

Σεισμική αποτίμηση και μελέτη αποκατάστασης της Οθωμανικής Βιβλιοθήκης στο Κάστρο Ιωαννίνων

Νικόλαος Παπαγεωργίου – Πολ. Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΣΜΑ/ΣΘΕΤ, Ε.Α.Π.
nikosepap@gmail.com, std147870@ac.eap.gr

Κωνσταντίνος Κατάκαλος – Αναπληρωτής
Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος ΣΕΠ ΣΜΑ/ΣΘΕΤ Ε.Α.Π.

kkatakal@civil.auth.gr,
katakalos.konstantinos@ac.eap.gr

Περίληψη – Η διερεύνηση αφορά στη σεισμική αποτίμηση και στη μελέτη αποκατάστασης και ανασχεδιασμού της Οθωμανικής Βιβλιοθήκης στο Κάστρο Ιωαννίνων, μνημειακής κατασκευής του 18^{ου} αιώνα. Αρχικά μελετάται και παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη του μνημείου, περιγράφεται αναλυτικά ο φέρων οργανισμός του από κατακόρυφες τοιχοποιίες τρίστρωτες και δίστρωτες αργολιθοδομές και αργές και ημιλαξευτές θολοδομίες. Πραγματοποιείται η σεισμική αποτίμηση του μνημείου, καταδεικνύονται οι ανεπάρκειές του και τελικά αναπτύσσεται μια πρόταση ανασχεδιασμού και ενίσχυσης του φέροντος οργανισμού του.

Λέξεις-Κλειδιά: Αποκατάσταση φέρουσας τοιχοποιίας, Θολοδομία, Αποτίμηση, Ενίσχυση, Ανασχεδιασμός

Ι. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Οθωμανική Βιβλιοθήκη βρίσκεται δυτικά της βορειοανατολικής ακρόπολης του Κάστρου Ιωαννίνων, κτισμένη έξω από το θρησκευτικό-εκπαιδευτικό συγκρότημα της Ακρόπολης Ασλάν Πασά. Ο χαρακτηρισμός του κτιρίου σχετικά με την πιθανή λειτουργία του ως «βιβλιοθήκης» οφείλεται στο μεγάλο αριθμό χειρογράφων και έντυπων βιβλίων, που περιείχε. Αποτελεί κτίσμα του 18ου αιώνα αλλά η σημερινή του μορφή είναι το αποτέλεσμα ποικίλων επεμβάσεων, που έχουν αλλοιώσει την αρχική του όψη. Είναι κηρυγμένη ως προέχον βυζαντινό μνημείο και διατηρητέος αρχαιολογικός και ιστορικός χώρος σύμφωνα με το ΠΔ11-6-25(ΦΕΚ 152/Α/16-6-1925).

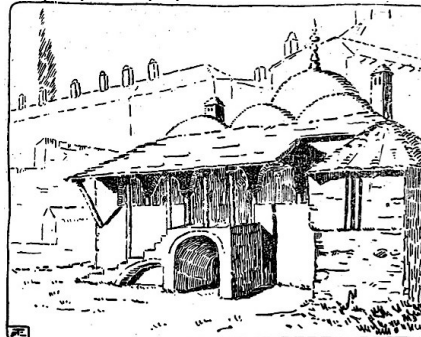
Α. Συνοπτικό ιστορικό επεμβάσεων μνημείου

Αρχικά, οι τρούλοι της βιβλιοθήκης ήταν μολυβδοσκεπαστοι και έφεραν στις κορυφές τους τα χαρακτηριστικά "άλεμ". Περί το 1920 παρατηρείται τροποποιημένη η υφή της επιφάνειας των τρούλων, με καθαίρεση της κάλυψης με μολύβι. Συγκεκριμένα η κάλυψη του προστώου και του κλιμακοστασίου εισόδου γίνεται με μονόρριχτη ξύλινη κεραμοσκεπή. Η στέγη στηρίζεται σε τέσσερις κατακόρυφους στύλους, που εδράζονται στη σκάλα και σε δύο λοξές ξύλινες αντηρίδες που εδράζονται στον τοίχο. Σημειώνεται ότι η κήρυξη του μνημείου έγινε με αυτή τη μορφή.

Την περίοδο 1926 -1936 καταρρέουν πλήρως οι τρεις τρουλίσκοι του προστώου, το οποίο πλέον καλύπτεται με λαμαρίνα καθώς και το νότιο τμήμα του κεντρικού τρούλου. Το 1936 έχει πλέον καθαιρεθεί και το εξέχον τμήμα του στεγάστρου εκτός από ένα μικρό τμήμα στο πλατύσκαλο.

Περί το 1950 βελτιώνεται η στέγαση του ενδιάμεσου χώρου με τετράρριχτη κεραμοσκεπή. Επίσης, περίπου την ίδια περίοδο, γεμίζουν τα ανοίγματα της όψης του προστώου με οπτοπλινθοδομή και τα πλευρικά με λιθοδομή. Το 1963 καταρρέει και το υπόλοιπο τμήμα του μεγάλου τρούλου.

Στη δεκαετία 1971-1980 πραγματοποιήθηκαν εργασίες αναστήλωσης – ανοικοδόμησης. Ανακατασκευάστηκε η εξωτερική παρεία του ανατολικού τοίχου με ισόδομη λιθοδομή από ασβεστόλιθους. Ακολούθησε ανοικοδόμηση του τυμπάνου και του μεγάλου τρούλου και ανακατασκευή των μικρών τρούλων και επικάλυψη με λιθόπλακες. Στο προστώο, έγινε αντικατάσταση του ξύλινου δαπέδου από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, διάνοιξη των ανοιγμάτων και τοποθέτηση ξύλινων θλιπτήρων-ελκυστήρων στην τοξοστοιχία και επικάλυψη της στέγης με λιθόπλακες. Σε αυτή τη μορφή, που προέκυψε από την αναστήλωση, παραμένει μέχρι σήμερα η Οθωμανική Βιβλιοθήκη.



Εικόνα 1. Σχέδιο του Ξυγγόπουλου (1926) – Μορφή κήρυξης μνημείου.



Εικόνα 2. Φωτογραφία (2022) – Σημερινή μορφή μνημείου.

Β. Κυρίαρχοι στόχοι της διερεύνησης

Αρχικό στόχο αποτελεί η σεισμική αποτίμηση και η κατάδειξη των ανεπαρειών του μνημείου και έπειτα η μελέτη ανασχεδιασμού του, βάσει μιας πρότασης αποκατάστασης και ενίσχυσης του φορέα του.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

A. Αποτύπωση και Τεκμηρίωση φέροντος οργανισμού

Τα στατικά σχέδια αποτύπωσης και παθολογίας του μνημείου αντλήθηκαν από τον Πολιτικό Μηχανικό κ. Καίλη Δημήτρη, υπεύθυνο της ομάδας Στατικής Μελέτης μελλοντικής αποκατάστασης του μνημείου και με τη συγκατάθεση του Δήμου Ιωαννιτών.

Σύμφωνα με τα σχέδια αυτά, η κάτοψη της κατασκευής συντίθεται από τρία τμήματα, που ορίζονται από άοπλες φέρουσες τοιχοποιίες και μία τοξοστοιχία. Το πρώτο αφορά το κλιμακοστάσιο και το δωμάτιο εισόδου στο υπόγειο, το δεύτερο αφορά το προστώο, το διάδρομο και τα δύο δωμάτια και το τρίτο αφορά το δωμάτιο με το μεγάλο τρούλο. Το προστώο εκτείνεται στο υπόγειο και στο ισόγειο, ενώ τα δωμάτια εκτείνονται μόνο στο ισόγειο.

Η οροφή υπογείου αποτελείται από οριζόντια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, ενώ η στέγαση του προστώου γίνεται με μονόρριχτη ξύλινη στέγη που φέρει λιθόπλακες. Στην οροφή ισόγειου η κάλυψη γίνεται με θολοδομίες που φέρουν λιθόπλακες. Στα μικρά δωμάτια η θολοδομία αποτελείται από λοφία (σφαιρικά τρίγωνα) και μικρούς τρούλους, ενώ στο μεγάλο δωμάτιο από γωνιαίες κόγχες ημιγωνίων, λοφία, κανονικό οκτάγωνο (τύμπανο) και μεγάλο τρούλο. Διερευνητικές εργασίες έδειξαν ότι οι φέρουσες τοιχοποιίες θεμελιώνονται εντός του εδάφους σε βάθος άνω του 1.00m.

Ο τρόπος δόμησης της τοιχοποιίας και της θολοδομίας του μνημείου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ I
ΤΡΟΠΟΣ ΔΟΜΗΣΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΚΑΙ ΘΟΛΟΔΟΜΙΑΣ

Επιμέρους δομικό στοιχείο	Τρόπος δόμησης τοιχοποιίας και θολοδομίας
Κατακόρυφοι τοίχοι	Τρίστρωτη αργολιθοδομή με ίδιες εξωτερικές παρειές (1)
Τοξοστοιχία	Δίστρωτη αργολιθοδομή με διάτονους λίθους (2)
Λοφία (σφαιρικά τρίγωνα) και Ημιγώνια	Μονόστρωτη αργολιθοδομή (3)
Αναδομημένο τύμπανο μεγάλου τρούλου	Δίστρωτη ημιλαξευτή με διάτονους λίθους (4)
Αναδομημένοι τρούλοι	Μονόστρωτη ημιλαξευτή (5)

Η εκτίμηση των αντοχών έγινε σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ, βάσει των θλιπτικών αντοχών λιθωσώματος και κονιάματος. Οι επιμέρους αντοχές, αναλόγως του τρόπου δόμησης, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ II
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΚΑΙ ΘΟΛΟΔΟΜΙΑΣ

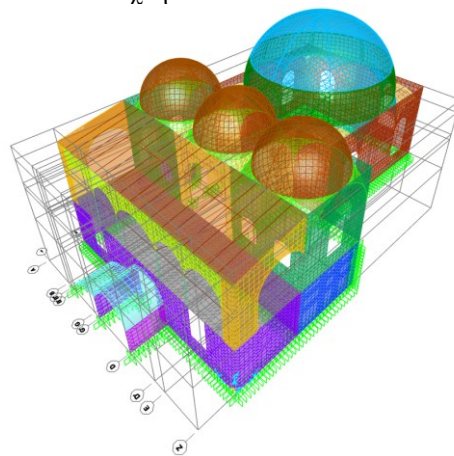
Τρόπος δόμησης	Θλιπτική αντοχή	Διατμητική αντοχή	Εφελκ. Αντοχή $\theta=0^\circ$	Εφελκ. Αντοχή $\theta=90^\circ$
(1)	1.31 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.10 MPa	0.05 MPa
(2)	3.56 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.10 MPa	0.05 MPa
(3)	3.56 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.10 MPa	0.05 MPa
(4)	4.56 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.10 MPa	0.05 MPa
(5)	4.56 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.10 MPa	0.05 MPa

B. Προσομοίωση φέροντος οργανισμού

Ο φέρων οργανισμός του μνημείου προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό ανάλυσης SAP2000 της εταιρείας CSI.

Για τη φέρουσα τοιχοποιία, την πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος και τις θολοδομίες έγινε διακριτοποίηση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους συνεχούς μέσου, δύο διαστάσεων (thick shell) τεσσάρων (4) ή τριών (3) κόμβων, ενώ για τους κίονες της τοξοστοιχίας και τις ξύλινες δοκούς, με ραβδωτά στοιχεία (beam elements) δύο (2) κόμβων. Κάθε κόμβος διαθέτει έξι (6) βαθμούς ελευθερίας, τρεις μεταφορικούς και τρεις στροφικούς.

Για τη θεμελίωση θεωρήθηκαν συνθήκες άρθρωσης σε κάθε κόμβο στη βάση των τοιχοποιιών ως ένα ρεαλιστικό σενάριο θεμελίωσης για τη μέθοδο αποτίμησης σε όρους δυνάμεων που επιλέχθηκε.



Εικόνα 3. Τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα φορέα.

C. Μέθοδος ανάλυσης φέροντος οργανισμού

Για την ανάλυση του μνημείου εφαρμόστηκε ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση με καθολικό δείκτη συμπεριφοράς $q=1.20$ για στόχο αποτίμησης B1, σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ. Για τον προσδιορισμό της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου σε κάθε κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση.

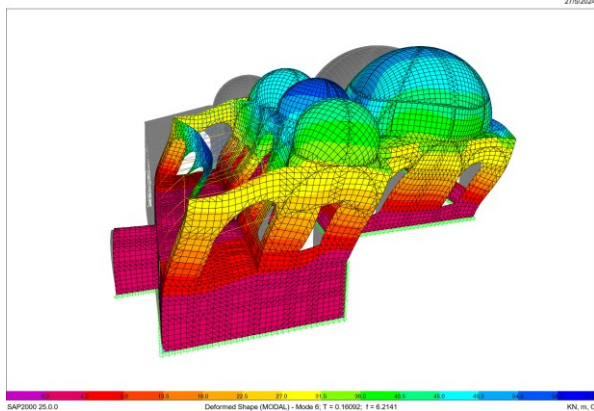
D. Μέθοδος ελέγχων επάρκειας

Ο έλεγχος επάρκειας των κατακόρυφων τοίχων και της τοξοστοιχίας, μελών είτε πλαστικών είτε ψαθυρών, έγινε σε όρους δυνάμεων σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ, για εντός και εκτός επιπέδου εντατικές καταστάσεις, με βάση τις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού. Ο έλεγχος εντός και εκτός επιπέδου πραγματοποιήθηκε για κάθε όψη ξεχωριστά σε διατομές των κρίσιμων θέσεων ελέγχου πεσσών, υπερθύρων και επιμήκων τοίχων, όπου αναμένεται εμφάνιση βλαβών. Ο εκτός επιπέδου έλεγχος πραγματοποιήθηκε και σε επιπλέον οριζόντιες και κατακόρυφες θέσεις-διατομές ελέγχου, όπου αναπτύσσονταν μέγιστες εκτός επιπέδου ροπές.

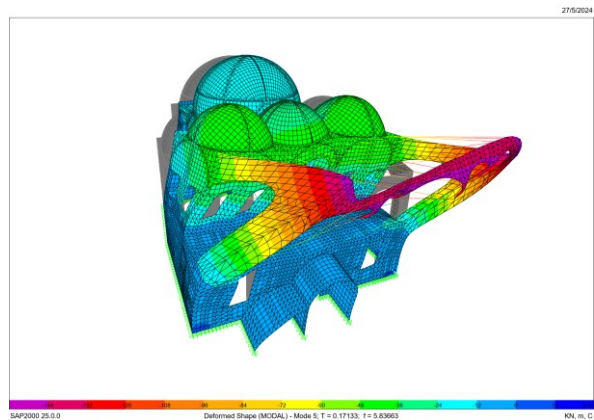
Για τα στοιχεία της θολοδομίας, ο έλεγχος επάρκειας σε όρους δυνάμεων κατά ΚΑΔΕΤ δεν έχει εφαρμογή. Επομένως, για τα στοιχεία αυτά, ως κριτήριο αστοχίας υιοθετήθηκε το κριτήριο υπέρβασης των κύριων εφελκυστικών τάσεων.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ

A. Δεσπόζουσες ιδιομορφές

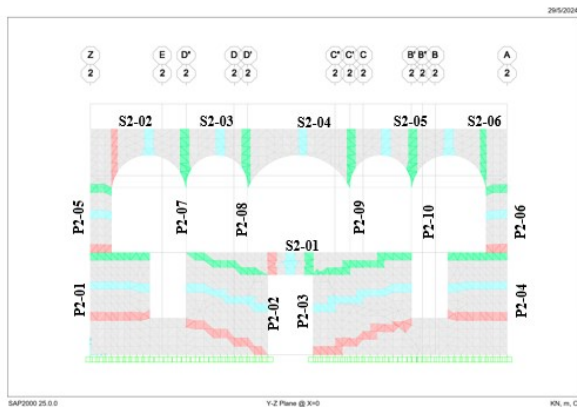


Εικόνα 4. Δεσπόζουσα ιδιομορφή διεύθυνσης X, $T_6=0.16s$
Διεγείρουσα μάζα $U_x=0.59$.



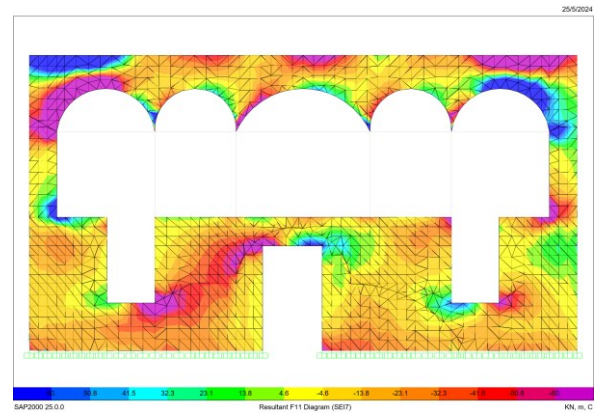
Εικόνα 5. Δεσπόζουσα ιδιομορφή διεύθυνσης Y, $T_5=0.17s$
Διεγείρουσα μάζα $U_y=0.38$.

B. Έλεγχοι επάρκειας χαρακτηριστικού κατακόρυφου τοίχου

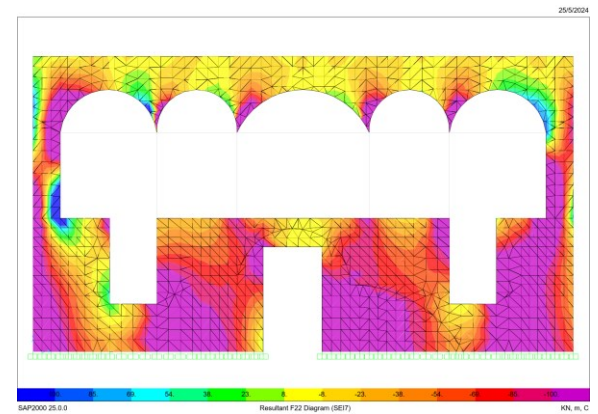


Εικόνα 6. Θέσεις και διατομές ελέγχου χαρακτηριστικού κατακόρυφου τοίχου και τοξοστοιχίας στη διεύθυνση Y

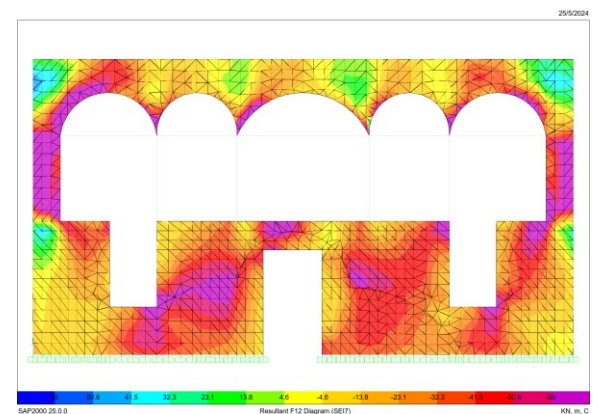
1) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε εντατική κατάσταση εντός επιπέδου κατακόρυφης τοιχοποιίας – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός $SEI7 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q + 0.30Ex - 1.00Ey)$



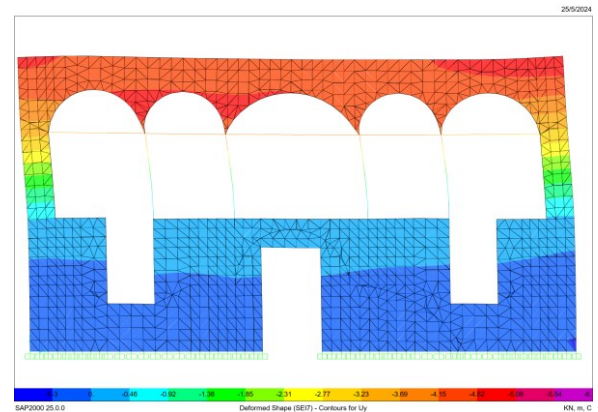
Εικόνα 7. Οριζόντιες αξονικές δυνάμεις F11 (kN/m)



Εικόνα 8. Κατακόρυφες αξονικές δυνάμεις F22 (kN/m)



Εικόνα 9. Εντός επιπέδου τέμνουσες δυνάμεις F12 (kN/m)



Εικόνα 10. Εντός επιπέδου οριζόντιες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)

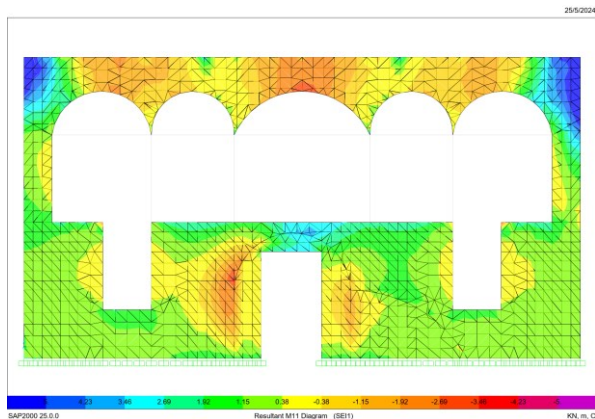
Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα 2									
Θέση ελέγχου		L (m)	t (m)	H (m)	ϕ_{lim} (m)	Είδος	Ενίσχυση		
Πεσός		P2-05	0.58	0.60	1.80	0.10	Διστρωτή	-	Όχι
Οπλισμένη		Όχι	-	-	-	-	-	-	-
Εντός επιπέδου ροπή κάμψης - Εύρεση ικανοτικής τέμνουσας									
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N_{ed} (kN) (+ Θλίψη)	V_{ed}	M_{ed} (kNm)	M_{ed} (kNm)	e (m)	H_0 (m)	V_1 (kN)	Διατομή υπό:
SE15	P2-05-B	-115.96	0.141	27.91	-20.87	0.18	1.15	24.21	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-M	-56.49	0.069	14.95	-1.05	0.02		12.97	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-T	-9.44	0.012	2.68	11.72	1.24		2.32	Θλίψη και ασ-φδ
SE16	P2-05-B	-162.54	0.198	36.07	-20.97	0.13	1.16	31.15	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-M	-74.47	0.091	19.17	-0.57	0.01		16.56	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-T	-5.52	0.007	1.57	11.63	2.11		1.36	Θλίψη και ασ-φδ
SE17	P2-05-B	17.50	-	-	-	-	0.97	-	Εφελυσμός
	P2-05-M	-27.62	0.034	7.63	-3.82	0.14		7.88	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-T	-72.02	0.088	18.61	-22.24	0.31		19.22	Θλίψη και ασ-φδ
SE18	P2-05-B	-29.08	0.035	8.02	19.02	0.65	0.97	8.25	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-M	-45.60	0.056	12.27	-3.34	0.07		12.62	Θλίψη και ασ-φδ
	P2-05-T	-68.10	0.083	17.71	-22.33	0.33		18.21	Θλίψη και ασ-φδ
Εντός επιπέδου τέμνουσας - Έλεγχος αναπτυσσόμενης και ικανοτικής τέμνουσας									
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	L' (m)	V_{ed}	f_{td1} (kPa)	f_{td2} (kPa)	V_R (kN)	V_{ed} (kN)	V_{td} (kN)	Έλεγχος V_{ed}/V_{td} (%)
SE15	P2-05-B	0.32	0.252	210.71	316.65	40.77	24.21	42.95	177.36 Ανάτρεψα
	P2-05-M	0.58	0.069	123.94	142.42	42.76	12.97	33.62	259.21 Ανάτρεψα
	P2-05-T	Ανατροπή	-	-	-	-	2.32	37.40	- Ανατροπή
SE16	P2-05-B	0.48	0.240	205.97	304.80	58.77	31.15	53.22	170.81 Ανάτρεψα
	P2-05-M	0.58	0.091	137.24	163.27	47.35	16.56	41.95	253.32 Ανάτρεψα
	P2-05-T	Ανατροπή	-	-	-	-	1.36	44.89	- Ανατροπή
SE17	P2-05-B	Ανατροπή	-	-	-	-	0.00	-41.23	- Ανατροπή
	P2-05-M	0.45	0.043	106.29	118.04	28.56	7.88	42.24	535.70 Ανάτρεψα
	P2-05-T	Ανατροπή	-	-	-	-	19.22	-53.45	- Ανατροπή
SE18	P2-05-B	Ανατροπή	-	-	-	-	8.25	-30.96	- Ανατροπή
	P2-05-M	0.58	0.056	115.14	129.80	39.72	12.62	-33.91	268.67 Ανάτρεψα
	P2-05-T	Ανατροπή	-	-	-	-	18.21	-45.96	- Ανατροπή

Εικόνα 11. Έλεγχοι επάρκειας εντός επιπέδου πεσού P2-05.

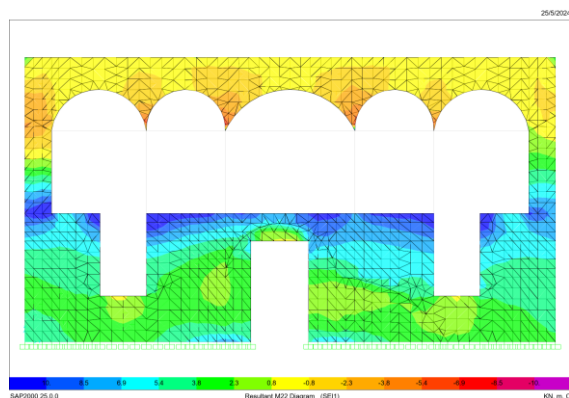
Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα 2										
Θέση ελέγχου		L (m)	t (m)	H (m)	ϕ_{lim} (m)	Είδος	Ενίσχυση			
Υπερθύρο		S2-06	1.15	0.40	2.05	0.19	Διστρωτή	-	-	Όχι
Οπλισμένη		Όχι	-	-	-	-	-	-	-	-
Εντός επιπέδου ροπή κάμψης - Εύρεση ικανοτικής τέμνουσας										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N_{ed} (kN) (-Θλίψη)	V_{ed}	M_{ed} (kNm)	M_{ed} (kNm)	e (m)	H_0 (m)	V_1 (kN)	Διατομή υπό:	
SE15	S2-06-L	-18.55	0.017	10.46	-2.37	0.13	2.05	5.10	Θλίψη	
	S2-06-M	-13.00	0.012	7.37	-23.30	1.72		3.60	Θλίψη	
	S2-06-R	-21.22	0.019	11.93	-52.35	2.47		5.82	Θλίψη	
SE16	S2-06-L	-7.21	0.007	4.11	-7.63	1.06	2.05	2.01	Θλίψη	
	S2-06-M	-3.05	0.003	1.75	-19.91	6.53		0.85	Θλίψη	
	S2-06-R	-11.27	0.010	6.40	-50.82	4.51		3.12	Θλίψη	
SE17	S2-06-L	-0.96	0.001	0.55	3.34	3.48	2.05	0.27	Θλίψη	
	S2-06-M	-4.87	0.004	2.78	22.33	4.59		1.36	Θλίψη	
	S2-06-R	3.36	-	-	31.20	-		-	Εφελυσμός	
SE18	S2-06-L	10.39	-	-	-1.92	-	1.94	-	Εφελυσμός	
	S2-06-M	5.08	-	-	24.71	-		-	Εφελυσμός	
	S2-06-R	13.31	-	-	32.73	-		-	Εφελυσμός	
Εντός επιπέδου τέμνουσας - Έλεγχος αναπτυσσόμενης και ικανοτικής τέμνουσας										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	L' (m)	V_{ed}	f_{td1} (kPa)	f_{td2} (kPa)	V_R (kN)	V_{ed} (kN)	V_{td} (kN)	Έλεγχος V_{ed}/V_{td} (%)	
SE15	S2-06-L	1.15	0.017	84.46	93.06	38.85	5.10	23.38	458.24 Ανάτρεψα	
	S2-06-M	Ανατροπή	-	-	-	-	3.60	36.63	- Ανατροπή	
	S2-06-R	Ανατροπή	-	-	-	-	5.82	56.04	- Ανατροπή	
SE16	S2-06-L	Ανατροπή	-	-	-	-	2.01	22.40	- Ανατροπή	
	S2-06-M	Ανατροπή	-	-	-	-	0.85	32.69	- Ανατροπή	
	S2-06-R	Ανατροπή	-	-	-	-	3.12	52.39	- Ανατροπή	
SE17	S2-06-L	Ανατροπή	-	-	-	-	0.27	6.26	- Ανατροπή	
	S2-06-M	Ανατροπή	-	-	-	-	1.36	-21.93	- Ανατροπή	
	S2-06-R	Ανατροπή	-	-	-	-	0.00	-2.06	- Ανατροπή	
SE18	S2-06-L	Ανατροπή	-	-	-	-	0.00	5.28	- Ανατροπή	
	S2-06-M	Ανατροπή	-	-	-	-	0.00	-25.87	- Ανατροπή	
	S2-06-R	Ανατροπή	-	-	-	-	0.00	-5.71	- Ανατροπή	

Εικόνα 12. Έλεγχοι επάρκειας εντός επιπέδου υπερθύρου S2-06.

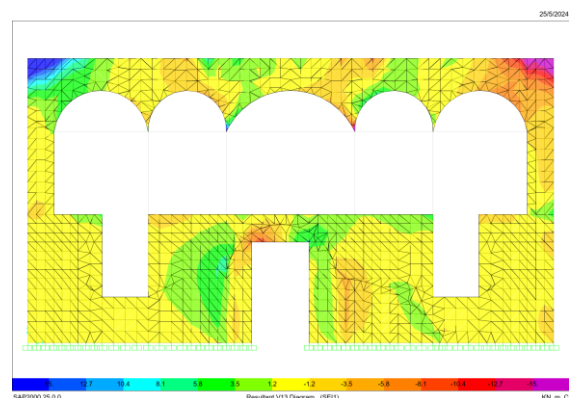
2) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε εντατική κατάσταση εκτός επιπέδου κατακόρυφης τοιχοποιίας – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός SE11 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q + 1.00Ex + 0.30Ey)



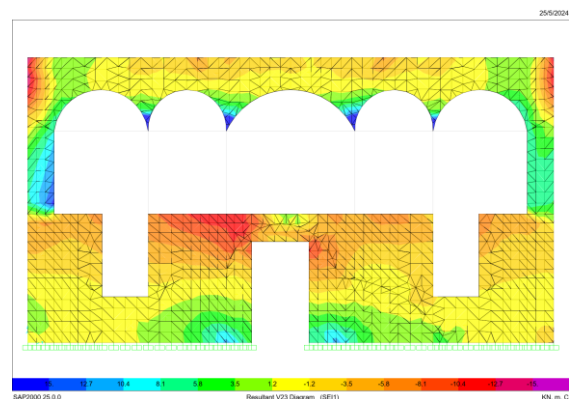
Εικόνα 13. Εκτός επιπέδου ροτές κάμψης περί κατακ. άξονα M11 (kNm/m)



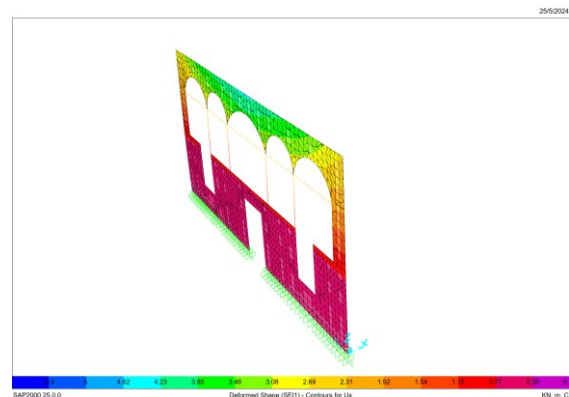
Εικόνα 14. Εκτός επιπέδου ροτές κάμψης περί οριζόντιο άξονα M22 (kNm/m)



Εικόνα 15. Εκτός επιπέδου τέμνουσες δυνάμεις εντός επιπέδου 2-3 V13 (kN/m)



Εικόνα 16. Εκτός επιπέδου τέμνουσες δυνάμεις εντός επιπέδου 1-3 V23 (kN/m)



Εικόνα 17. Εκτός επιπέδου οριζόντιες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)

Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα 2									
Θέση ελέγχου		L (m)	t (m)	H (m)	Είδος			Ενίσχυση	
Πεσσός		P2-05	0.58	0.60	1.80	Διστρωτή			Όχι
Οπλισμένη		Όχι	-	-	-	-	-	-	-
Εκτός επιπέδου ροπή περί οριζόντιο άξονα - Έλεγχος ικανοτικής τέμνουσας									
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N _{ed} (kN) (-Θλίψη)	M _{max,0} (kPa)	M _{ed} (kNm)	M ₀ (kNm)	H ₀ (m)	F _y (kN)	F _{ed} (kN)	Έλεγχος F _{ed} / F _y (%)
SEI1	P2-05-B	-14.91	43.220	4.39	5.64	1.37	3.21	6.71	208.88 Ανεπάρκεια
	P2-05-M	-25.41	73.652	7.39	0.50		5.41	5.25	97.18 Επάρκεια
	P2-05-T	-35.91	104.099	10.30	-1.79		7.54	2.77	36.74 Επάρκεια
SEI2	P2-05-B	25.13	-	-	4.11	1.80	-	3.65	- Εφελκυσμός
	P2-05-M	-16.75	48.551	4.92	1.45		2.73	3.50	128.06 Ανεπάρκεια
	P2-05-T	-54.69	158.513	15.31	0.12		8.51	2.46	28.87 Επάρκεια
SEI3	P2-05-B	-170.17	493.243	40.45	-10.31	1.21	33.43	-23.08	69.03 Επάρκεια
	P2-05-M	-85.34	247.374	22.94	1.80		18.96	-9.74	51.36 Επάρκεια
	P2-05-T	-22.85	66.235	6.66	5.03		5.51	-3.34	60.64 Επάρκεια
SEI4	P2-05-B	-130.13	377.186	32.84	-11.84	1.13	28.94	-26.15	90.35 Επάρκεια
	P2-05-M	-76.68	222.272	20.85	2.75		18.38	-11.49	62.52 Επάρκεια
	P2-05-T	-41.62	120.649	11.85	6.94		10.44	-3.65	34.98 Επάρκεια

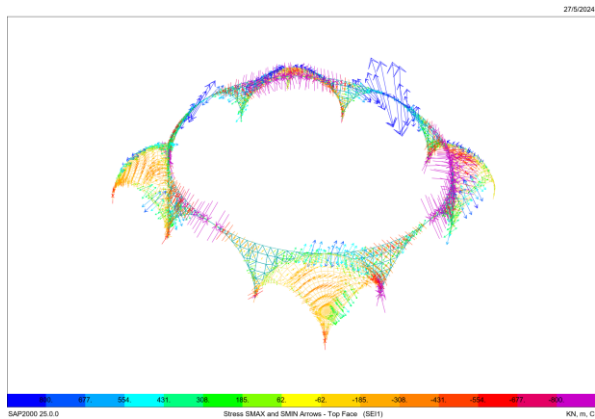
Εικόνα 18. Έλεγχοι επάρκειας εκτός επιπέδου πεσσού P2-05.

Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα 2									
Θέση ελέγχου		L (m)	t (m)	H (m)	Είδος		Ενίσχυση		
Υπερθύρο	S2-06	1.15	0.40	2.05	Διστρωτή				Όχι
Οπλισμένη	Όχι	-	-	-	-	-	-	-	-
Εκτός επιπέδου ροπή περί κατακόρυφο άξονα - Έλεγχος ικανοτικής τέμνουσας									
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N _{ed} (kN) [-Θλίξη]	M _{max,0} (kNm)	M _{ed} (kNm)	H ₀ (m)	F _y (kN)	F _{ed} (kN)	Έλεγχος F _{ed} / F _y (%)	
SEI1	S2-06-L	-25.63	2.04	1.00	1.72	1.19	-1.08	91.37	Επάρκεια
	S2-06-M	-21.76	2.04	0.33		1.19	-2.36	198.77	Ανεπάρκεια
	S2-06-R	-24.23	2.04	-5.32		1.19	-10.17	858.09	Ανεπάρκεια
SEI2	S2-06-L	-20.35	2.04	0.93	1.64	1.24	-1.04	83.26	Επάρκεια
	S2-06-M	-19.32	2.04	0.91		1.24	-1.70	136.36	Ανεπάρκεια
	S2-06-R	-16.85	2.04	-3.78		1.24	-8.79	707.46	Ανεπάρκεια
SEI3	S2-06-L	12.19	2.04	-2.93	1.46	1.40	-0.56	40.23	Επάρκεια
	S2-06-M	11.40	2.04	-1.57		1.40	3.80	270.72	Ανεπάρκεια
	S2-06-R	8.94	2.04	7.23		1.40	16.76	1195.65	Ανεπάρκεια
SEI4	S2-06-L	17.47	2.04	-3.00	1.53	1.34	-0.52	38.62	Επάρκεια
	S2-06-M	13.84	2.04	-0.99		1.34	4.46	332.90	Ανεπάρκεια
	S2-06-R	16.31	2.04	8.77		1.34	18.14	1354.74	Ανεπάρκεια

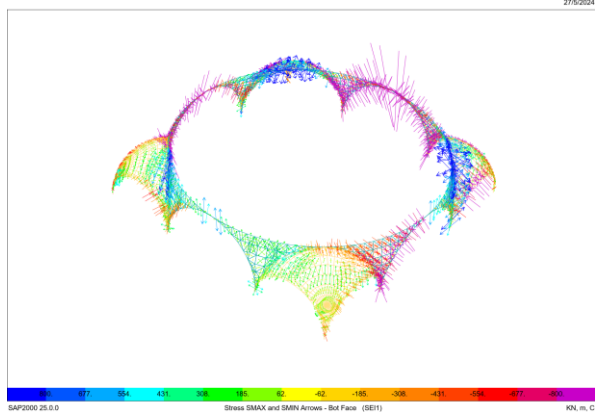
Εικόνα 19. Έλεγχοι επάρκειας εκτός επιπέδου υπερθύρου S2-06.

C. Έλεγχοι επάρκειας χαρακτηριστικών στοιχείων θολοδομίας

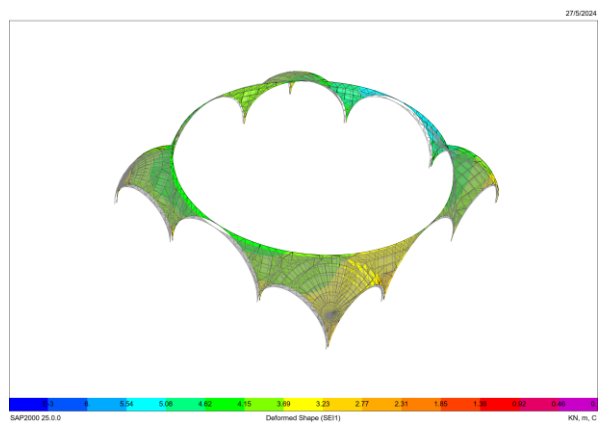
1) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε λοφία και ημιχώνια – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός SEI1 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q + 1.00Ex + 0.30Ey)



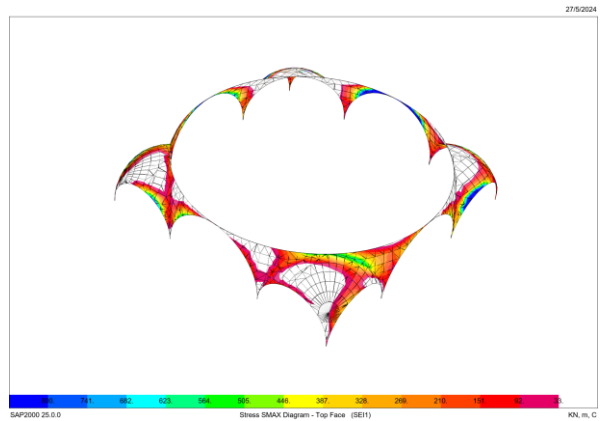
Εικόνα 20. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Άνω ίνα



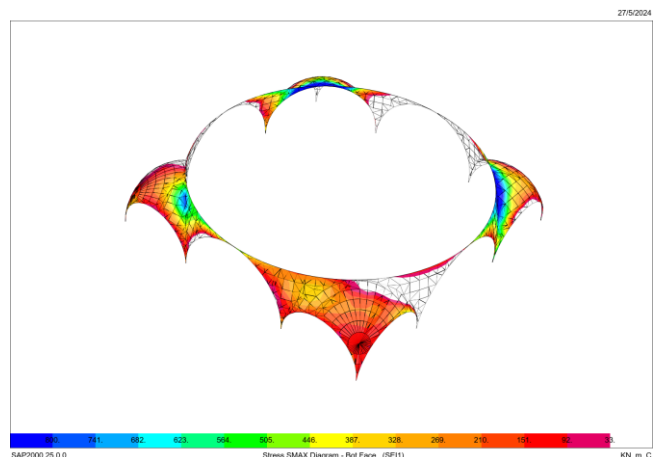
Εικόνα 21. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Κάτω ίνα



Εικόνα 22. Συνισταμένες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)

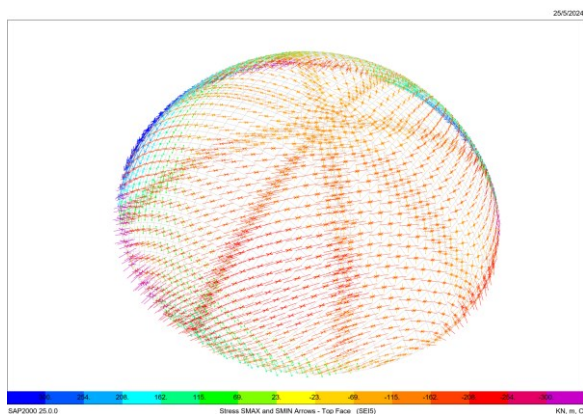


Εικόνα 23. Κατανομή τιμών μέγιστων κυρίων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις εφελκυστικής αντοχής fwt,d⁹⁰ - Άνω ίνα

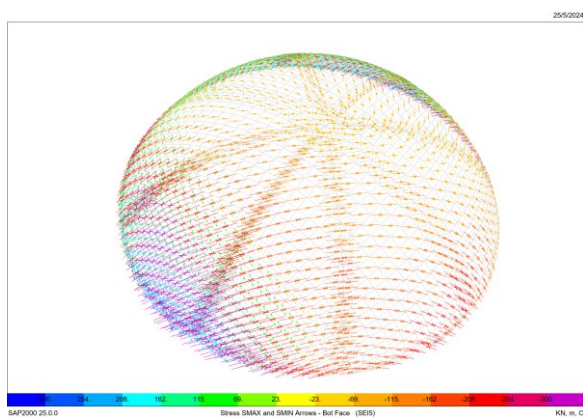


Εικόνα 24. Κατανομή τιμών μέγιστων κυρίων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις εφελκυστικής αντοχής fwt,d⁹⁰ - Κάτω ίνα

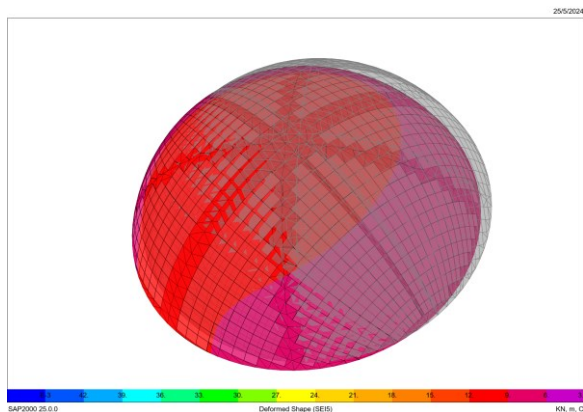
2) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε τρούλο – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός SEI5 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q + 0.30Ex + 1.00Ey)



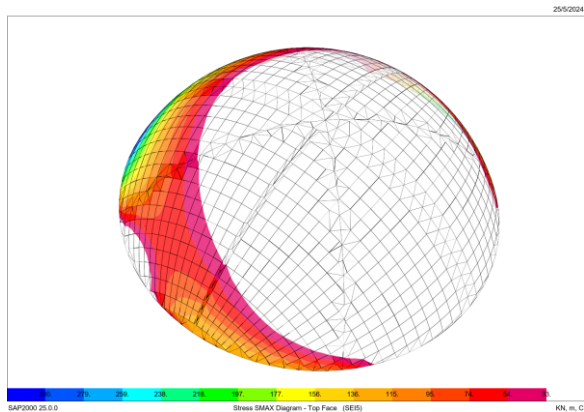
Εικόνα 25. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Άνω ίνα



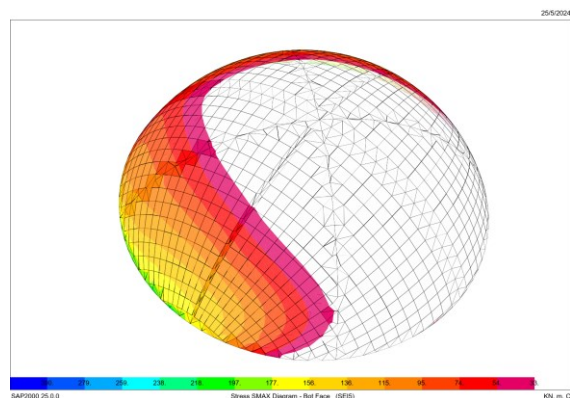
Εικόνα 26. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Κάτω ίνα



Εικόνα 27. Συνισταμένες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)



Εικόνα 28. Κατανομή τιμών μέγιστων κύριων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις εφελκυστικής αντοχής $f_{wt,d}^{90}$ - Άνω ίνα



Εικόνα 29. Κατανομή τιμών μέγιστων κύριων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις εφελκυστικής αντοχής $f_{wt,d}^{90}$ - Κάτω ίνα

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ

Από τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας προκύπτει ότι σύμφωνα με το κανονιστικό πλαίσιο του ΚΑΔΕΤ αναμένονται εκτεταμένες σημαντικές αστοχίες στο μνημείο σε όλα τα μέλη της στην υφιστάμενη κατάσταση, για στόχο αποτίμησης B1.

Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν πεσσοί (κυρίως στην τοξοστοιχία) που αναπτύσσουν εφελκυσμό ή μικρή θλίψη στη βάση, στο μέσο και στην κορυφή τους με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένες, έως και μηδενικές, αντοχές σε δράσεις εντός και εκτός επιπέδου τους. Στα περισσότερα υπέρθυρα αναπτύσσονται αξονικές εφελκυστικές δυνάμεις και επομένως οι αντοχές εντός επιπέδου τους είναι μηδενικές. Καλύτερη είναι η συμπεριφορά τους σε εκτός επιπέδου εντάσεις, ωστόσο αστοχίες προβλέπονται στις θέσεις υπερθύρων άνω των οποίων δεν υφίστανται απαραμόρφωτα διαφράγματα λόγω και της μικρής τους εφελκυστικής αντοχής. Στις επιπλέον οριζόντιες και κατακόρυφες διατομές ελέγχου, παρατηρείται εν γένει καλή συμπεριφορά σε εκτός επιπέδου εντάσεις με περιορισμένες αστοχίες λόγω της μικρής εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας. Εκτεταμένες αστοχίες παρατηρούνται στα λοφία (σφαρικά τρίγωνα), στα ημιχώνια, στο οκτάγωνο (τύμπανο) και στους τρούλους λόγω υπερβάσεων της μικρής εφελκυστικής τους αντοχής, έναντι του κριτηρίου αστοχίας υπέρβασης των κύριων εφελκυστικών τάσεων.

Σημειώνεται ότι από τα στατικά σχέδια παθολογίας τα υφιστάμενα ξύλινα στοιχεία είναι σε πολύ κακή κατάσταση. Δεν πραγματοποιούνται έλεγχοι επάρκειας για αυτά διότι προβλέπεται η αντικατάστασή τους.

V. ΠΡΟΤΑΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Η πρόταση ανασχεδιασμού για την επανάχρηση του μνημείου αποτυπώθηκε σε νέα στατικά σχέδια. Σκοπός της πρότασης είναι να επανέλθει η Οθωμανική Βιβλιοθήκη στην αρχική της κατάσταση κατά την οποία κηρύχθηκε ως μνημείο (βλ. Εικόνα 1.). Συνοπτικά, οι επεμβάσεις που προτείνονται στο φέροντα οργανισμό, χωρίς να αλλοιώνεται η δομή και η μορφή του μνημείου, είναι οι εξής:

- καθαίρεση πλάκα σκυροδέματος οροφής υπογείου και αντικατάσταση από νέο ξύλινο δάπεδο με κατάλληλη σύνδεση για την εξασφάλιση οριζόντιου διαφράγματος,
- καθαίρεση στεγάστρου προστώου και κατασκευή νέου με επικάλυψη από φύλλα μολύβδου, με χρήση νέων

ξύλινων αντηρίδων και υποστυλωμάτων για τη στήριξή του, και κατάλληλη σύνδεση για την εξασφάλιση της διαφραγματικής λειτουργίας που δεν υπάρχει στον υφιστάμενο φορέα,

- αφαίρεση των λίθινων πλακών από το στέγαστρο και τη θολοδομία και αντικατάσταση από φύλλα μολύβδου,
- οποιεσδήποτε εργασίες επισκευής ρηγματώσεων, διάβρωσης, συρραφή ρωγμών, κτλ.,
- εφαρμογή βαθέως αρμολογήματος σε τρούλους και υπολογισμός νέων αντοχών σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ,
- εφαρμογή ενεμάτων ομογενοποίησης μάζας σε τοιχοποιία και θολοδομία πέραν των τρούλων και υπολογισμός νέων αντοχών σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση σύμφωνα με τον ΚΑΔΕΤ,
- αντικατάσταση ξύλινων θλιπτήρων / ελκυστήρων,
- τοποθέτηση ανοξείδωτων ράβδων οπλισμού σε επιχρισμένους πεσσούς και υπολογισμός αντοχών οπλισμένης τοιχοποιίας σύμφωνα με τον EN1996-1-1,
- τοποθέτηση νέων ξύλινων ή μεταλλικών πρεκιών στα υπέρθυρα και διαστασιολόγησή τους σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Σπυράκος, 2019),
- τοποθέτηση ανοξείδωτων μεταλλικών ελκυστήρων σε υπέρθυρα και διαστασιολόγησή τους σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Σπυράκος, 2019).

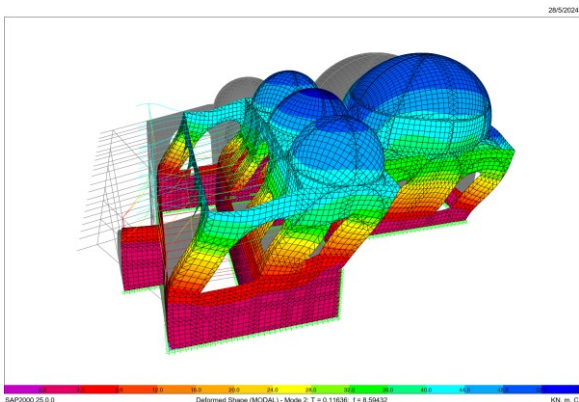
ΠΙΝΑΚΑΣ III

ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΚΑΙ ΘΟΛΟΔΟΜΙΑΣ

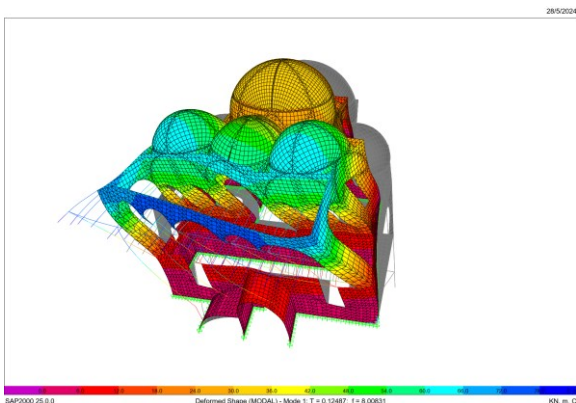
Τρόπος δόμησης	Θλιπτική αντοχή	Διατμητική αντοχή	Εφελκ. Αντοχή $\theta=0^\circ$	Εφελκ. Αντοχή $\theta=90^\circ$
(1)	2.61 MPa	0.30+0.40 σ_d	0.20 MPa	0.10 MPa
(2)	5.34 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.60 MPa	0.30 MPa
(3)	5.34 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.60 MPa	0.30 MPa
(4)	6.17 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.60 MPa	0.30 MPa
(5)	4.64 MPa	0.10+0.40 σ_d	0.38 MPa	0.19 MPa

VI.ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΑΣΧΕΛΙΑΣΜΟΥ

A. Δεσπόζουσες ιδιομορφές



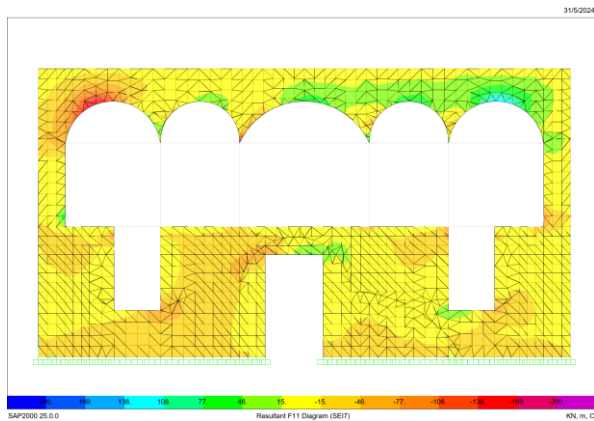
Εικόνα 30. Δεσπόζουσα ιδιομορφή διεύθυνσης X, $T_2=0.12s$
Διεγείρουσα μάζα $U_x=0.62$.



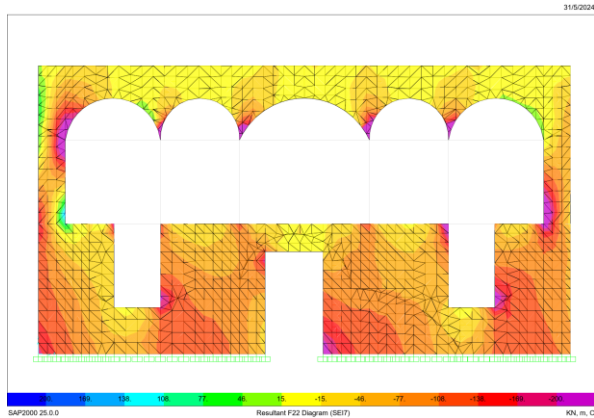
Εικόνα 31. Δεσπόζουσα ιδιομορφή διεύθυνσης Y, $T_1=0.13s$
Διεγείρουσα μάζα $U_y=0.54$.

B. Έλεγχοι επάρκειας χαρακτηριστικού ενισχυμένου κατακόρυφου τοίχου

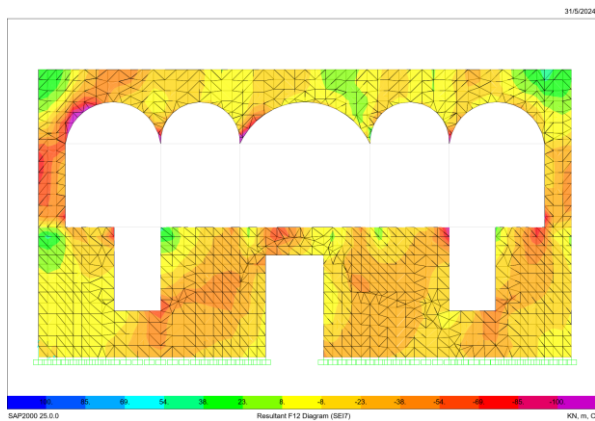
1) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε εντατική κατάσταση εντός επιπέδου κατακόρυφης τοιχοποιίας – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός $SEI7$ ($1.20G + 1.20G1 + 0.60Q + 0.30Ex - 1.00Ey$)



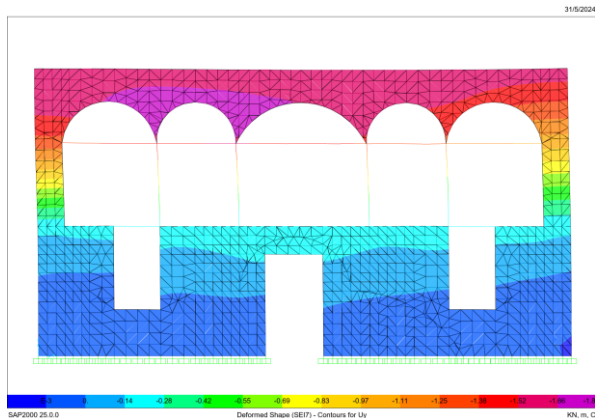
Εικόνα 32. Οριζόντιες αξονικές δυνάμεις F11 (kN/m)



Εικόνα 33. Κατακόρυφες αξονικές δυνάμεις F22 (kN/m)



Εικόνα 34. Εντός επιπέδου τέμνουσες δυνάμεις F12 (kN/m)



Εικόνα 35. Εντός επιπέδου οριζόντιες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)

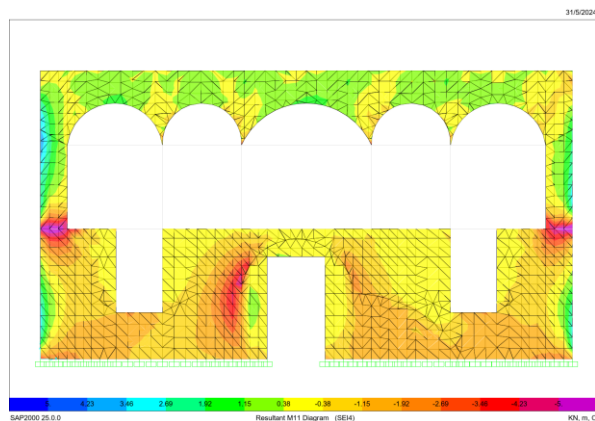
Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα 2										
Θέση ελέγχου		L (m)	t _{ef} (m)	H (m)	Φ _{lim} (m)	Είδος		Ενίσχυση		
Πεσός		P2-05	0.58	0.96	1.80	0.10	Διατρωτή	Ομογενοποίηση μάζας		
Οπλισμένη		Ναι	No	Φ (mm)	f _{yd} (MPa)	As (cm ²)	c (m)	d (m)	z (m)	MRd (kNm)
			4	12	272.73	4.52	0.05	0.519	0.493	60.83
Εντός επιπέδου ροπή κάμψης - Εύρεση ικανοτικής τέμνουσας										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N _{ed} (kN) (+Θλίψη)	V _{ed}	M _{ed} (kNm)	M _{id} (kNm)	e (m)	H ₀ (m)	V ₁ (kN)	Διατομή υπό:	
SE15	P2-05-B-EF	-109.39	0.056	60.83	-20.75	0.19	1.09	55.91	σd<0.30fd	
	P2-05-M-EF	-78.58	0.040	60.83	0.37	0.00		55.91	σd<0.30fd	
	P2-05-T-EF	-54.44	0.028	60.83	13.58	0.25		55.91	σd<0.30fd	
SE16	P2-05-B-EF	-171.52	0.087	60.83	-20.84	0.12	1.08	56.18	σd<0.30fd	
	P2-05-M-EF	-106.57	0.054	60.83	0.94	0.01		56.18	σd<0.30fd	
	P2-05-T-EF	-54.48	0.028	60.83	13.80	0.25		56.18	σd<0.30fd	
SE17	P2-05-B-EF	-84.14	0.043	60.83	31.39	0.37	0.95	63.92	σd<0.30fd	
	P2-05-M-EF	-75.03	0.038	60.83	-5.94	0.08		63.92	σd<0.30fd	
	P2-05-T-EF	-65.91	0.034	60.83	-35.21	0.53		63.92	σd<0.30fd	
SE18	P2-05-B-EF	-146.27	0.074	60.83	31.30	0.21	0.95	64.03	σd<0.30fd	
	P2-05-M-EF	-103.01	0.052	60.83	-5.37	0.05		64.03	σd<0.30fd	
	P2-05-T-EF	-65.96	0.034	60.83	-34.99	0.53		64.03	σd<0.30fd	
Εντός επιπέδου τέμνουσα - Έλεγχος αναπτυσσόμενης και ικανοτικής τέμνουσας										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	L' (m)	V _{ed}	f _{td1} (kPa)	f _{td2} (kPa)	V ₁ (kN)	V _{ed} (kN)	V _{1d} (kN)	Έλεγχος V _{ed} /V _{1d} (%)	
SE15	P2-05-B-EF	0.58	0.056	493.73	156.19	86.22	55.91	28.79	51.49	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	0.58	0.040	470.31	133.87	73.89	55.91	24.79	44.34	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	0.58	0.038	451.11	116.37	64.24	55.91	22.10	39.52	Επάρκεια
SE16	P2-05-B-EF	0.58	0.087	537.86	201.21	111.07	56.18	36.74	65.40	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	0.58	0.054	491.63	154.15	85.09	56.18	32.05	57.06	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	0.58	0.028	451.15	116.40	64.25	56.18	29.07	51.74	Επάρκεια
SE17	P2-05-B-EF	0.58	0.043	474.62	137.89	76.12	63.92	-43.26	67.68	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	0.58	0.038	467.53	131.29	72.47	63.92	-42.46	66.42	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	0.58	0.034	460.34	124.69	68.83	63.92	-43.95	68.76	Επάρκεια
SE18	P2-05-B-EF	0.58	0.074	520.38	182.92	100.97	64.03	-35.31	55.15	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	0.58	0.052	488.98	151.57	83.67	64.03	-35.19	54.97	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	0.58	0.034	460.37	124.72	68.84	64.03	-36.98	57.76	Επάρκεια

Εικόνα 36. Έλεγχοι επάρκειας εντός επιπέδου ενισχυμένου με ομογενοποίηση μάζας και οπλισμένου πεσού P2-05.

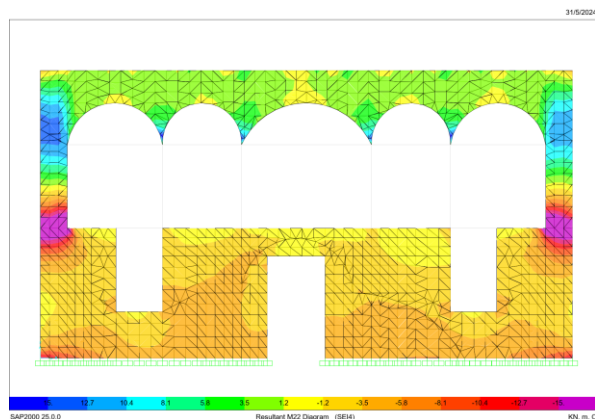
Κατακόρυφος τοίχος με ενσωμάτωση ελκυστήρα - Όψη άξονα 2										
Θέση ελέγχου		L (m)	t (m)	H (m)	L ₀ (m)	Είδος		Ενίσχυση		
Υπέρβυρο		S2-06	1.15	0.60	2.05	1.00	Διατρωτή	Ομογενοποίηση μάζας		
Χαρακτηριστικά πλάκας αγκύρωσης ενός ελκυστήρα		a (m)	b (m)	t _{ef} (m)	h _{lim} (m)	t _{lim} (m)	Ελκυστήρας	No.	M (mm)	Ποσότητα
		0.30	0.30	0.020	0.070	0.020	εξ	2	27	1.4547
Εύρεση εφελκυστικής ανταχής ράβδου ελκυστήρα - Έλεγχος τοιχοποιίας										
Συνδυασμός φόρτισης	f _{td1} (MPa)	F ₁ (kN)	F _{1x} (kN)	N _{1x} (kN) (-Θλίψη)	σ ₁ (kPa)	F _{1y} (kN)	F _{1y} (kN)	F ₁ (kN)	Έλεγχος F _{1y} /F ₁ (%)	
SE15	136.36	156.15	644.67	-70.30	117.17	174.22	320.70	174.22	89.63	Επάρκεια
SE16	136.36	156.15	644.67	-104.91	174.85	196.37	320.70	196.37	79.52	Επάρκεια
SE17	136.36	156.15	644.67	-70.00	116.67	174.03	320.70	174.03	89.73	Επάρκεια
SE18	136.36	156.15	644.67	-101.86	169.77	194.42	320.70	194.42	80.32	Επάρκεια
Έλεγχος πλάκας αγκύρωσης ενός ελκυστήρα										
Συνδυασμός φόρτισης	Y _{max} (cm)	I _x (cm ⁴)	S (cm ³)	M _x (kNm)	V _x (kN)	σ (MPa)	τ (MPa)	σ _{lim} (MPa)	Έλεγχος σ _{lim} /f _{td} (%)	
SE11 - SE18	5.50	145.83	26.52	2.76	39.04	104.11	2.37	104.19	76.40	Επάρκεια
Εντός επιπέδου τέμνουσα - Έλεγχος υπέρβυρου με στοιχεία ανάληψης εφελκυσμού										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	f _{td} (kPa)	N _{1x} (kN)	N _{1y} (kN)	V ₁ (kN)	V _{1d} (kN)	t (m)	0.40	Έλεγχος V _{1d} /V ₁ (%)	
SE15	S2-06-L	1781.64	584.379	124.92	57.79	26.56			45.96	Επάρκεια
	S2-06-M	1781.64	584.379	124.92	57.79	32.11			55.56	Επάρκεια
	S2-06-R	1781.64	584.379	124.92	57.79	57.24			99.04	Επάρκεια
SE16	S2-06-L	1781.64	584.379	124.92	57.79	24.89			43.06	Επάρκεια
	S2-06-M	1781.64	584.379	124.92	57.79	26.50			45.85	Επάρκεια
	S2-06-R	1781.64	584.379	124.92	57.79	51.45			89.02	Επάρκεια
SE17	S2-06-L	1781.64	584.379	124.92	57.79	13.90			24.06	Επάρκεια
	S2-06-M	1781.64	584.379	124.92	57.79	-5.34			9.23	Επάρκεια
	S2-06-R	1781.64	584.379	124.92	57.79	17.68			30.59	Επάρκεια
SE18	S2-06-L	1781.64	584.379	124.92	57.79	12.23			21.16	Επάρκεια
	S2-06-M	1781.64	584.379	124.92	57.79	-10.95			18.94	Επάρκεια
	S2-06-R	1781.64	584.379	124.92	57.79	11.89			20.56	Επάρκεια

Εικόνα 37. Έλεγχοι επάρκειας εντός επιπέδου ενισχυμένου με ομογενοποίηση μάζας υπερβύρου S2-02 και διαστασιολόγηση ελκυστήρων.

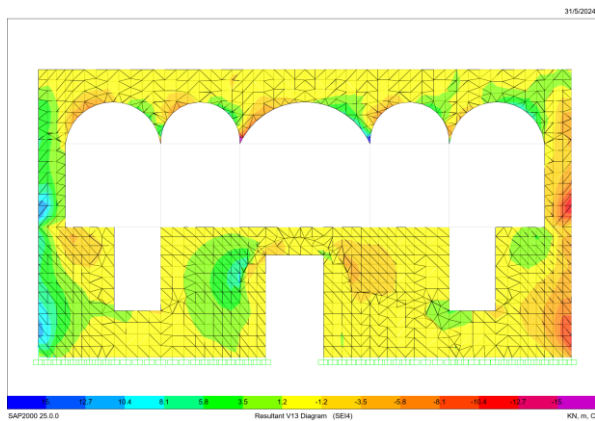
2) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε εντατική κατάσταση εκτός επιπέδου κατακόρυφης τοιχοποιίας – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός SE14 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q - 1.00Ex - 0.30Ey)



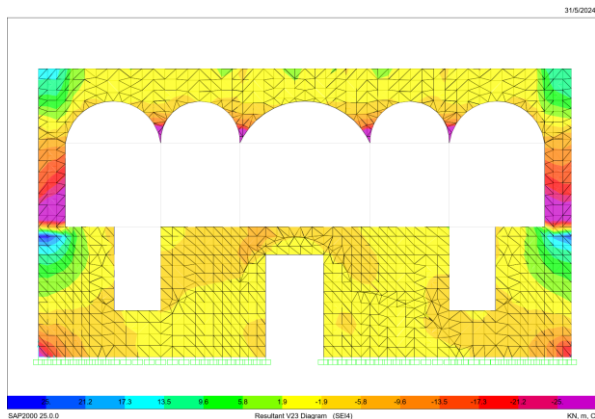
Εικόνα 38. Εκτός επιπέδου ροπές κάμψης περί κατακ. άξονα M11 (kNm/m)



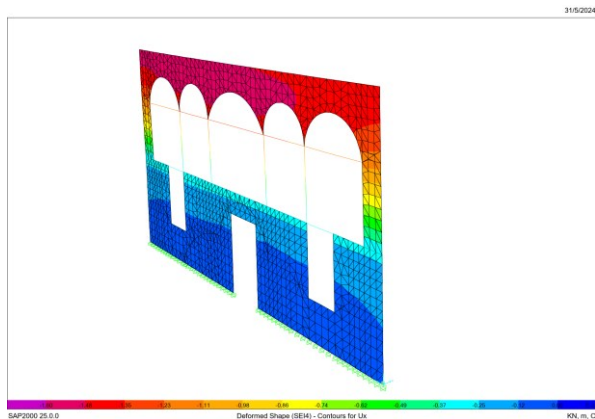
Εικόνα 39. Εκτός επιπέδου ροπές κάμψης περί οριζόντιο άξονα M22 (kNm/m)



Εικόνα 40. Εκτός επιπέδου τέμνουσες δυνάμεις εντός επιπέδου 2-3 V13 (kN/m)



Εικόνα 41. Εκτός επιπέδου τέμνουσες δυνάμεις εντός επιπέδου 1-3 V23 (kN/m)



Εικόνα 42. Εκτός επιπέδου οριζόντιες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)

Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα Z										
Θέση ελέγχου	L (m)	t (m)	H (m)	Είδος		Ενίσχυση				
Υπερθύρο	P2-05	0.58	0.96	1.80	Διστρωτή	Ομογενοποίηση μάζας				
Οπλισμένη	Ναι	No.	Φ (mm)	f _{yd} (MPa)	A _s (cm ²)	c (m)	d (m)	z (m)	MRd (kNm)	
		4	12	272.73	4.52	0.05	0.904	0.859	105.96	
Εκτός επιπέδου ροπή περί οριζόντιο άξονα - Έλεγχος ικανοτικής τέμνουσας										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N _{ed} (kN) (-Θλίψη)	σ ₀ (kPa)	M _{hull,0} (kNm)	M _{ed} (kNm)	H ₀ (m)	F _y (kN)	F _{ed} (kN)	Έλεγχος F _{ed} / F _y (%)	
SE11	P2-05-B-EF	-28.06	50.832	105.96	5.02	0.93	114.18	13.38	11.72	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	-44.68	80.947	105.96	-1.55		114.18	22.62	19.81	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	-58.41	105.806	105.96	-5.34		114.18	17.81	15.60	Επάρκεια
SE12	P2-05-B-EF	-20.48	37.109	105.96	7.96	0.96	110.04	15.35	13.95	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	-43.62	79.014	105.96	-0.81		110.04	28.47	25.87	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	-61.85	112.043	105.96	-6.92		110.04	23.06	20.95	Επάρκεια
SE13	P2-05-B-EF	-235.17	426.036	105.96	-19.17	1.12	94.48	-60.03	63.54	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	-137.98	249.962	105.96	4.46		94.48	-53.59	56.73	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	-58.55	106.060	105.96	11.60		94.48	-37.59	39.79	Επάρκεια
SE14	P2-05-B-EF	-227.60	412.313	105.96	-16.23	1.11	95.20	-58.06	60.99	Επάρκεια
	P2-05-M-EF	-136.91	248.029	105.96	5.20		95.20	-47.75	50.16	Επάρκεια
	P2-05-T-EF	-61.99	112.297	105.96	10.02		95.20	-32.35	33.98	Επάρκεια

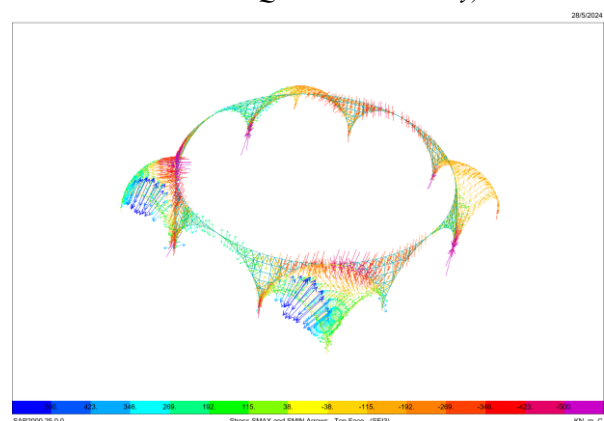
Εικόνα 43. Έλεγχος επάρκειας εκτός επιπέδου ενισχυμένου με ομογενοποίηση μάζας και οπλισμένου πεσσού P2-06.

Κατακόρυφος τοίχος - Όψη άξονα Z										
Θέση ελέγχου	L (m)	t (m)	H (m)	Είδος		Ενίσχυση				
Υπερθύρο	S2-06	1.15	0.40	2.05	Διστρωτή	Ομογενοποίηση μάζας				
Οπλισμένη	Όχι	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Εκτός επιπέδου ροπή περί κατακόρυφο άξονα - Έλεγχος ικανοτικής τέμνουσας										
Συνδυασμός φόρτισης	Section Cut	N _{ed} (kN) (-Θλίψη)	M _{hull,0} (kNm)	M _{ed} (kNm)	H ₀ (m)	F _y (kN)	F _{ed} (kN)	Έλεγχος F _{ed} / F _y (%)		
SE11	S2-06-L	2.01	12.40	0.07	1.91	6.49	1.03	15.80	Επάρκεια	
	S2-06-M	-19.17	12.40	-0.23		6.49	-0.70	10.81	Επάρκεια	
	S2-06-R	-47.39	12.40	-0.98		6.49	-1.09	16.81	Επάρκεια	
SE12	S2-06-L	11.02	12.40	-0.01	2.05	6.05	1.13	18.64	Επάρκεια	
	S2-06-M	3.91	12.40	-0.13		6.05	-0.25	4.12	Επάρκεια	
	S2-06-R	-18.90	12.40	-0.28		6.05	0.18	2.93	Επάρκεια	
SE13	S2-06-L	0.21	12.40	0.18	1.17	10.57	3.04	28.75	Επάρκεια	
	S2-06-M	1.72	12.40	-0.39		10.57	0.58	5.53	Επάρκεια	
	S2-06-R	-9.22	12.40	-0.13		10.57	1.80	17.03	Επάρκεια	
SE14	S2-06-L	9.23	12.40	0.10	2.05	6.05	3.14	51.89	Επάρκεια	
	S2-06-M	24.81	12.40	-0.29		6.05	1.04	17.14	Επάρκεια	
	S2-06-R	19.27	12.40	0.57		6.05	3.07	50.67	Επάρκεια	

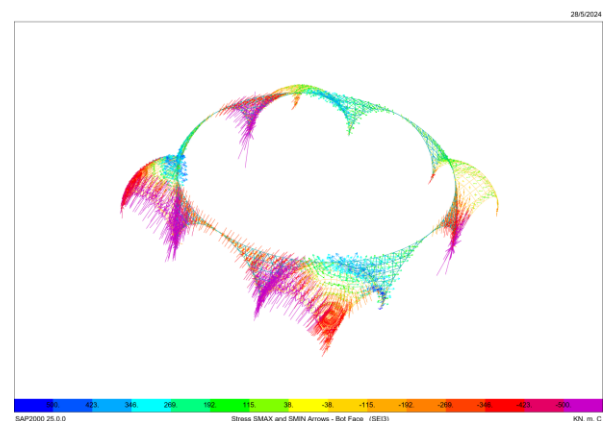
Εικόνα 44. Έλεγχος επάρκειας εκτός επιπέδου ενισχυμένου με ομογενοποίηση μάζας υπερθύρου S2-06.

C. Έλεγχος επάρκειας χαρακτηριστικών ενισχυμένων στοιχείων θολοδομίας

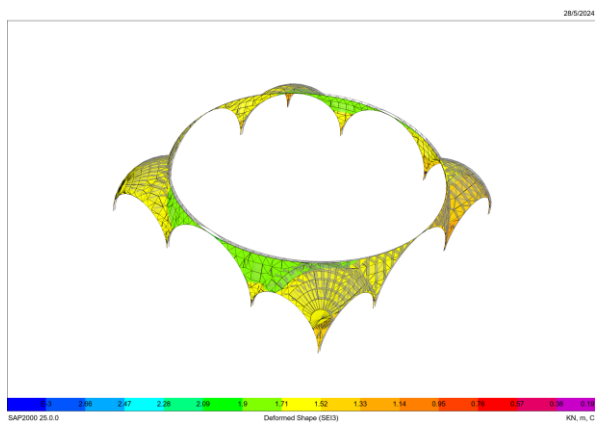
1) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε λοφία και ημιχώνια – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός SE13 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q -1.00Ex + 0.30Ey)



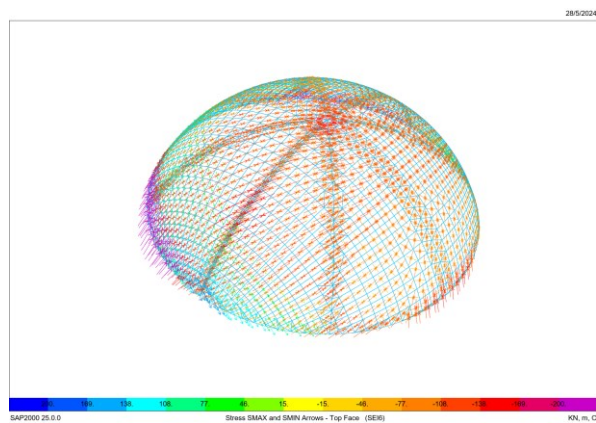
Εικόνα 45. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Άνω ίνα



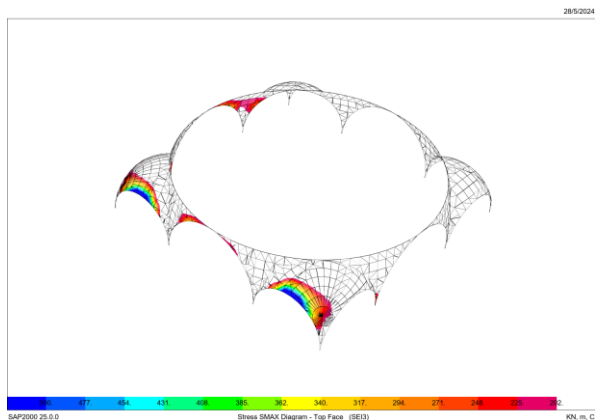
Εικόνα 46. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Κάτω ίνα



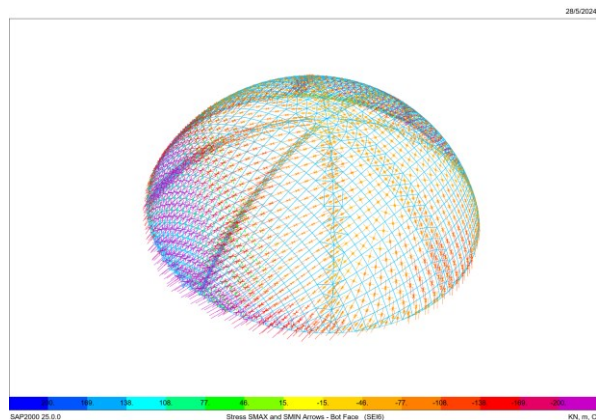
Εικόνα 47. Συνισταμένες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)



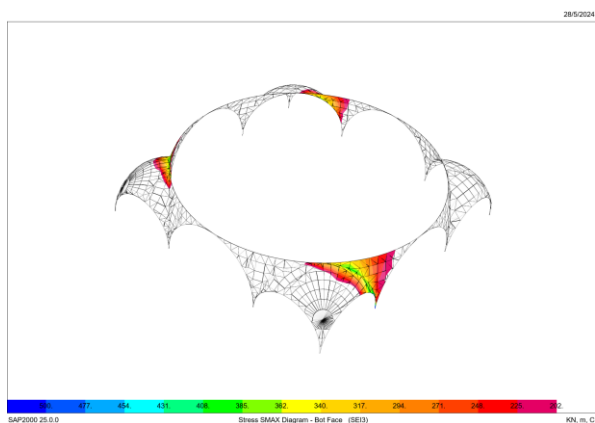
Εικόνα 50. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Άνω ίνα



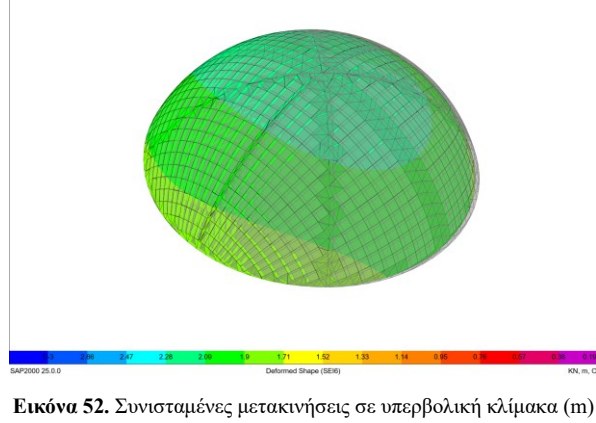
Εικόνα 48. Κατανομή τιμών μέγιστων κυρίων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις ενισχυμένης με βαθύ αρμολόγημα εφελκυστικής αντοχής fwt,d⁹⁰ - Άνω ίνα



Εικόνα 51. Τροχιές κύριων τάσεων SMAX / SMIN (kN/m²) – Κάτω ίνα

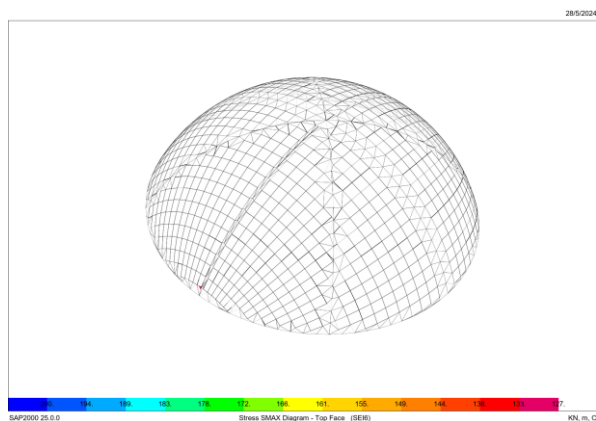


Εικόνα 49. Κατανομή τιμών μέγιστων κυρίων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις ενισχυμένης με βαθύ αρμολόγημα εφελκυστικής αντοχής fwt,d⁹⁰ - Κάτω ίνα

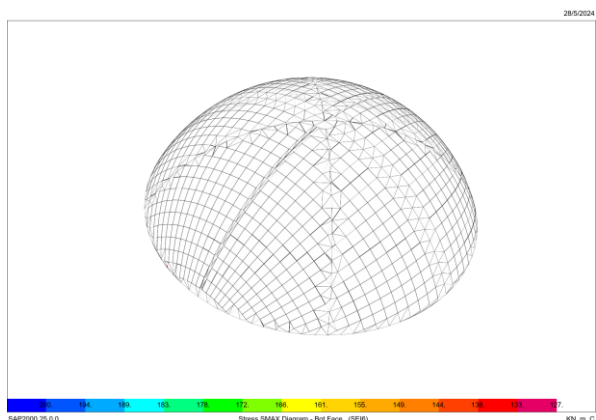


Εικόνα 52. Συνισταμένες μετακινήσεις σε υπερβολική κλίμακα (m)

2) Αποτελέσματα και έλεγχοι επάρκειας σε τρούλο – Δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός SE16 (1.20G + 1.20G1 + 0.60Q - 0.30Ex + 1.00Ey)



Εικόνα 53. Κατανομή τιμών μέγιστων κυρίων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις ενισχυμένης με βαθύ αρμολόγημα εφελκυστικής αντοχής fwt,d⁹⁰ - Άνω ίνα



Εικόνα 54. Κατανομή τιμών μέγιστων κυρίων τάσεων SMAX (kN/m²) – Υπερβάσεις ενισχυμένης με βαθύ αρμολόγημα εφελκυστικής αντοχής fwt,d⁹⁰ - Κάτω ίνα

VII. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Από τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας προκύπτει ότι σύμφωνα με το κανονιστικό πλαίσιο του ΚΑΔΕΤ πλέον όλα τα μέλη του μνημείου κρίνονται επαρκή στην προτεινόμενη κατάσταση του φορέα, για στόχο ανασχεδιασμού Β1.

Πιο συγκεκριμένα, έπειτα από τις επεμβάσεις στο φορέα της κατασκευής και τις ενισχύσεις των μελών τους οι πεσσοί και τα υπέρθυρα δεν παρουσιάζουν ή παρουσιάζουν τοπικές οριακές αστοχίες εντός και εκτός επιπέδου και επομένως κρίνονται επαρκή. Όμοια είναι τα συμπεράσματα και για τις επιπλέον οριζόντιες και κατακόρυφες διατομές ελέγχου για εκτός επιπέδου εντάσεις. Τα λοφία (σφαιρικά τρίγωνα) των μικρών δωματίων, καθώς και το οκτάγωνο (τύμπανο) και ο τρούλος του μεγάλου δωματίου δεν παρουσιάζουν υπερβάσεις των νέων εφελκυστικών τους αντοχών.

Αντιθέτως, τα λοφία και τα ημιχώνια του μεγάλου δωματίου, καθώς και οι τρούλοι των μικρών δωματίων, παρουσιάζουν υπερβάσεις των νέων εφελκυστικών αντοχών τους. Ωστόσο, αυτές κρίνονται τοπικές και ανίκανες για να σχηματίσουν μηχανισμούς αστοχίας στην κατασκευή και επομένως, τα μέλη αυτά της θολοδομίας κρίνονται επαρκή, ως προς το κριτήριο αστοχίας υπέρβασης των κύριων εφελκυστικών τάσεων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλουν να αποδοθούν στον Πολιτικό Μηχανικό κ. Καίλη Δημήτρη, υπεύθυνο της ομάδας Στατικής Μελέτης της μελλοντικής μελέτης αποκατάστασης του μνημείου που πραγματοποιείται η παρούσα διπλωματική εργασία, για την παροχή όλων των δεδομένων που χρειάστηκαν για την εκπόνηση της εργασίας, όπως και το Δήμο Ιωαννιτών για τη συγκατάθεσή του σε αυτήν.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Ευρωκώδικας: Βάσεις σχεδιασμού δομημάτων, EN 1990
 Ευρωκώδικας 1: Δράσεις σε δομήματα – Μέρος 1-1: Γενικές δράσεις – Πυκνότητες, ίδια βάρη και επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια, EN 1991-1-1
 Ευρωκώδικας 1: Δράσεις σε δομήματα – Μέρος 1-3: Γενικές δράσεις – Φορτία χιονιού, EN 1991-1-3
 Ευρωκώδικας 1: Δράσεις σε δομήματα – Μέρος 1-4: Γενικές δράσεις – Δράσεις ανέμου, EN 1991-1-4
 Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα – Μέρος 1-4: Γενικοί κανόνες – Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες, EN 1993-1-4
 Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός κατασκευών από τοιχοποιία – Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες για κατασκευές από οπλισμένη και άοπλη τοιχοποιία, EN 1996-1-1
 Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών – Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, EN 1998-1
 Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών – Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας κτιρίων και επεμβάσεις, EN 1998-3
 Κανονισμός Επεμβάσεων – ΚΑΝ.ΕΠΕ., 3η Αναθεώρηση 2022
 Κανονισμός για Αποτίμηση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας – Κ.Α.Δ.Ε.Τ., Αθήνα 2022
 Φυλλίτσα Β. Καραντώνη, Κατασκευές από Τοιχοποιία – Σχεδιασμός και Επισκευές, 2η Έκδοση, Αθήνα 2012
 Κωνσταντίνος Σπυράκος, Κατασκευές από Τοιχοποιία – Αποτίμηση και επεμβάσεις για σεισμικά φορτία, Α' Έκδοση, Αθήνα 2019
 Σ. Η. Δρίτσος, Παρουσίαση “Τοιχοποιίες”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011 και παλαιότερες. http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/?page_id=351
 Τσιούρη Χριστιάνα, Σεισμική απόκριση ιστορικών κτιριακών κατασκευών από φέρουσα λιθοδομή, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2021
 Computers & Structures, Inc. (C.S.I.), CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, Rev.18, November 2017