

Διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας του Λογισμικού για Πολιτικούς Μηχανικούς.

Structural analysis software verification

ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΙΔΗΣ Α. Γ.¹ ΒΑΔΑΛΟΥΚΑΣ Γ. Ν.² ΣΤΑΜΟΥΛΑΚΗ Λ. Γ.³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο τρόπος ελέγχου προγραμμάτων ανάλυσης και διαστασιολόγησης κατασκευών. Συγκρίνονται αποτελέσματα επιλύσεων “με το χέρι” με αυτά που προκύπτουν από λογισμικά που αναπτύσσονται από τις εταιρείες 4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού (STRAD) και Georgia Institute of Technology (GT.STRUDL) καθώς και από το λογισμικό SAP2000. Δίνεται έμφαση στην ακρίβεια των προσομοιωμάτων και στην θέσπιση διαδικασιών ώστε ο έλεγχος της ορθότητας να γίνεται από τον ίδιο το Μηχανικό και όχι από κάποιο τρίτο πρόγραμμα, το οποίο κανείς δεν εγγυάται ότι είναι απαλλαγμένο σφαλμάτων.

ABSTRACT: In this study main guidelines for structural analysis software verification are proposed. Results obtained by analytical solutions are compared to those obtained by products developed by 4M-VK Civil Engineering Software Ltd, Georgia Institute of Technology and SAP 2000. Special attention is required in order to set up procedures so as the software verification is done by the engineer himself and not by comparing the results with those obtained by another software product, that noone can guarantee that it is flawless.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναγκαιότητα ελέγχου του λογισμικού που ο μηχανικός χρησιμοποιεί είναι προφανής. “Οι συνέπειες από τα σφάλματα αυτά μπορεί να είναι ιδιαίτερα οδυνηρές γιατί:

- Εμφανίζονται μετά την ολοκλήρωση του κτιριακού έργου και, κατά κανόνα, σε μία δύσκολη για την κατασκευή στιγμή (π.χ. σε περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού).
- Μπορεί να είναι συστηματικές, δηλαδή το ίδιο σφάλμα να εμφανιστεί σε περισσότερα του ενός κτιριακά έργα, π.χ. που μελετήθηκαν με το ίδιο πρόγραμμα Η.Υ.
- Είναι μη γραμμικές, π.χ. ένα απλό αριθμητικό σφάλμα προσήμου μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ολόκληρη κατασκευή” (Αβραμίδης, 2005).

Συνήθης πρακτική για τον έλεγχο του λογισμικού ανάλυσης κατασκευών είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων του με: (i) αναλυτικές-κλειστές λύσεις ή με προσεγγιστικές λυμένες “στο χέρι”, (ii) πειραματικά αποτελέσματα, (iii) υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από ακριβέστερες - λεπτομερέστερες αναλύσεις.

Ο έλεγχος πρέπει να γίνεται πρώτα από το συντάκτη του λογισμικού και στη συνέχεια από το χρήστη του. Ο έλεγχος αυτός πρέπει να περιλαμβάνει την εξέταση του δομικού προσομοιώματος, του φορτιστικού προσομοιώματος, των αποτελεσμάτων ανάλυσης και σχεδιασμού και την απαιτούμενη πληρότητα των εκτυπώσεων.

¹ Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., 4M -VK, Αθήνα aris@4m.gr

² Πολιτικός Μηχανικός Π.Σ.Π.Π , 4M -VK, Αθήνα georgev@4m.gr

³ Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. , Αθήνα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η σημασία του φορτιστικού προσομοιώματος, της πλέον απλής περίπτωσης φόρτισης από ίδια βάρη και κινητά, στις μεταβολές των εντατικών μεγεθών με τις αναμενόμενες επιπτώσεις στον σχεδιασμό. Ο φορέας που παρουσιάζεται είναι το πρώτο παράδειγμα που περιλαμβάνεται στα δοκιμαστικά προβλήματα του ΟΑΣΠ και έχει επιλυθεί με το SAP2000. Ο έλεγχος πραγματοποιείται μόνο για κατακόρυφες φορτίσεις. Για το σκοπό αυτό προσδιορίζεται καταρχήν το φορτίο που παραλαμβάνουν οι δοκοί από τις πλάκες. Επιλύεται ο φορέας και εντοπίζονται οι διαφορές εντατικών μεγεθών για τις διαφορετικές κατανομές φορτίου. Η εξέταση ενός προσομοιώματος πρέπει, όσο είναι δυνατόν, να γίνεται “με το χέρι” ώστε τιμές που “εύκολα” προσδιορίζονται στα χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα να ελέγχονται απευθείας από οποιονδήποτε μηχανικό.

ΔΟΜΙΚΟ-ΦΟΡΤΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΣΜΟΙΩΜΑ

Τα δεδομένα του 1^{ου} Παραδείγματος όπως παρουσιάζονται στην ιστοσελίδα του ΟΑΣΠ είναι τα ακόλουθα:

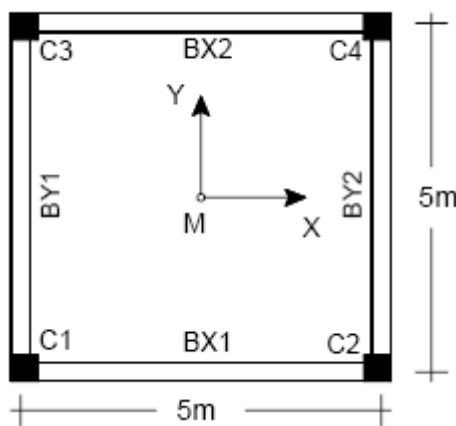
Μονώροφος πλαισιακός φορέας με τετραπλή συμμετρία - Μόνον ανωδομή

Μονάδες: Σύστημα μονάδων S.I. (μήκος: m, δύναμη: kN, χρόνος: sec)

Υλικό: Οπλισμένο σκυρόδεμα (μέτρο ελαστικότητας $E=2.9 \cdot 10^7$ kN/m², λόγος Poisson $\nu=0.2$, ειδικό βάρος $\gamma=25$ kN/m³)

Πίνακας 1: Δεδομένα ανωδομής

Όροφος	Ύψος	Υποστυλώματα C_i (i = 1 – 4)	Δοκοί B_{xi}, B_{yi} (i = 1 – 2)
1 ^{ος}	4m	35/35	20/60



Πάχος πλάκας $d=15$ cm

Περιμετρικά το κτίριο έχει μπατική τοιχοποιία (3.6 kN/m²). Ανοίγματα στις τοιχοποιίες δε λαμβάνονται υπόψη. Στο δώμα και σε όλη την περίμετρο υπάρχει στηθαίο από μπατική τοιχοποιία ύψους 1m. Τα δάπεδα έχουν επίστρωση από μάρμαρο βάρους 1.3 kN/m². Το ωφέλιμο φορτίο (μεταβλητή δράση) ελήφθη ίσο με $Q=2$ kN/m².

Δεδομένα Φάσματος Σχεδιασμού: ΕΑΚ2000

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: ΙΙ (με την αναθεώρηση του ΕΑΚ έγινε Ι)

Κατηγορία εδάφους: Γ

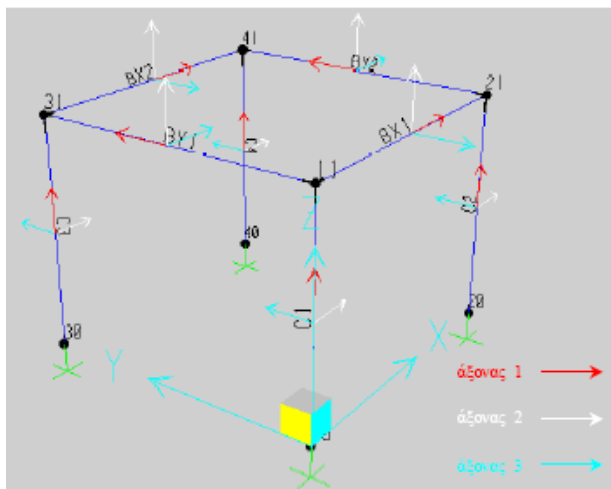
$\theta=1$

Συντελεστής συμπεριφοράς: $q=3.5$

Κατηγορία σπουδαιότητας: Σ2

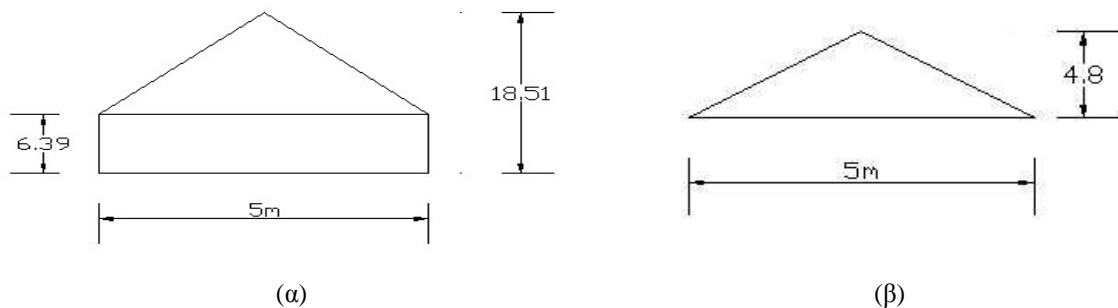
Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης: $\zeta=5\%$

Το σκαρίφημα του προσομοιώματος της ομάδα εργασίας απεικονίζεται στην Σχήμα 1 (Αβραμίδης Ι., 2005).



Σχήμα 1: Σκαρίφημα προσομοιώματος Παραδείγματος 1

Το φορτιστικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε δοκό για τα μόνιμα και κινητά φορτία παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 2:



Σχήμα 2: (α) Φορτιστικό προσομοίωμα-μόνιμα φορτία, (β) Φορτιστικό προσομοίωμα-κινητά φορτία

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΔΟΚΩΝ

Υπολογισμός φορτίων δοκών ανά μονάδα φορτίου πλάκας

Προσδιορίζεται η εξίσωση κατανομής φορτίου στην δοκό για μοναδιαίο φορτίο πλάκας p ίσο με 10kN/m^2 (ή 1 t/m^2). Θεωρώντας διαστάσεις πλάκας $l_x=l_y=5\text{m}$ το φορτίο που αντιστοιχεί στην κάθε δοκό είναι: $\hat{p} \cdot p/4 = 62.5\text{kN}$. Στην περίπτωση που οι δοκοί φορτίζονταν ομοιόμορφα, το ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο θα ισούταν με $q = 62.5/5.0 = 12.5\text{kN/m}$.

Σύμφωνα με τον Hahn (1974), ομοιόμορφη κατανομή φορτίου πραγματοποιείται όταν οι ροπές αδράνειας δοκού και πλάκας συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$J_{\delta_x} = \frac{l_x \cdot J}{2}, J_{\delta_y} = \frac{l_y \cdot J}{2} \quad (1)$$

όπου J η ροπή αδράνειας της πλάκας ανά μονάδα πλάτους και J_{δ_x} και J_{δ_y} οι ροπές αδράνειας δοκών διατεταγμένων παράλληλα στον απόλυτο x και y άξονα αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα για $l_x=l_y=5\text{m}=500\text{cm}$ και πάχος πλάκας $d=15\text{cm}$ που δίνει $J=281.25\text{cm}^4/\text{cm}$ πλάτους, από την σχέση (1) προκύπτουν ροπές αδράνειας των δοκών για ομοιόμορφη κατανομή φορτίου: $J_{\delta_x} = J_{\delta_y} = 70312.5\text{cm}^4$. Αυτή η ροπή αδράνειας αντιστοιχεί σε δοκό με διαστάσεις περίπου $20/35\text{cm}$.

Στην περίπτωση που οι δοκοί είχαν άπειρη δυσκαμψία, η κατανομή των φορτίων τους (q) όπως προκύπτει από το Beton Kalender (1985) θα ήταν καμπύλη με μέγιστη τιμή στο μέσο τους:

$$q_m = \frac{p \cdot l}{2.96} \quad (2)$$

και μηδενική τιμή στις άκρες. Εφαρμόζοντας τη σχέση (2) στο συγκεκριμένο παράδειγμα για $l=5\text{m}$ και $p=10\text{ kN/m}^2$ το φορτίο στο μέσο δοκού άπειρης δυσκαμψίας θα ήταν: $q_m=16.892\text{ kN/m}$.

Στο παράδειγμα που εξετάζεται οι διαστάσεις των δοκών είναι $20/60\text{ cm}$ επομένως η κατανομή των φορτίων θα είναι μια καμπύλη ενδιάμεσης μορφής.

Η ροπή στη στήριξη και στο άνοιγμα της δοκού, λόγω επιρροής της πλάκας, κατά Stiglat/Wipfel (1976), είναι ίση με:

$$M_B = \frac{K \cdot l}{m_B} \quad (3)$$

όπου K είναι η ολική φόρτιση ανοίγματος πλάκας, η οποία για φορτίο 10kN/m^2 είναι ίση με 250kN , l είναι το μήκος της δοκού, δηλαδή 4.65m και m_B είναι σταθερά η οποία δίνεται από τους πίνακες των Stiglat/Wipfel (1976) και εξαρτάται από το λόγο ακαμψιών (H) που ορίζεται ως:

$$H = \frac{E \cdot I}{l \cdot N} \quad (4)$$

όπου I η ροπή αδράνειας της δοκού, και N η ροπή αδράνειας της πλάκας πάχους d η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$N = \frac{d^3 \cdot E}{12} \quad (5)$$

Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους για δοκό διαστάσεων 20/60cm δηλαδή με ροπή αδράνειας I ίση με 360000cm^4 , πλάκα πάχους 15cm και λαμβάνοντας την ακαμψία ρηγματωμένης δοκού (50%) προκύπτει λόγος ακαμψιών H ίσος με 1.376. Για αυτήν την τιμή του H προκύπτουν (Stiglat/Wipfel, 1976) για το άνοιγμα $m_B=75$ και για τη στήριξη $m_B=-40.5$. Εισάγοντας αυτές τις τιμές στη σχέση (4) προκύπτει ροπή ανοίγματος 15.5 kNm και στήριξης -28.7 kNm.

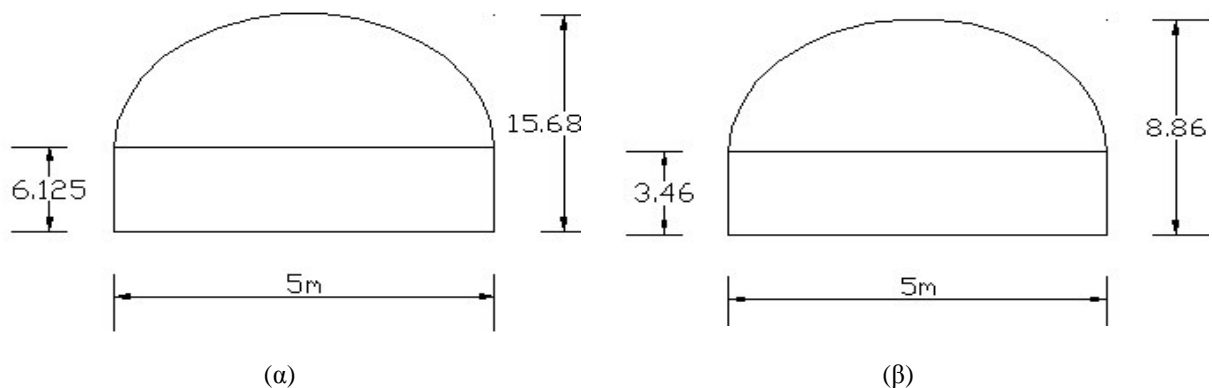
Η κατανομή του φορτίου (και στα 5 μέτρα) που δίνει αυτές τις ροπές στη στήριξη και στο άνοιγμα και συνολικό φορτίο δοκού 62.5kN προσεγγίζεται από την καμπύλη που περιγράφεται με την εξίσωση: $y=-1.53x^2 + 7.65x + 6.125$.

Ανάγεται η τιμή των 10kN/m^2 σε αυτή του δημοσιευμένου παραδείγματος και υπολογίζεται η νέα κατανομή.

Το φορτιστικό προσομοίωμα του παραδείγματος για την πλάκα περιλαμβάνει:

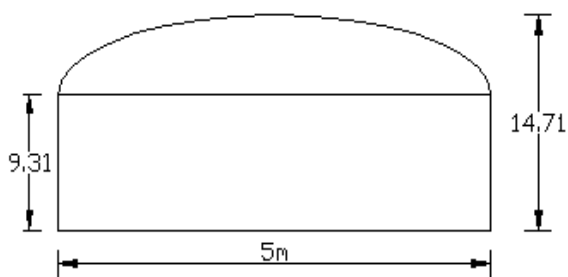
- Μόνιμο φορτίο: Το ίδιο βάρος της πλάκας ίσο με $0.15\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 = 3.75\text{kN/m}^2$ και το βάρος από επίστρωση μαρμάρου ίσο με 1.3kN/m^2
- Ωφέλιμο φορτίο: $Q=2.0\text{ kN/m}^2$.

Ο συνδυασμός φόρτισης $G+0.3Q$ δίνει φορτίο 5.65kN/m^2



Σχήμα 3: (α) Κατανομή φορτίου στη δοκό από επίλυση “με το χέρι” για φορτίο 10kN/m^2
 (β) Κατανομή φορτίου στη δοκό από επίλυση “με το χέρι” για φορτίο 5.65kN/m^2

Για τη δοκό, το φορτιστικό προσομοίωμα του παραδείγματος περιλαμβάνει το ομοιόμορφο κατανομημένο φορτίο λόγω μπατικής τοιχοποιίας ίσο με 3.6 kN/m^2 και το ίδιο βάρος της δοκού ίσο με 2.25 kN/m^2 . Επομένως το επιπρόσθετο ομοιόμορφο φορτίο δοκού ισούται με 5.85 kN/m^2 . Προσθέτοντας και αυτό στην παραπάνω κατανομή, προκύπτει η τελική κατανομή φορτίου στη δοκό.



Ροπή πάκτωσης λόγω ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου $q=9.31\text{kN/m}$:
 $M=-ql^2/12$

$$M=-9.31*5*5/12=-19.4$$

Ροπή πάκτωσης λόγω καμπύλου κατανεμημένου φορτίου με μέγιστη τιμή στο κέντρο $q=5.4\text{kN/m}$: $M=-ql^2/15$

$$M=-5.4*5*5/15=-9$$

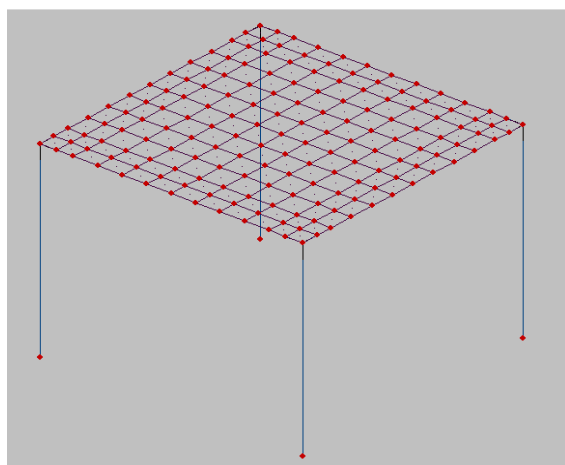
Σχήμα 4: Τελική κατανομή φορτίου στη δοκό από επίλυση “με το χέρι”

Τελική ροπή πάκτωσης σε κάθε δοκό : $M=-28.4$

Έλεγχος αποτελεσμάτων της λύσης με το χέρι μέσω προγράμματος H/Y

Για την επιβεβαίωση της εξίσωσης κατανομής φορτίου δοκού όπως αυτή προέκυψε με την επίλυση “με το χέρι” διαμορφώνεται στο πρόγραμμα GT.STRUDL ένα πιο σύνθετο δομικό προσομοίωμα, το οποίο περιλαμβάνει ραβδωτά και επιφανειακά στοιχεία.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το σκοπό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5 και περιλαμβάνει μία πλάκα διακριτοποιημένη με επιφανειακά στοιχεία και τις τέσσερις δοκούς διακριτοποιημένες με ραβδωτά στοιχεία.

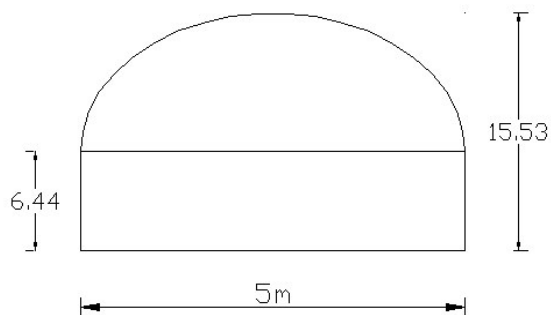


CA3BA2185	5	6	7	8	9	10	11	12	188	13	CA4
22											40
187											192
21											39
20											38
19											37
18											36
17											35
16											34
15											33
14											32
188											191
BA3											BA4
CA1BA1189	23	24	25	26	27	28	29	30	190	31	CA2

Σχήμα 5 : Δομικό προσομοίωμα στο GT.STRUDL

Οι δοκοί έχουν μόνο αξονική εκκεντρότητα για σύγκριση των δημοσιευμένων αποτελεσμάτων με τους υπολογισμούς “με το χέρι”. Το παραμορφώσιμο μήκος δοκού ισούται με 4.65m. Η επίλυση έγινε με θεώρηση μίας βύθισης και δύο στροφών και τα αποτελέσματα για κατανεμημένο φορτίο πλάκας 10 kN/m^2 παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Η κατανομή φορτίων που προκύπτει από τις τιμές των τεμνουσών QZ προσεγγίζεται από την καμπύλη που περιγράφεται από την εξίσωση $y=-1.4544x^2 + 7.272x + 6.44$ και απεικονίζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Κατανομή φορτίου πλάκας στη δοκό

Στη συνέχεια επιλύοντας το ίδιο μοντέλο για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο στις δοκούς ίσο με 10kN/m και αφόρτιστη πλάκα υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη για κάθε μέλος δοκού.

Πίνακας 2: Τιμές των QZ, MY στην αρχή κάθε τμήματος της δοκού από φορτίο πλάκας 10 kN/m²

Τμήμα δοκού	QZ	MYαρχής
1	36.17	-28.58
2	25.97	-22.33
3	23.70	-12.68
4	17.54	-0.79
5	10.73	7.94
6	3.61	13.22
7	-3.61	14.89
8	-10.73	12.93
9	-17.54	7.36
10	-23.70	-1.66
11	-25.97	-14.02
12	-36.17	-23.34

Πίνακας 3: Τιμές των QZ, MY για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο 10kN/m

Τμήμα δοκού	QZ	MYαρχής
1	23.46	-16.34
2	17.46	-12.42
3	15.23	-6.65
4	11.12	-0.22
5	7.46	4.15
6	4.02	6.68
7	0.63	7.47
8	-2.81	6.54
9	-6.47	3.87
10	-10.58	-0.65
11	-14.26	-7.35
12	-22.01	-13.04

Εφαρμογή στα επιβαλλόμενα φορτία του παραδείγματος

Ανάγεται η τιμή των 10kN/m² του κατανεμημένου φορτίου πλάκας σε αυτή του δημοσιευμένου παραδείγματος, δηλαδή 5.65kN/m² και για αυτό φορτίο υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη στις δοκούς (Πίνακας 4) .

Ομοίως, για το επιπρόσθετο ομοιόμορφο φορτίο δοκού 5.85 kN/m², υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη στις δοκούς (Πίνακας 5).

Πίνακας 4: Τιμές των QZ, MY για το φορτίο πλάκας του παραδείγματος

Τμήμα δοκού	QZ	ΜΥαρχής
1	20.44	-16.15
2	14.67	-12.62
3	13.39	-7.16
4	9.91	-0.45
5	6.06	4.48
6	2.04	7.47
7	-2.04	8.41
8	-6.06	7.30
9	-9.91	4.16
10	-13.39	-0.94
11	-14.67	-7.92
12	-20.44	-13.19

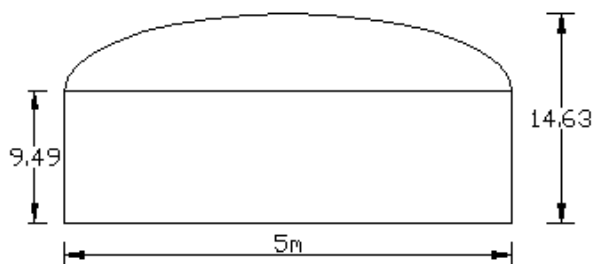
Πίνακας 5: Τιμές των QZ, MY για το φορτίο δοκού του παραδείγματος

Τμήμα δοκού	QZ	ΜΥαρχής
1	13.72	-9.56
2	10.21	-7.27
3	8.91	-3.89
4	6.51	-0.13
5	4.37	2.43
6	2.35	3.91
7	0.37	4.37
8	-1.65	3.83
9	-3.79	2.27
10	-6.19	-0.38
11	-8.34	-4.30
12	-12.88	-7.63

Τέλος, υπολογίζεται η συνολική κατανομή φορτίου στη δοκό και τα εντατικά της μεγέθη. Η τελική ροπή M στο άκρο της δοκού είναι ίση με -25.7 kNm

Πίνακας 6: Τιμές των QZ, MY για το συνολικό φορτίο του παραδείγματος

Τμήμα δοκού	QZ	ΜΥαρχής
1	34.16	-25.71
2	24.89	-19.88
3	22.30	-11.06
4	16.42	-0.58
5	10.43	6.92
6	4.39	11.38
7	-1.67	12.78
8	-7.71	11.13
9	-13.70	6.43
10	-19.58	-1.32
11	-23.01	-12.22
12	-33.31	-20.81



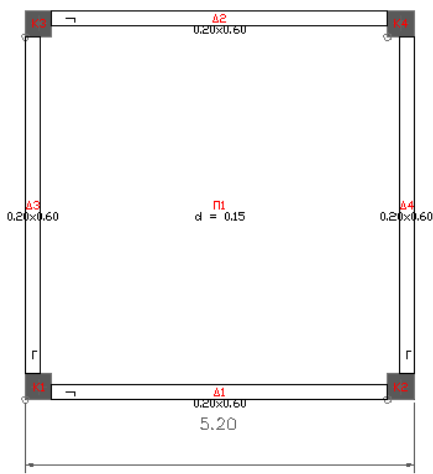
Σχήμα 7: Συνολική κατανομή φορτίου στη δοκό

Παρατηρείται ότι η κατανομή φορτίου στη δοκό όπως αυτή προέκυψε από την επίλυση με το χέρι προσεγγίζει πάρα πολύ αυτή που προέκυψε από το σύνθετο μοντέλο. Μικρή διαφορά εμφανίζεται στη ροπή πάκτωσης. Πέρα από τη διαφορά στο μοντέλο, η διαφορά αυτή οφείλεται και στο ότι στην επίλυση με το χέρι, το ομοιόμορφο φορτίο λόγω ίδιου βάρους και τοιχοποιίας, θεωρήθηκε ότι κατανέμεται και στα 5m ενώ το πρόγραμμα το κατανέμει στο καθαρό μήκος δοκού δηλαδή στα 4.65m.

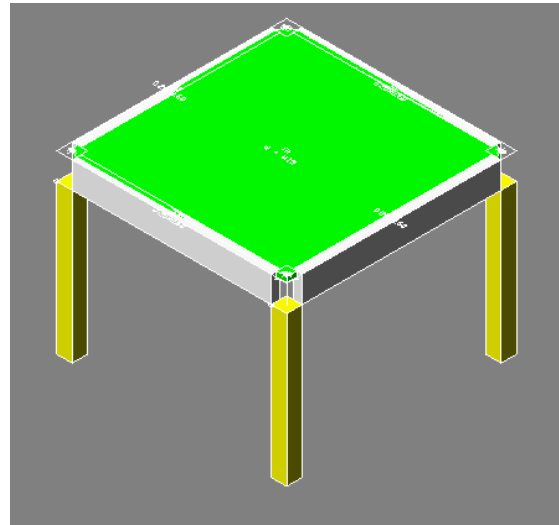
ΕΠΙΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΣΤΟ STRAD

Το δομικό προσομοίωμα που εμφανίζεται στο Σχήμα 1 απλοποιεί ιδιαιτερότητες, όπως η διπλή εκκεντρότητα. Απλοποιήσεις παρόμοιες με αυτή γίνονται συχνά από τους μελετητές όταν το λογισμικό που χρησιμοποιούν αδυνατεί να καλύψει πιο ακριβή προσομοίωση ή όταν δεν τις θεωρούν σημαντικές (ακρίβεια μηχανικού).

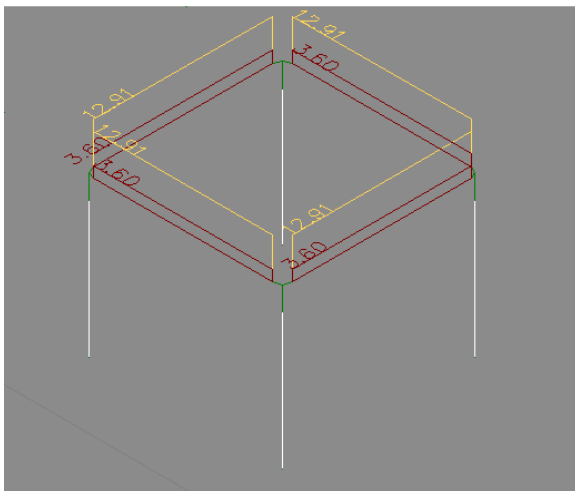
Εισάγεται ο ίδιος φορέας στο πρόγραμμα STRAD, χωρίς τροποποιήσεις του προσομοιώματος, δίνοντας στην κεφαλή υποστυλωμάτων στερεό κόμβο 0.6m και επιλύεται.



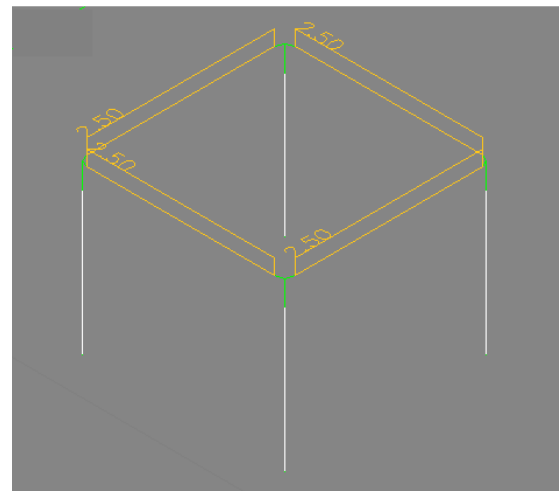
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 8: Ο φορέας στο STRAD. (α) Κάτοψη, (β) Τρισδιάστατη απεικόνιση, (γ) Αρχική (default) κατανομή μόνιμων φορτίων, (δ) Αρχική (default) κατανομή κινητών φορτίων

Πίνακας 7: Εντατικά μεγέθη

	Από μόνιμα φορτία			Από κινητά φορτία			Από συνδυασμό G+0.3Q		
	N	Q	M	N	Q	M	N	Q	M
Υποστύλωμα									
STRAD	70.92	5.43	6.87	12.20	1.05	1.33	74.58	5.75	7.27
ΟΑΣΠ	75.41	6.10	7.97	12.00	1.31	1.71	79.01	6.50	8.48
Παρεία δοκού									
STRAD	5.43	29.05	11.93	1.05	5.62	2.31	5.75	30.74	12.62
ΟΑΣΠ	0.00	29.93	11.10	0.00	5.97	2.50	0.00	31.72	11.84

Τροποποίηση προσομοίωσης του φορέα στο STRAD

Τροποποιείται το προσομοίωμα ώστε να είναι ίδιο με αυτό που εκλέχθηκε στο Παράδειγμα 1. Η τροποποίηση περιλαμβάνει τα εξής: Κατάργηση της μιας εκκεντρότητας. Εφαρμογή συνεργαζόμενου πλάτους ίσο με 1.03m. Υποστυλώματα με στερεό κόμβο τέλους ίσο με 0.3m. Διαφραγματική λειτουργία με παράλειψη των αξονικών παραμορφώσεων δοκών. Επιβολή φορτιστικού προσομοίωματος του Σχήματος 2. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

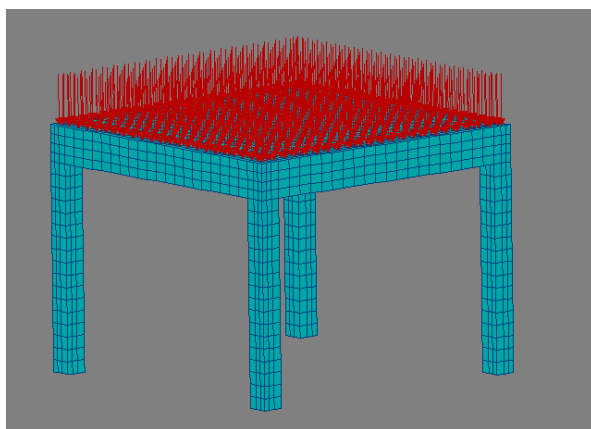
Πίνακας 8: Εντατικά μεγέθη

	Από μόνιμα φορτία			Από κινητά φορτία			Από συνδυασμό G+0.3Q		
	N	Q	M	N	Q	M	N	Q	M
Υποστύλωμα									
STRAD	75.41	6.10	7.97	12.00	1.31	1.71	79.01	6.50	8.48
ΟΑΣΠ	75.41	6.10	7.97	12.00	1.31	1.71	79.01	6.50	8.48
Παρειά δοκού									
STRAD	0.00	29.93	11.10	0.00	5.97	2.50	0.00	31.72	11.84
ΟΑΣΠ	0.00	29.93	11.10	0.00	5.97	2.50	0.00	31.72	11.84

ΔΟΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ GT.STRUDL

Διαμορφώνεται στο πρόγραμμα GT.STRUDL ένα πιο αναλυτικό δομικό προσομοίωμα με τρισδιάστατα στοιχεία και με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Παραδείγματος και φορτίζεται με ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο Q ίσο με 2.0kN.

Ένα τέτοιο προσομοίωμα παρουσιάζει ένα πρόβλημα που αφορά στη δυσκαμψία της δοκού η οποία πρέπει να ληφθεί μειωμένη. Για την προσέγγιση του προβλήματος πραγματοποιούνται δοκιμές για να εξακριβωθεί αν η μείωση του Μέτρου Ελαστικότητας εκφράζει και σε ποιο βαθμό την μείωση της δυσκαμψίας. Επιβεβαιώνεται ότι με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας επιτυγχάνεται η απαιτούμενη μείωση της δυσκαμψίας της δοκού.



Σχήμα 9: Φορέας με τρισδιάστατα στοιχεία

Η τομή στη βάση ενός υποστυλώματος και στην παρειά μιας δοκού δίνει τα αποτελέσματα που αναγράφονται στον Πίνακα 9.:

Πίνακας 9: Αποτελέσματα φορέα με τρισδιάστατα στοιχεία

	N	Q	M
Υποστύλωμα	12.5	1.02	1.33
Παρειά δοκού	0.5	5.23	1.23

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που δίνονται στο Παράδειγμα 1 με αυτά που προέκυψαν από το προσομοίωμα του STRAD και από το προσομοίωμα με τα τρισδιάστατα στοιχεία όπως περιγράφηκε στο GT.STRU DL, για ομοιόμορφο κατανεμημένο κινητό φορτίο ίσο με 2.0kN.

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

	N	Q	M
Υποστύλωμα			
STRAD	12.20	1.05	1.33
GT.STRU DL	12.50	1.02	1.33
ΟΑΣΠ	12.00	1.31	1.71
Παρειά δοκού			
STRAD	1.05	5.62	2.31
GT.STRU DL	0.50	5.23	1.23
ΟΑΣΠ	0.00	5.97	2.50

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ

Τέλος ελέγχονται οι βυθίσεις της κεφαλής των υποστυλωμάτων για κινητά φορτία. Αυτή δίνεται από την εξίσωση:

$$P = \frac{E \cdot A}{L} \cdot \delta \quad (6)$$

όπου P είναι το αξονικό φορτίο, E το μέτρο ελαστικότητας και A το εμβαδόν. Όταν επιβληθεί η φόρτιση προκύπτει συνολικό φορτίο 48kN ή 12kN για κάθε υποστύλωμα. Εφαρμόζοντας την σχέση (1) για μέτρο ελαστικότητας $E = 2.9 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$, εμβαδόν διατομής A ίσο με $0.35 \times 0.35 = 0.1225 \text{ m}^2$ και παραμορφώσιμο μήκος υποστυλώματος 3.7m προκύπτει τιμή βύθισης $\delta = 12.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα βύθισης κεφαλής των υποστυλωμάτων

	Βύθιση (m)
STRAD	$12.5 \cdot 10^{-6}$
GT-STRU DL	$12.5 \cdot 10^{-6}$
SAP2000	$14 \cdot 10^{-6}$

Η απόκλιση 10.7% του SAP2000, από τη σωστή τιμή, πιθανώς να οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού των μετατοπίσεων που αντί για το παραμορφώσιμο μήκος να χρησιμοποιείται το συνολικό.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο έλεγχος των προγραμμάτων ανάλυσης και σχεδιασμού κατασκευών είναι απαραίτητη ανάγκη. Τα παραδείγματα του ΟΑΣΠ είναι μία καλή αρχική προσέγγιση. Η εξέταση των προσομοιωμάτων και των αποτελεσμάτων σχεδιασμού πρέπει να γίνεται διαδοχικά προσεγγίζοντας το πρόβλημα όσο είναι δυνατόν με αναλύσεις με το χέρι. Η κάθε απλοποίηση στο προσομοίωμα π.χ. από διπλή σε μονή εκκεντρότητα δοκών, κατανομή φορτίου κ.λ.π. έχει επίδρασή στα τελικά μεγέθη σχεδιασμού. Η χρήση ενός προγράμματος Η/Υ και μόνο, από το μελετητή, για τον έλεγχο κάποιου άλλου προγράμματος εγκυμονεί δύο κινδύνους: Πρώτον, επειδή οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι αποτελούν μία προσέγγιση της “ακριβούς” λύσης, θα πρέπει η ακρίβεια που χρησιμοποιείται κατά τη σύνταξη της λύσης – πρότυπο (δομικό και φορτιστικό προσομοίωμα) να είναι η μέγιστη δυνατή και σαφώς μεγαλύτερη από την ακρίβεια των προγραμμάτων των οποίων ελέγχεται η ορθότητα. Διαφορετικά μπορεί να θεωρηθούν ως λανθασμένες οι λύσεις που είναι ακριβέστερες από τη λύση – πρότυπο. Δεύτερον, η απόλυτη αποδοχή αποτελεσμάτων από ένα πρόγραμμα συνεπάγεται και την υιοθέτηση όλων των σφαλμάτων που αυτό περιέχει στα αποτελέσματά του. Η μελέτη φορέων για τους οποίους υπάρχει αναλυτική λύση ή είναι δυνατόν να βρεθεί αναλυτική λύση παράλληλα με τη χρήση προγραμμάτων, φαίνεται να είναι η καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος. Ένα τέτοιο φιλόδοξο πρόγραμμα ελέγχου θα πρέπει να το αναλάβει ο ΟΑΣΠ ως αρμόδιος φορέας και εφόσον διαθέτει τα απαραίτητα μέσα, συνεχίζοντας την πρωτοπόρα δουλειά της αντίστοιχης ομάδας εργασίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αβραμίδης Ι, Αθανατοπούλου Α, Αναστασιάδης Κ, Μορφίδης Κ, Πρότυπα αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης κατασκευών για την ορθή εφαρμογή του ΕΑΚ για τον έλεγχο προγραμμάτων Η/Υ. Εκδόσεις Αίβαζή, Θεσσαλονίκη 2005.
- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, www.oasp.gr
- Beton Kalender 1984, Πίνακες τετραέρειστων ορθογωνικών πλακών με ομοιόμορφη καθολική φόρτιση, Εκδότης Γκιούρδας Μ., Αθήνα 1985, σελ.287.
- GT.STRUDL, Structural Analysis and Design Software, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, Version 28
- Hahn, Πλάκες Πλαίσια Συνεχείς Δοκοί, Β΄ Έκδοση, Εκδότης Γκιούρδας Μ., Αθήνα 1974, σελ.210
- SAP 2000 Computer & Structures Inc V. 7.42
- Stiglat Wipfel, Πλάκες, Εκδότης Γκιούρδας Μ., Αθήνα 1976, σελ.172.
- STRAD – Ανάλυση και Διαστασιολόγηση Κατασκευών Ο/Σ, 4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού, Έκδοση 2006.