100),BF(100),TF(100),AREA(100),IZ(100),IY(100),TORC(
&100),YZZ(100),RADZ(100),ZZ(100),YYY(100),RADY(100),ZY
&(100),UDL(100),YS(100)
```

C

C

```
DMG - member displacement vectors in global co-ordi-
nates {r'}
```

C

```
DO 8 IMEM=1,MNO
X(1)=0.0
X(2)=L(IMEM)*0.25
X(3)=L(IMEM)*0.50
X(4)=L(IMEM)*0.75
X(5)=L(IMEM)
```

C

```
JN1=J1(IMEM)
```

```
JN2=J2(IMEM)
```

```
DO 1 IDOF=1,6
```

```
JF=6*(JN1-1)
```

```
1 DMG(IMEM,IDOF)=D(JF+IDOF)
```

```
DO 2 IDOF=1,6
```

```
JF=6*(JN2-1)
```

```
2 DMG(IMEM,6+IDOF)=D(JF+IDOF)
```

C

C

```
DML - member displacement vectors in local coordinates
{r}={T}{r'}
```

C

```
DO 3 J=1,12
```

```
DML(IMEM,J)=0.0
```

```
DO 3 I=1,12
```

```
3 DML(IMEM,J)=DML(IMEM,J)+T(IMEM,I,J)*DMG(IMEM,I)
```

C

```
ISNO=ISEC(IMEM)
```

```

DENOM=24.0*E(ISNO)*IZ(ISNO)
UDL1=UDL(IMEM)/DENOM
DO 4 I=1,5
C1=X(I)-L(IMEM)
C2=C1*C1
C3=X(I)*X(I)
DMEM(IMEM,I)=UDL1*C3*C2
C4=X(I)/L(IMEM)
C5=DML(IMEM,9)-DML(IMEM,3)
C6=DML(IMEM,3)+C5*C4
4 DMEM(IMEM,I)=DMEM(IMEM,I)+C6
C
C RML - member load vectors in local coords {p}={k}{r}
C
DO 5 J=1,12
RML(IMEM,J)=0.0
DO 5 I=1,12
5 RML(IMEM,J)=RML(IMEM,J)+KMEM(IMEM,I,J)*DML(IMEM,I)
C
C RMG - member load vectors in global coords
C {p'}={Tt}{p}
C
DO 9 J=1,12
RMG(IMEM,J)=0.0
DO 9 I=1,12
9 RMG(IMEM,J)=RMG(IMEM,J)+TT(IMEM,I,J)*RML(IMEM,J)
C
C Bending Moments in each member (at x=0, L/4, L/2,
C 3L/4, L)
C
L6 =L(IMEM)/6.0
UDL2=UDL(IMEM)/12.0
C
DO 6 I=1,5
C1=X(I)-L(IMEM)
C2=6.0*X(I)*C1
C3=L(IMEM)*L(IMEM)
C4=C2+C3
BMOM(IMEM,I)=UDL2*C4
C5=RML(IMEM,11)+RML(IMEM,5)
C6=X(I)/L(IMEM)
C7=C5*C6
C8=RML(IMEM,5)-C7
BMOM(IMEM,I)=BMOM(IMEM,I)+C8
6 WRITE(*,13) IMEM,I,BMOM,C8,C7,C6,C5,C4,C3,C2,C1
13 FORMAT(2(2X,I2),9(2X,G10.3))
C
C Maximum total stresses in each member at each location
C
YMAX=HW(ISNO)+TP(ISNO)+TF(ISNO)-YZZ(ISNO)
IF(YMAX.LT.YZZ(ISNO)) YMAX=YZZ(ISNO)

```

```
      ZMIN=IZ( ISNO)/YMAX
      SXC=PML( IMEM,1)/AREA( ISNO)
      DO 7 I=1,5
      SXB=BMOM( IMEM,I)/ZMIN
      SX( IMEM,I)=SXB+SXC
C
C      Design criterion
C
      STRES=1.2*ABS( SX( IMEM,I) )
      IF( STRES.GT.YS( ISNO) ) IYLD( IMEM,I)=1
7      CONTINUE
8      CONTINUE
      RETURN
      END
```

SUBROUTINE INPUT

C

REAL IZ,IY,K,KMEM,KSS,KS,K11,K12,K21,K22,L,LX,LY,LZ,
C &LENXZ,LEN1,NU

COMMON/real/R(3,3),T(100,12,12),TT(100,12,12),K(12,12
&),P(600),D(600),PJNT(100,6),PMG(100,12),KSS(600,600),
&KS(600,600),XJC(100),YJC(100),X1(100),Y1(100),X2(100)
&,Y2(100),K11(6,6),K12(6,6),K21(6,6),K22(6,6),ANG(100)
&,L(100),PROD(12,12),RED(600,600),PML(100,12),BMOM(100
&,5),SX(100,5),X(5),DMG(100,12),DML(100,12),KMEM(100,1
&2,12),RML(100,12),RMG(100,12),PP(600),PJP(100,6),PFIX
&(100,6),RS(600),DMEM(100,5),Z1(100),Z2(100),ZJC(100),
&LX(100),LY(100),LZ(100),LENXZ(100),LEN1(100)

COMMON/ints/MNO,JNO,ISSNO,ICLNO,LC,NUMSEC,ID(100,6),J
&N(100),J1(100),J2(100),ISEC(100),IDLIN(600),JNUM(2),N
&DOF,IOUT(100),IYLD(100,5),ISPAC

COMMON/mats/ E(100),NU(100),B(100),TP(100),HW(100),TW
&(100),BF(100),TF(100),AREA(100),IZ(100),IY(100),TORC(
&100),YZZ(100),RADZ(100),ZZ(100),YYY(100),RADY(100),ZY
&(100),UDL(100),YS(100)

C

90 FORMAT(20(/),30X,25(' '))

91 FORMAT(30X,

&' ' Linear Elastic Analysis of a 3-D Grillage ' ')

92 FORMAT(30X,

&' ' using the Matrix Stiffness Method ' ')

93 FORMAT(30X,25(' '),35(/))

94 FORMAT(30X,' ',47X,' ')

10 FORMAT(6X,'No of members',2X,I3,6X,'No of
&joints',2X,I3,6X,'No of section types',2X,I2,/(/))

11 FORMAT(/,6X,'Joint No.',16X,'X Coord',20X,'Y Co
&ord',20X,'Z Coord',/(/))

12 FORMAT(/,6X,'Member No',4X,'Jnt No. at end 1',4X,
&'Jnt No at end 2',4X,'Section No.',5X,'Length',14X,
&'Angle',/(/))

88 FORMAT(/,2X,'Sect No',6X,'E',10X,'nu',12X,'ys',12X,
&'bp',13X,'tp',12X,'hw',12X,'tw',12X,'bf',12X,'tf'
&,/,13X,'N/mm2',20X,'N/mm2',12X,'mm',12X,'mm',
&12X,'mm',12X,'mm',12X,'mm',12X,'mm2',/(/))

95 FORMAT(/,2X,'Sect No',4X,'Yzz',11X,'Izz',11X,'Zzz',
&11X,'Rzz',11X,'Yyy',12X,'Iyy',10X,'Zyy',11X,'Ryy',
&15X,'J',/,12X,' mm',12X,'mm4',11X,'mm3',11X,'mm',12X,
&'mm',12X,'mm4',10X,'mm3',11X,'mm',14X,'mm4',/(/))

89 FORMAT(5X,I2,10(2X,G12.5))

14 FORMAT(25X,'Joint Loads',/(/,15X,'Joint
&No.',10X,'Degree of freedom no. ',10X,'Load',/(/))

37 FORMAT(/,25X,'Uniformly Distributed Loads',
&/,15X,'Member No.',21X,'Load',/(/))

15 FORMAT(34X,'Suppressions',/(/28X,'Joint No.',10X,
&'d.o.f.',/(/))

23 FORMAT(/,6X,'Member No. d.o.f. Applied

```

&load',//)
21  FORMAT(/,22X,'Member No ',I2,12X,'Uniformly distrib
&uted load = ',G12.5,' N/mm')
C
26  FORMAT(8X,I3,19X,F8.2,19X,F8.2,19X,F8.2)
27  FORMAT(10X,I2,15X,I2,18X,I2,14X,I2,9X,F9.3,9X,F9.3)
28  FORMAT(5X,I3,6(4X,G12.5))
29  FORMAT(//)
35  FORMAT(32X,I2,15X,I2)
36  FORMAT(18X,I2,23X,I2,18X,G12.5)
38  FORMAT(18X,I2,23X,F8.3)
C
C    Screen output
C
C    WRITE(*,29)
C    WRITE(*,10) MNO,JNO,NUMSEC
C    WRITE(*,11)
C    WRITE(*,26) (I,XJC(I),YJC(I),ZJC(I),I=1,JNO)
C    WRITE(*,29)
C    WRITE(*,12)
C    WRITE(*,27) (I,J1(I),J2(I),ISEC(I),L(I),
&ANG(I),I=1,MNO)
C    WRITE(*,29)
C    WRITE(*,88)
C    DO 5 I=1,NUMSEC
C 5  WRITE(*,89) I,E(I),NU(I),YS(I),B(I),TP(I),
&HW(I),TW(I),BF(I),TF(I)
C    WRITE(*,95)
C    DO 6 I=1,NUMSEC
C 6  WRITE(*,89) I,YZZ(I),IZ(I),ZZ(I),RADZ(I),YYY(I),IY(I),
&ZY(I),RADY(I),TORC(I)
C    WRITE(*,29)
C    WRITE(*,14)
C    DO 1 JNT=1,JNO
C    DO 1 IDOF=1,6
C 1  IF(PJNT(JNT,IDOF).NE.0.0) WRITE(*,36) JNT,IDOF,
&PJNT(JNT,IDOF)
C    WRITE(*,29)
C    WRITE(*,15)
C    DO 2 JNT=1,JNO
C    DO 2 IDOF=1,6
C 2  IF(ID(JNT,IDOF).EQ.1) WRITE(*,35) JNT,IDOF
C
C    File output
C
C    WRITE(6,90)
C    WRITE(6,94)
C    WRITE(6,94)
C    WRITE(6,91)
C    WRITE(6,94)

```

```

WRITE(6,94)
WRITE(6,92)
WRITE(6,94)
WRITE(6,94)
WRITE(6,93)
WRITE(6,29)
WRITE(6,10) MNO, JNO, NUMSEC
WRITE(6,11)
WRITE(6,26) (I, XJC(I), YJC(I), ZJC(I), I=1, JNO)
WRITE(6,29)
WRITE(6,12)
WRITE(6,27) (I, J1(I), J2(I), ISEC(I), L(I),
&ANG(I), I=1, MNO)
WRITE(6,29)
WRITE(6,88)
DO 8 I=1, NUMSEC
8 WRITE(6,89) I, E(I), NU(I), YS(I), B(I), TP(I), HW(I), TW(I),
&BF(I), TF(I)
WRITE(6,95)
DO 9 I=1, NUMSEC
9 WRITE(6,89) I, YZZ(I), IZ(I), ZZ(I), RADZ(I), YYY(I), IY(I),
&ZY(I), RADY(I), TORC(I)
WRITE(6,29)
WRITE(6,14)
DO 3 JNT=1, JNO
DO 3 IDOF=1, 6
3 IF(PJNT(JNT, IDOF).NE.0.0) WRITE(6,36) JNT, IDOF,
&PJNT(JNT, IDOF)
WRITE(6,37)
DO 7 IMEM=1, MNO
7 IF(UDL(IMEM).NE.0.0) WRITE(6,38) IMEM, UDL(IMEM)
WRITE(6,29)
WRITE(6,15)
DO 4 JNT=1, JNO
DO 4 IDOF=1, 6
4 IF(ID(JNT, IDOF).EQ.1) WRITE(6,35) JNT, IDOF
RETURN
END

```

SUBROUTINE OUT

C

```

REAL IZ,IY,K,KMEM,KSS,KS,K11,K12,K21,K22,L,LX,LY,LZ,
&LENXZ,LEN1,NU
COMMON/real/R(3,3),T(100,12,12),TT(100,12,12),K(12,12
&),P(600),D(600),PJNT(100,6),PMG(100,12),KSS(600,600),
&KS(600,600),XJC(100),YJC(100),X1(100),Y1(100),X2(100)
&,Y2(100),K11(6,6),K12(6,6),K21(6,6),K22(6,6),ANG(100)
&,L(100),PROD(12,12),RED(600,600),PML(100,12),BMOM(100,1
&2,12),SX(100,5),X(5),DMG(100,12),DML(100,12),KMEM(100,1
&2,12),RML(100,12),RMG(100,12),PP(600),PJP(100,6),PFI
&(100,6),RS(600),DMEM(100,5),Z1(100),Z2(100),ZJC(100),
&LX(100),LY(100),LZ(100),LENXZ(100),LEN1(100)
COMMON/ints/MNO,JNO,ISSNO,ICLNO,LC,NUMSEC,ID(100,6),J
&N(100),J1(100),J2(100),ISEC(100),IDLIN(600),JNUM(2),N
&DOF,IOUT(100),IYLD(100,5),ISPAC
COMMON/mats/ E(100),NU(100),B(100),TP(100),HW(100),TW
&(100),BF(100),TF(100),AREA(100),IZ(100),IY(100),TORC(
&100),YZZ(100),RADZ(100),ZZ(100),YYY(100),RADY(100),ZY&
(100),UDL(100),YS(100)

```

C

```

10 FORMAT(//,25X,'Structural stiffness matrix {K}
  &({Tt}{k}{T}',//)
11 FORMAT(//,25X,'Reduced structural stiffness matrix
  &{K}',//)
12 FORMAT(//,25X,'Upper triangular form of the reduced'
  &'structural stiffness matrix {K}',//)
20 FORMAT(/,5X,'Member No.',I2,6X,'{r',2H'},11X,
  &'{p',2H'},11X,'{r}',11X,'{p}',/)
13 FORMAT(//,18X,'Displacements and support reactions
  &(global coords)',//,33X,'{D}',12X,'{P}',//)
16 FORMAT(//,8X,'Member No. ',25X,'Bending Mo
  &ments',//,23X,'0',13X,'L/4',12X,'L/2',12X,
  &'3L/4',11X,'L',/)
17 FORMAT(//,8X,'Member No.',20X,'Max total stresses
  &{s}',//,23X,'0',12X,'L/4',12X,'L/2',12X,
  &'3L/4',11X,'L',/)
23 FORMAT(//,8X,'Member No.',20X,'Deflections along mem
  &ber length',//,23X,'0',12X,'L/4',12X,'L/2',12X,
  &'3L/4',11X,'L',/)
24 FORMAT(//,8X,'Member No.',20X,'Member loads
  &{p',2H'},//,23X,'3',13X,'4',13X,'5',13X,'9',
  &13X,'10',12X,'11',/)
21 FORMAT(/,11X,'Yielding is occurring in the following
  &members',//,10X,'No.',10X,'Member No.',11X,
  &'Longl bend. stress',/)
14 FORMAT(7(2X,G12.5))
15 FORMAT(15X,I3,10X,2(2X,G12.5))
16 FORMAT(12(2X,G9.2))
19 FORMAT(15X,I2,5(2X,G12.5))

```

```

24  FORMAT(9X, I3, 13X, I3, 14X, G12.5)
26  FORMAT(15X, I2, 6(2X, G12.5))
C
C      WRITE(6, 10)
C      WRITE(6, 16) ((KSS(I, J), I=1, 12), J=1, NDOF)
C      WRITE(6, 10)
C      WRITE(6, 16) ((KSS(I, J), I=13, 24), J=1, NDOF)
C      WRITE(6, 11)
C      WRITE(6, 16) ((RED(I, J), I=1, 12), J=1, NDOF)
C      WRITE(6, 11)
C      WRITE(6, 16) ((RED(I, J), I=13, 24), J=1, NDOF)
C      WRITE(6, 12)
C      WRITE(6, 16) ((KS(I, J), I=1, 12), J=1, NDOF)
C      WRITE(6, 12)
C      WRITE(6, 16) ((KS(I, J), I=13, 24), J=1, NDOF)
C
C      WRITE(6, 13)
C      DO 3 J=1, NDOF
C 3    WRITE(6, 15) J, D(J), RS(J)
C      DO 4 IMEM=1, MNO
C      IF(IOUT(IMEM).EQ.0) GO TO 4
C      WRITE(6, 20) IMEM
C      DO 5 IDOF=1, 12
C      WRITE(6, 19) IDOF, DMG(IMEM, IDOF), RMG(IMEM, IDOF),
&DML(IMEM, IDOF), RML(IMEM, IDOF)
4    CONTINUE
C      WRITE(6, 17)
C      DO 7 IMEM=1, MNO
7    WRITE(6, 19) IMEM, (BMOM(IMEM, I), I=1, 5)
C      WRITE(6, 18)
C      DO 6 IMEM=1, MNO
6    WRITE(6, 19) IMEM, (SX(IMEM, I), I=1, 5)
C      WRITE(6, 23)
C      DO 8 IMEM=1, MNO
8    WRITE(6, 19) IMEM, (DMEM(IMEM, I), I=1, 5)
C      WRITE(6, 25)
C      DO 21 IMEM=1, MNO
22   WRITE(6, 26) IMEM, RMG(IMEM, 3), RMG(IMEM, 4),
&RMG(IMEM, 5), RMG(IMEM, 9), RMG(IMEM, 10), RMG(IMEM, 11)
C      KOUNT=0
C      WRITE(6, 22)
C      DO 9 IMEM=1, MNO
C      DO 9 I=1, 5
C      IF(IYLD(IMEM, I).EQ.1) KOUNT=KOUNT+1
9    IF(IYLD(IMEM, I).EQ.1) WRITE(6, 24) KOUNT, IMEM,
&SX(IMEM, I)
C      RETURN
C      END

```

Παράρτημα Z

Αποτελέσματα προγράμματος *gril3d*

Στο παράρτημα αυτό περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη λειτουργία του κώδικα *gril3d* (πρόγραμμα επίλυσης κατασκευών με τη μητρική μέθοδο).

.
. .
. Linear Elastic Analysis of a 2-D Grillage .
. .
. using the Matrix Stiffness Method .
. .
.

No of members 1 No of joints 2 No of section types 1

Joint No. X Coord Y Coord

1 .00 .00
2 1000.00 .00

Member No Jnt No. at end 1 Jnt No at end 2 Section No. Length Angle

1 1 2 1 1000.000 .000

Sect No	E N/mm2	nu	ys N/mm2	bp mm	tp mm	hw mm	tw mm	bf mm	tf mm2
---------	------------	----	-------------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------

1	.20700E+06	.30000	245.00	12.000	100.00	.00000	.00000	.00000	.00000
---	------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Sect No	Yzz mm	Izz mm4	Zzz mm3	Rzz mm	Yyy mm	Iyy mm4	Zyy mm3	Ryy mm	J mm4
---------	-----------	------------	------------	-----------	-----------	------------	------------	-----------	----------

1	50.000	.10000E+07	20000.	28.868	6.0000	14400.	2400.0	3.4641	.40000E+07
---	--------	------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	------------

Member No 1 Uniformly distributed load = 76.800 N/mm

Suppressions

Joint No.	d.o.f.
1	1
1	2
1	3
1	4
1	5
2	2
2	3
2	4
2	5

Member No. 1 - Stiffness matrix {k}

.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07	.00	-.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07
.00	.00	36.	.00	-.18E+05	.00	.00	.00	-36.	.00	-.18E+05	.00
.00	.00	.00	.32E+09	.00	.00	.00	.00	.00	-.32E+09	.00	.00
.00	.00	-.18E+05	.00	.12E+08	.00	.00	.00	.18E+05	.00	.60E+07	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09
-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00
.00	-.25E+04	.00	.00	.00	-.12E+07	.00	.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07
.00	.00	-36.	.00	.18E+05	.00	.00	.00	36.	.00	.18E+05	.00
.00	.00	.00	-.32E+09	.00	.00	.00	.00	.00	.32E+09	.00	.00
.00	.00	-.18E+05	.00	.60E+07	.00	.00	.00	.18E+05	.00	.12E+08	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09

.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0

Member No. 1 - Stiffness matrix {k'} ($=\{Tt\}\{k\}\{T\}$)

.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07	.00	-.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07
.00	.00	36.	.00	-.18E+05	.00	.00	.00	-36.	.00	-.18E+05	.00
.00	.00	.00	.32E+09	.00	.00	.00	.00	.00	-.32E+09	.00	.00
.00	.00	-.18E+05	.00	.12E+08	.00	.00	.00	.18E+05	.00	.60E+07	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09
-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00
.00	-.25E+04	.00	.00	.00	-.12E+07	.00	.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07
.00	.00	-36.	.00	.18E+05	.00	.00	.00	36.	.00	.18E+05	.00
.00	.00	.00	-.32E+09	.00	.00	.00	.00	.00	.32E+09	.00	.00
.00	.00	-.18E+05	.00	.60E+07	.00	.00	.00	.18E+05	.00	.12E+08	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09

Member No. 1 - Partitioned stiffness matrix {k11'}

.24840E+06	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
.00000	2484.0	.00000	.00000	.00000	.12420E+07
.00000	.00000	35.770	.00000	-17885.	.00000
.00000	.00000	.00000	.31846E+09	.00000	.00000
.00000	.00000	-17885.	.00000	.11923E+08	.00000
.00000	.12420E+07	.00000	.00000	.00000	.82800E+09

Member No. 1 - Partitioned stiffness matrix {k12'}

-.24840E+06	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
.00000	-2484.0	.00000	.00000	.00000	.12420E+07
.00000	.00000	-35.770	.00000	-17885.	.00000
.00000	.00000	.00000	-.31846E+09	.00000	.00000
.00000	.00000	17885.	.00000	.59616E+07	.00000
.00000	-.12420E+07	.00000	.00000	.00000	.41400E+09

Member No. 1 - Partitioned stiffness matrix {k21'}

-.24840E+06	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
.00000	-2484.0	.00000	.00000	.00000	-.12420E+07
.00000	.00000	-35.770	.00000	17885.	.00000
.00000	.00000	.00000	-.31846E+09	.00000	.00000
.00000	.00000	-17885.	.00000	.59616E+07	.00000
.00000	.12420E+07	.00000	.00000	.00000	.41400E+09

Member No. 1 - Partitioned stiffness matrix {k22'}

.24840E+06	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
.00000	2484.0	.00000	.00000	.00000	-.12420E+07
.00000	.00000	35.770	.00000	17885.	.00000
.00000	.00000	.00000	.31846E+09	.00000	.00000
.00000	.00000	17885.	.00000	.11923E+08	.00000
.00000	-.12420E+07	.00000	.00000	.00000	.82800E+09

Structural stiffness matrix {K} (= {Tt}{k}{T})

.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07	.00	-.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07
.00	.00	36.	.00	-.18E+05	.00	.00	.00	-36.	.00	-.18E+05	.00
.00	.00	.00	.32E+09	.00	.00	.00	.00	.00	-.32E+09	.00	.00
.00	.00	-.18E+05	.00	.12E+08	.00	.00	.00	.18E+05	.00	.60E+07	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09
-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00
.00	-.25E+04	.00	.00	.00	-.12E+07	.00	.25E+04	.00	.00	.00	.12E+07
.00	.00	-36.	.00	.18E+05	.00	.00	.00	36.	.00	.18E+05	.00
.00	.00	.00	-.32E+09	.00	.00	.00	.00	.00	.32E+09	.00	.00
.00	.00	-.18E+05	.00	.60E+07	.00	.00	.00	.18E+05	.00	.12E+08	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09

Reduced structural stiffness matrix $\{K\}$

1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.83E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.00	.41E+09
-.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	.25E+06	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1.0	.00	.00
.00	.12E+07	.00	.00	.00	.41E+09	.00	-.12E+07	.00	.00	.00	.00	.83E+09

Upper triangular form of the reduced structural stiffness matrix $\{K\}$

[illegible]

Displacements and support reactions (global coords)

	{D}	{P}		
1	.00000	.00000	Member No. 1	{r'}
2	.00000	-38400.		{P'}
3	.00000	.00000		{r}
4	.00000	.00000		{p}
5	.00000	.00000		
6	.15459E-01	.00000	1	.00000
7	.00000	.00000	2	.00000
8	.00000	-38400.	3	.00000
9	.00000	.00000	4	.00000
10	.00000	.00000	5	.00000
11	.00000	.00000	6	.15459E-01
12	-.15459E-01	.50000	7	.00000
			8	.00000
			9	.00000
			10	.00000
			11	.00000
			12	-.15459E-01
				.00000
				-.15459E-01
				.64000E+07

Member No.		Bending Moments			
	0	L/4	L/2	3L/4	L
1	.64000E+07	.16000E+08	.25600E+08	.35200E+08	.44800E+08

Member No.		Max total stresses {s}			
	0	L/4	L/2	3L/4	L
1	320.00	800.00	1280.0	1760.0	2240.0

Member No.		Deflections along member length			
	0	L/4	L/2	3L/4	L
1	.00000	.54348	.96618	.54348	.00000

Yielding is occurring in the following members:

No.	Member No.	Position	Longl bend. stress
1	1	.00000	320.00
2	1	250.00	800.00
3	1	500.00	1280.0
4	1	750.00	1760.0
5	1	1000.0	2240.0