

ΣΤΑΤΙΚΗ.— Αίτια και εϋθύνη για τήν πτώση τοῦ τρούλλου τῆς Ἀγ. Σοφίας Κωνσταντινουπόλεως, ὑπὸ τοῦ Παναγ. Ἱ. Σπυροπούλου, διὰ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ κ. Σόλωνος Κυδωνιάτου.

1. Εἰσαγωγή — Κατασκευὴ

Τὴν 27ην Δεκεμβρίου 537 ἐγίνοντο στὴ Βασιλίδα, μὲ κάθε ἐπισημότητα καὶ κάθε λαμπρότητα, τὰ ἐγκαίνια τοῦ μεγαλοπρεπεστεροῦ ναοῦ τῆς χριστιανοσύνης, τῆς Ἀγίας Σοφίας· τοῦ ναοῦ ποῦ γιὰ αἰῶνες θὰ παρέμενε ἀξεπέραστο στὸ εἶδος τοῦ καλλιτεχνικῆς δημιουργήμα, ὑπερέχον παντὸς ἄλλου «κάλλει τε καὶ μεγέθει», ὅπως θὰ διαπιστώσῃ καὶ ὀκτῶ αἰῶνες ἀργότερα ὁ Ἰωάννης Καντακουζηνός («κάλλει τε καὶ μεγέθει τοὺς ἀπανταχοῦ — ἐννοεῖται: ναοὺς— νικᾷ»). Ἐξ ἄλλου ὁ Γ. Κωδινός θὰ διακηρύξῃ ὅτι τέτοιος ναὸς «οὐκ ἐγένετο ἀπὸ Ἀδάμ, οὐδὲ γενήσεται» [4].

Τὸ κτίσιμο τοῦ ναοῦ εἶχε διαρκέσει λιγώτερο ἀπὸ ἕξι χρόνια, χάρη στὸ συνεχές καὶ ζωηρὸ ἐνδιαφέρον τοῦ ὁραματιστοῦ αὐτοκράτορος, τοῦ Ἰουστινιανοῦ (527-565), ὁ ὁποῖος, κατὰ τὸν Ἀνώνυμον χρονογράφον, «οὐκ ἐκάθειδεν ἀλλὰ σπουδὴν καὶ ἐπιμέλειαν εἰς τὸ ὄραν τοὺς τε λιθοξόβους... καὶ λοιποὺς οἰκοδόμους» ἐπεδείκνυε.

Ἀρχιτέκτονες καὶ μηχανικοὶ —«μηχανοποιοὶ» ὅπως ἀπεκαλοῦντο τότε— ἦσαν οἱ μικρασιάτες Ἀνθέμιος (ἀπὸ τῆς Τράλλεις) καὶ Ἰσίδωρος (ἀπὸ τῆς Μίλητο). Στὴν οὐσία ὑπῆρχε καὶ τρίτος ἀρχιτέκτων — ἡ ἀρχιτεκτονῶν — ὁ ἴδιος ὁ Ἰουστινιανός.

Δὲν εἶναι μόνον ὁ ἱστορικὸς τῆς ἐποχῆς Προκόπιος, ποῦ ὀμιλεῖ γιὰ τὸν μεγάλο ζῆλο τοῦ βασιλέως, ὅστις νυχθημερὸν μεριμνοῦσε γιὰ τὴν «οἰκοδομίαν» τοῦ ναοῦ. «Βασιλεὺς δειλινὸν οὐκ ἐκάθειδε» μᾶς παραδίδει. Δὲν εἶναι μόνον οἱ λαϊκὲς παραδόσεις, ποῦ θέλουν τὸν αὐτοκράτορα νὰ βλέπῃ καὶ νὰ ξαναβλέπῃ σχέδια τῆς ἐκκλησίας, ὥσπου νὰ ἐπιλέξῃ τὸ τελικόν, νὰ καθορίζῃ τὸν ἀριθμὸ τῶν κογχῶν τοῦ Ἱεροῦ καὶ νὰ ἔχῃ γνώμη γιὰ κάθε λεπτομέρειαν, ἐπεμβαίνων ὄχι λίγες φορὲς στὶς διαστάσεις καὶ τὴ διαμόρφωση χώρων, ἀκόμη καὶ τμημάτων τῆς στέγης.

Εἶναι καὶ ἡ διαπίστωση τῶν μεταγενεστερῶν μελετητῶν τοῦ ναοῦ (π.χ. τοῦ συγχρόνου μας Βρεταννοῦ Mainstone [8], σελ. 43-44) ὅτι πολλὰς ἀρχιτεκτονικὲς λεπτομέρειες, ποῦ ἐντοπίζει κανεὶς στὴν κατασκευὴ, εὐρίσκονται σὲ κάποια

* PAN. SPYROPOULOS, **Causes and Responsibility for the failure of the first dome of «Agia Sofia» Church in Constantinople.**

διάσπαση πρὸς τὶς στατικὰς ἀνάγκες καὶ τὶς ὀρθολογιστικὰς στατικῶς ἀντιμετωπίσεις τους, τῶν ὁποίων ἐπαρκῆ διαίσθηση διέθετον οἱ μηχανοποιοὶ τοῦ ναοῦ (τοῦλάχιστον γιὰ τόσον μικρὰ καὶ ἐπὶ μέρους προβλήματα, κατὰ τὸν Βρεταννὸν μηχανικόν). Οἱ ἐκλεγεῖσες αὐτὲς ἀρχιτεκτονικὰς διατάξεις καὶ οἱ στατικὰς λύσεις ποὺ ἐπιβάλλουν, φαίνονται κάπως ξένες πρὸς τὴν γνωστὴν μας ὀρθὴ ἀρχιτεκτονικὴ καὶ στατικὴ σύλληψη τῆς ὅλης κατασκευῆς καὶ τὴν ἀλληλοεξυπηρέτηση καὶ τὴν ἀλληλοὑπαγωγὴν ἀρχιτεκτονικῶν καὶ στατικῶν ἀναγκῶν καὶ λύσεων.

Στὸ σημεῖο αὐτὸ θὰ πρέπει νὰ σημειώσουμε ὅτι ὁ Ἄνθემιος καὶ ὁ Ἰσιδώρος — πρὸ παντὸς ὅμως ὁ πρῶτος — ἀξιοποίησαν στὴν κατασκευὴ τοῦ ναοῦ παλιὰς ἰδέας (ποὺ κανεὶς δὲν τὶς εἶχε ἀρκούντως ἕως τότε προσέξει) σὲ νέους συνδυασμοὺς καὶ διαστάσεις καὶ ἔδωσαν λύσεις, ποὺ ἐπὶ μίαν ὀλόκληρον χιλιετίαν κατόπιν θὰ εὗρουν εὐρεῖαν ἐφαρμογὴν, στὸν ἀνατολικὸ (ὀρθόδοξο) ἰδίως κόσμο.

Ἐχρησιμοποίησαν πολὺ τὸ ἡμικυκλικὸ τόξο καὶ μάλιστα κατὰ ἓνα ἐξυπνο καὶ ἀρμονικὸν τρόπο, γιὰ νὰ ἀναλαμβάνωνται οἱ γεννώμενες ὀριζόντιες ὠθήσεις πολὺ ἀπλὰ καὶ χωρὶς τὴν χρῆση βαρέων καὶ ἀνταισθητικῶν στοιχείων κατασκευῆς. Ἄντὶ τῶν ὀγκωδῶν τοίχων ἀντιστηρίξεως, ποὺ ἐχρησιμοποιοῦσαν οἱ Ρωμαῖοι, ἐπένοησαν οἱ δύο βυζαντινοὶ μηχανοποιοὶ ἐλαφρὲς καὶ κομψὰς λύσεις.

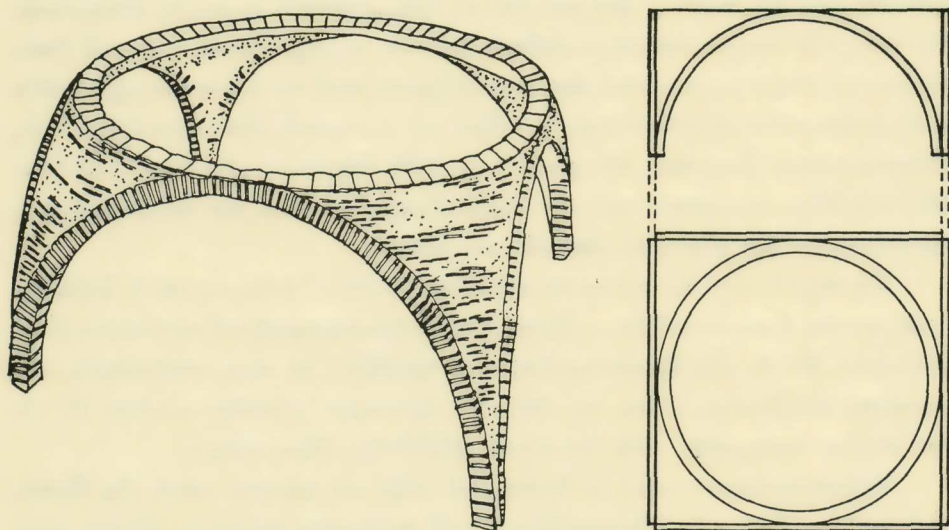
Χαρακτηριστικὸ καὶ μεγαλειῶδες δημιούργημά τους ὁ μέγας τροῦλλος τῆς τοῦ Θεοῦ Ἀγίας Σοφίας.

Τὸ πρόβλημα τῆς καλύψεως ἐνὸς τετραγωνικοῦ χώρου μὲ ἡμισφαιρικὴ — ἢ κατὰ τμῆμα σφαίρας — στέγη ἦταν παλαιό, ἀπὸ τὴν ἐποχὴ τῆς ἀκμῆς τῆς Ρώμης. Τώρα ὅμως, κατὰ τὴν ἀνέγερση τῆς Ἀγίας Σοφίας, εὐρίσκει γιὰ πρώτη φορὰ ἱκανοποιητικὴ λύση.

Οἱ πλευρὲς τῆς τετραγωνικῆς κατόψεως καταλήγουν πρὸς τὰ ἄνω — ἐπὶ κατακορύφων ἐπιπέδων — σὲ τέσσερα ἡμικυκλικὰ τόξα (Σχ. I δεξιὰ, λεπτομέρεια ἐνὸς τόξου). Οἱ κορυφὲς τῶν τόξων αὐτῶν συνδέονται μὲ ὀριζοντίαν στεφάνην, ἐπὶ τῆς ὁποίας (σὰν νὰ ἦταν αὐτὴ τύμπανον μικροῦ ὕψους) ἐπικάθεται περίπου ἡμισφαιρικὸς τροῦλλος.

Ἡ μετάβαση ἀπὸ τὰ τέσσερα ἡμικυκλικὰ τόξα (καὶ ἡ πλήρωση τῶν μεταξύ των κενῶν) στὴν ὀριζοντία στεφάνη γίνεται μὲ ἰσάριθμα σφαιρικὰ τρίγωνα, ποὺ γεμίζουν τὸ μεταξύ τῶν τόξων στέγαστρο κάτω ἀπὸ τὴν στεφάνην. Τὰ σφαιρικὰ αὐτὰ τρίγωνα λέγονται λ ο φ ί α καὶ ἀποτελοῦν τμήματα μιᾶς περιγεγραμμένης σφαίρας.

Τόσον τὰ 4 πλευρικὰ κατακόρυφα τόξα, ὅσον καὶ ἡ ὀριζοντία στεφάνη ἀποτελοῦν τομῆς τῆς ἐν λόγῳ σφαίρας βαίνουσε, σὲ ἐπικέντρους γωνίες 90° . Στὸν ἀρχικὸν τροῦλλο τοῦ Ἄνθემίου καὶ τοῦ Ἰσιδώρου ἡ καμπύλη ἐπιφάνειά του ἀποτελοῦσε τμῆμα τῆς ἴδιας αὐτῆς περιγεγραμμένης σφαίρας.



Σχ. 1

Καθώς σημειώνει ὁ καθηγ. Χαρ. Μπούρας [7 α', σ. 59], τὸ εὔρημα αὐτὸ τῆς περιγεγραμμένης σφαίρας συναντᾶται καὶ σὲ μερικὰ κτήρια προγενέστερα τοῦ βου αἰῶνος, «ἀλλὰ σὲ λύσεις πολὺ μικρῶν διαστάσεων»· ἐκεῖ ὅμως ὁ τροῦλλος ἀφ' ἑνὸς μὲν καλύπτει ὡς ἐπὶ τὸ πλεῖστον τὸ σύνολον ἢ πάντως τὸ μεγαλύτερον μέρος τῆς κατόψεως τοῦ κτηρίου, ἀφ' ἑτέρου δὲ εὐρίσκεται σὲ στάθμη ὄχι ὑψηλότεραν τῶν 8 μ. περίπου (ἀναφέρονται: ρωμαϊκὰ λουτρά, ὁ ἐν Θεσσαλονικῆ ναὸς τοῦ Ὁσίου Δαυίδ, τὸ μνημεῖον τοῦ Λεωνίδη κ.ἄ.).

Στὶς περιπτώσεις ὅμως αὐτὲς οἱ εἰδικοὶ κίνδυνοι ἐκ τῶν σεισμῶν — κρυφοὶ καὶ ἄγνωστοι μέχρι πρὸ ὀλίγων δεκαετιῶν — ποὺ θὰ ἐπισημάνουμε πιὸ κάτω καὶ ποὺ προσεκάλεσαν τὴν πτώση τοῦ τροῦλλου τῆς Ἁγ. Σοφίας, εἶναι τόσον ἀσημαντοὶ, ὥστε πρακτικῶς νὰ μηδενίζονται.

Πρέπει νὰ σημειώσουμε, ὅτι στὴν Ἁγ. Σοφία τοῦ Ἰουστινιανοῦ ἡ κορυφὴ τοῦ τροῦλλου βρισκόταν σὲ ὕψος περίπου 62 μέτρων ἢ ἴσως ὀλίγα μέτρα χαμηλότερα.

Τὰ ὕλικά κατασκευῆς του ἦσαν μεγάλα ἐλαφρὰ τοῦβλα, διαστάσεων 70 × 70 ἐκ. (δὲν ἀνεύρομεν κάπου τὸ πάχος). Τὸ κονίαμα ποὺ ἐχρησιμοποιήθηκε ἦταν πολὺ ἀνθεκτικὸ ἀσβεστοκονίαμα περιέχον σὲ ποικίλλοντα ποσοστὰ τριμμένο κεραμίδι.

Ἐντὶ ὑψηλοῦ τυμπάνου στηρίξεως τοῦ τροῦλλου ὑπῆρχε ὀριζοντία στεφάνη μικροῦ σχετικῶς ὕψους, πᾶν ἀπὸ τὴν ὁποίαν ἀνοίγονταν (ἐπὶ σφαιρικῆς ἐπιφανείας) 40 παράθυρα, ἀπὸ τὰ ὁποῖα εἰσήρχετο ἄπλετο φυσικὸ φῶς μέσα στὸ ναὸ. «Ἄσει πρῶτον διαγεῖλ᾽ τὸ φῶς τῆς ἡμέρας» γράφει χαρακτηριστικὰ ὁ Προκόπιος [1].

Τὰ 4 ἡμικυκλικὰ τόξα, πού φέρουν τήν κυκλική στεφάνη (κατά Σχ. I δεξιά), φαίνονται νά στηρίζονται ἐπὶ ἰσαριθμῶν μεγάλων πεσσῶν. Τοῦτο ὅμως εἶναι ἀκριβές μόνο γιὰ τὰ κατακόρυφα φορτία. Γὰ δύο ἀπὸ τὰ τόξα αὐτὰ (τὸ ἀνατολικὸ καὶ τὸ δυτικὸ) ἀποτελοῦν ἄκρα ἐπιμήκων ὀριζοντίων ἡμικυλινδρικών θόλων, πού φέρονται ἐπὶ δύο σειρῶν κίονων, ἐνῶ τὰ δύο ἄλλα τόξα (πρὸς Β. καὶ Ν.) ἀποτελοῦν τὰ ἄκρα τεταρτοσφαιρίων. Μὲ τὸ τέχνασμα αὐτὸ οἱ ὀριζόντιες δυνάμεις (ὠθήσεις), πού ἀσκοῦνται ἀπὸ τὸν τροῦλλο (διὰ τῆς στεφάνης του) δὲν χρειάζεται νὰ ἀναληφθοῦν ἀπὸ κάποιους ὀγκώδεις καὶ ἀκαλαίσθητους τοίχους ἢ ἔστω πεσσούς —ὅπως γινόταν στὶς ρωμαϊκὲς κατασκευές— ἀλλὰ ἀναλύονται καὶ ἐπιβαρύνουν ἄλλους ὀριζοντίους φορεῖς, πού ἔχουν πλούσια δυνατότητα νὰ τὶς ἀναλάβουν (μὲ πλαισιακὴ λειτουργία), χωρὶς νὰ χάσουν τὴν ἐλαφρότητά τους καὶ τὴν κομψότητά τους.

Τὸ εὐφυές καὶ ἐπιτυχημένο αὐτὸ παιγνίδι τοῦ διασκορπισμοῦ τῶν ὀριζοντίων ὠθήσεων σὲ μεγάλα τμήματα τῆς στέγης τοῦ ὅλου οἰκοδομήματος, συνετέλεσε ὥστε νὰ ἀποκτήσουν τόση κομψότητα καὶ ὁμορφιὰ τὰ διάφορα φέροντα στοιχεῖα τοῦ ναοῦ. Θεμελιώδης φιλοσοφία: ἀνάληψη ὀριζοντίων ὠθήσεων ὄχι ἀπὸ κατακόρυφα στοιχεῖα ἀλλὰ ἀπὸ ὀριζόντια καὶ μεταβίβαση ἐν συνεχείᾳ —ὅποτε χρειάζεται— σὲ διαμήκη πλαίσια.

Ἐπισημανθῆ ἀκόμη ὅτι ἡ Ἁγία Σοφία, ὅπως καὶ τὰ μνημεῖα τῆς ἑλληνικῆς ἀρχαιότητος, διέθετε «*λ ε λ ο γ ι σ μ ἔ ν ο υ ς*» συντελεστὲς ἀσφαλείας καὶ γι' αὐτὸ ἦσαν ὅλα ἐλαφρὰ καὶ ὠραῖα. Ἀντιθέτως τὰ αἰγυπτιακὰ καὶ ρωμαϊκὰ μνημεῖα, ἀπὸ μίαν ἔλλειψη σωστῆς στατικῆς διαισθήσεως καὶ ἐξ αὐτῆς ὑπέρμετρο φόβο ἀστοχίας τους, εἶχαν κατασκευασθῆ ὀγκώδη καὶ ἀκαλαίσθητα σὲ μιά, χωρὶς κανένα σχεδὸν κριτήριο, προσπάθεια νὰ εἶναι ἀσφαλῆ.

Ὅπου καθίσταται δυνατὸν νὰ ὑπολογισθοῦν σήμερα οἱ συντελεστὲς ἀσφαλείας γιὰ τὰ πρῶτα μνημεῖα — δηλ. τὰ ἑλληνικὰ — δὲν εὐρίσκονται μεγαλύτεροι τοῦ 5 περίπου κατὰ μέσον ὄρον (ὅσοι δηλ. ἐκλέγονται καὶ σήμερα βάσει τῶν στατικῶν ὑπολογισμῶν, πού εἴμεθα σὲ θέση νὰ συντάξωμεν), ἐνῶ γιὰ τὰ δευτέρα φθάνουν πολλὰς φορὲς σὲ ἀπαράδεκτα μεγάλες τιμὲς ξεπερνώντας τὸ 15 ἢ καὶ τὸ 20.

Ὅπως θὰ ἐξηγήσουμε κατωτέρω, παρομοία κατασκευὴ καὶ μὲ τὶς ἴδιες ἀσφάλειες, δηλ. τὴν ἴδια ὀλικὴ ἀντοχὴ ἕως τὸ στάδιον τῆς θραύσεως — ἀκόμη καὶ στὴν περιοχὴ τῆς στηρίξεως τοῦ τροῦλλου — θὰ ἐπεδίωκε καὶ ἓνας καλὸς στατικὸς μηχανικὸς τῶν μέσων τοῦ 20οῦ αἰῶνος, 14 δηλ. ὀλοκλήρους αἰῶνες μετὰ τὸν Ἀνθέμιο καὶ τὸν Ἰσίδωρο, μὲ ὅλους τοὺς στατικοὺς καὶ ἀντισεισμικοὺς ὑπολογισμοὺς, πού θὰ ἦταν σὲ θέση νὰ ἐκτελέσει.

Ποῖα λοιπὸν ἢ εὐθύνη τῶν «μηχανοποιῶν» ἐκείνων τοῦ 6ου αἰῶνος, ἐὰν δὲν ἠμπόρεσαν νὰ διαισθανθοῦν μίαν ἐπιστημονικὴν πραγματικότητα πού ἦταν

τόσο άπροσδόκητη, κρυφή και ύπουλη — θα έτολμοῦσε κανείς νά πῆ — ὥστε μόλις κατά τὸ δεύτερο ἡμισυ τοῦ εἰκοστοῦ αἰῶνος νά ἀποκαλυφθῆ ἀπὸ τοὺς εἰδικoὺς ἐπιστήμονες;

Ἄς συνεχίσουμε ὅμως μὲ τὴ σειρά τὴν ἐξέταση τοῦ προβλήματος, καταγράφοντας πρῶτα τὰ γεγονότα.

2. Πτώση τοῦ τρούλλου

Ὁ Ἰουστινιανός, γιὰ νά κτίσῃ ὅσο τὸ δυνατὸν πιὸ μεγαλοπρεπῆ τὴ Μεγάλη Ἐκκλησία, δὲν εἶχε διστάσει νά χρησιμοποίησῃ πολυτελῆ μάρμαρα καὶ κολῶνες ἀπὸ ἀρχαίους ναοὺς καὶ ἄλλα μνημεῖα, ἀπὸ τὴν Μ. Ἀσία, τὴν ἠπειρωτικὴ Ἑλλάδα, τὴ Ρώμη καὶ τὴν Αἴγυπτο. «Ἐγραψε δὲ (ὁ βασιλεὺς) καὶ τοῖς στρατηγοῖς, τοπάρχαις καὶ σατράπαις καὶ δουξὶ καὶ πᾶσι τοῖς οὖσιν ἀρχηγέταις πάντων τῶν βασιλικῶν θεμάτων... πέμψαι αὐτῶ... κίονάς τε... καὶ ἀβάκια.. Πάντες δὲ...χαίροντές τε καὶ ἀγαλλιώμενοι ἔπεμπον τῶ βασιλεῖ Ἰουστινιανῶ τὴν τοιαύτην ὕλην, συναγαγόντες αὐτὴν ἀπὸ τε ναῶν εἰδωλικῶν καὶ παλατίων λουτρῶν καὶ οἰκῶν...», σημειώνει χαρακτηριστικὰ ὁ Γ. Κωδινός [4].

Λὲς λοιπὸν καὶ θέλησαν οἱ ἀρχαῖοι θεοὶ νά ἐκδικηθοῦν τὸν Ἰουστινιανὸ καὶ τὸ ἔργο του, ἡ εἰκοσαετία πού ἀκολούθησε τὴν περάτωση τοῦ ναοῦ χαρακτηρίζεται ἀπὸ ἔντονη σεισμικὴ δραστηριότητα στὴν περιοχὴ, τόσο ἔντονη ὅσο ποτὲ πρὶν, οὔτε ποτὲ μετὰ, ὑπῆρξε.

Ὁ ἀστρονόμος Εὐγένιος Ἀντωνιάδης στὸ τρίτομο ἔργον του «Ἐκφρασις τῆς Ἀγίας Σοφίας» [6], πού ἔγραψε στὶς ἀρχὲς τοῦ αἰῶνος μας, παραθέτει ἕνα πίνακα τῶν ἰσχυροτέρων σεισμῶν πού ἐπληξάν τὴν Κωνσταντινούπολη ἀπὸ τὴν πρώτην ἡμέραν τῆς ἰδρύσεώς της ὑπὸ τοῦ Μ. Κωνσταντίνου (330 μ.Χ.) ἕως τὸ 1900.

Στὸν πίνακα αὐτὸν καταχωρίζονται 63 συνολικὰ σεισμοί, οἱ ἰσχυρότεροι, κατὰ τὴν ἔρευνα τοῦ συγγραφέως, πού ἐπληξάν ποτὲ τὴν Πόλη. Ἐξ αὐτῶν οἱ 10 ἔγιναν τὴν πρώτην ἐκείνη μετὰ τὸ κτίσιμο τῆς Ἀγίας Σοφίας 20ετία (538-557)· μὲ ἄλλες λέξεις μέσα στὰ 20 ἐκεῖνα χρόνια ἔγιναν τόσοι σεισμοί, ὅσοι ἀναλογοῦν σὲ $\frac{1900 - 330}{63} \times 10 \times 250$ χρόνια (1) κατὰ τὴ σεισμικὴ ἱστορία τῆς περιοχῆς.

Κατὰ τὸ τέλος τῆς εἰκοσαετίας ἐκείνης καὶ συγκεκριμένα τὴν 14ην Δεκεμβρίου 557 ἔγινε ὁ πιὸ ἰσχυρὸς καὶ πιὸ καταστρεπτικὸς ἀπὸ τοὺς δέκα ἐκείνους σεισμούς. Ἦταν ἕνας ἀπὸ τοὺς 5 σφοδρότερους σεισμούς πού συνεκλόνησαν τὴ βυζαντινὴ πρωτεύουσα καθ' ὅλους τοὺς ἑνδεκα αἰῶνες τῆς βασιλείας της (330-1453)· καὶ ἕνας ἀπὸ τοὺς 7 μεγαλυτέρους πού ἔγιναν στὴν περιοχὴ μέχρι σήμερα.

Ἐξ ἄλλου ἦταν ὁ ἐντονώτερος κλόνος (ὁ μεγαλύτερας ἐντάσεως σεισμός), πού ἔγινε ποτέ ἕως τὴν ἡμέρα ἐκείνη (τὰ διαθέσιμα στοιχεῖα εἶναι ἀπὸ τὸ 330 μ.Χ. πού ἐκτίσθη ἡ Κωνσταντινούπολη ὡς μεγαλούπολη καὶ πρωτεύουσα· τὸ μέχρι τότε ὑπάρχον ἀρχαῖον Βυζάντιον ἦταν μικρὴ πολιτεία, στὴν ὁποία καὶ σεισμοὶ μεγάλου μεγέθους ἐὰν ἔγινε ποτέ, δὲν θὰ εὐρῆκε πολλά πράγματα νὰ καταστρέψῃ). Εὐλόγως ἐπομένως σημειώνει ὁ Θεοφάνης ὅτι: «Τοιοῦτον γὰρ μέγαν καὶ φοβερὸν σεισμὸν οὐ μέμνηται ἄνθρωπος ἐπὶ τῆς γῆς ἐν τῇ γενεᾷ ἐκείνῃ. Ἐμμεῖς δὲ σειομένη ἡ γῆ ἡμέρας καὶ νυκτὸς (μετὰ φιλανθρωπίας) ἡμέρας δέκα... ὁ δὲ βασιλεὺς οὐκ ἐφόρσε τὸ στέμμα ἐπὶ ἡμέρας μ' (40) ἀλλὰ καὶ τῇ ἀγίᾳ τοῦ Χριστοῦ γεννήσει χωρὶς αὐτοῦ προῆλθεν ἐν τῇ ἐκκλησίᾳ» [2].

Γιὰ τὶς ἐπισκευές, στίς ὁποῖες προέβη ἀμέσως μετὰ τὸν ἰσχυρὸν σεισμὸν τῆς 14-12-557 ὁ βασιλεὺς, ὁ Ἀγαθίας μᾶς πληροφορεῖ: «Ὁ δὲ βασιλεὺς πολλὰ τῶν οἰκοδομημάτων τὰ μὲν σαθρὰ καὶ ἀσθενῆ γεγεννημένα, ἔνια δὲ ἤδη καὶ καταπεπτωκότα, ἐπανορθοῦν ἐπειράτο. Ἐπεφρόντιστο δὲ εἰς τὰ μάλιστα ὁ μέγιστος τοῦ Θεοῦ νεώς».

Ἐφρόντισε λοιπὸν ὁ Ἰουστινιανὸς μὲ ἰδιαιτέραν ἐπιμέλειαν γιὰ τὴν ἐπισκευὴ τῶν βλαβῶν, πού εἶχε πάθει ἡ Ἀγία Σοφία κατὰ τοὺς σεισμοὺς τοῦ Δεκεμβρίου τοῦ 557.

Ἐνῶ ὁμως εἶχαν στηθῆ σκαλωσιές καὶ γινόταν ἐπισκευὴ τοῦ τρούλλου καὶ τῆς ἀνατολικῆς ἀψίδος, πού εἶχαν ὑποστῆ σοβαρὲς βλάβες, ξαφνικὰ κάπως, τὴν 7ην Μαΐου 558, ὁ μεγάλος τρούλλος κατέρρευσε.

Μαρτυρίαν δὲν ἔχουμε ἀπὸ σύγχρονο χρονογράφο. Μόνο 250 περίπου χρόνια ἀργότερα ὁ Θεοφάνης [2] θὰ σημειώσῃ: «Φιλοκαλουμένου τοῦ τρούλλου τῆς μεγάλης ἐκκλησίας (ἦν γὰρ διερρηγμένος ἐκ τῶν γενομένων σεισμῶν..) ἔπεσε τὸ ἀνατολικὸν μέρος τῆς προὔποστολῆς τοῦ ἀγίου θυσιαστηρίου καὶ συνέτριψε τὸ κιβώριον καὶ τὴν ἀγίαν τράπεζαν καὶ τὸν ἄμβωνα».

Ὁ Ἀνθέμιος καὶ ὁ Ἰσίδωρος εἶχαν ἐν τῷ μεταξὺ πεθάνει. Ὁ Ἰουστινιανὸς — γέρον πλέον — ἐκάλεσε γιὰ τὴν ἀνακατασκευὴ ἕνα ἄλλον διακεκριμένον μηχανοποιὸν τῆς ἐποχῆς, τὸν Ἰσίδωρον τὸν νεώτερον, ἀνεψιὸν τοῦ ἀρχικοῦ μελετητοῦ τοῦ ναοῦ.

Αὐτὸς ἐπὶ 5 χρόνια ἐπεσκεύαζε τὸν τρούλλο καὶ τὴν γύρω περιοχὴ, ἐνισχύοντας τὴν καμπύλην ἐπιφάνειαν — ἐνδειξῆ, ἀν μὴ ἀπόδειξῆ, ὅτι ἐκεῖ ἐνετόπισε τὴν ἀδυναμία — κατὰ τοὺς ἐξῆς δύο τρόπους:

α) Ἀντικατέστησε τὸ σταθεροῦ πάχους κέλφος τοῦ τρούλλου, πού ἦταν καὶ πάχος τῶν 40 στυλίσκων του, μὲ πλῆθος ἀντηρίδων πολὺ περισσότερον δυσκάμπτων. Στίς ἀντηρίδες περιελαμβάνοντο καὶ ὅλοι οἱ στυλίσκοι (παρὰ τὴν βάση τοῦ

τρούλλου), πού απέκτησαν πλέον ηύξημένην δυσκαμψίαν. Μόνον τὰ μεταξὺ τῶν ἀντηρίδων τμήματα τοῦ κελύφους εἶχαν τὸ παλαιὸν ἴσως μικρὸ πάχος.

β) Ἡύξησε τὸ ὕψος τοῦ τρούλλου κατὰ 6 μέτρα περίπου καὶ τὸν ἔκαμε πλη-
ρες ἡμισφαίριον διαμέτρου 32 μ. Αὐτὸ θὰ ἀσκοῦσε μικρότερες ὀριζόντιες ὠθήσεις
στὴ στεφάνη τῆς βάσεως ὑπὸ κανονικὰς συνθῆκας λειτουργίας (χωρὶς σεισμό).

Ὁ νέος αὐτὸς ἐνισχυμένος τρούλλος (στὸν ὁποῖον φυσικὰ εἶχε θυσιασθῆ
μέρος τῆς ἐλαφρότητός του καὶ τῆς κομψότητός του) ἔζησε, χωρὶς σοβαρὰς βλάβες,
ἐπὶ πολλοὺς κατόπιν αἰῶνες.

3. Κατὰ καιροὺς καὶ μέχρι σήμερον ἐρμηνεῖς τῶν αἰτίων τῆς πτώσεως τοῦ τρούλλου.

α) Ἡ παλαιότερα ἐρμηνεία τῶν αἰτίων τῆς πτώσεως τοῦ ἀρχικοῦ ἐκείνου
κεντρικοῦ τρούλλου τῆς Μεγάλης Ἐκκλησίας συναντᾶται εἰς τὸν Θεοφάνη (τέλος
Η' αἰῶνος). Αὐτὸς σημειώνει ὅτι τὰ ἱκριώματα (σκαλωσιές), πού ἐχρησιμοποιοῦ-
θησαν γιὰ τὴν ἐπισκευὴ τοῦ τρούλλου τὴν ἀνοιξὴ τοῦ 558 (μετὰ τὸν ἰσχυρὸ σεισμὸ
τῆς 14.12.557), εἶχαν στερεωθῆ στοὺς πεσσοὺς μὲ διάνοιξη φυσικὰ καταλλήλων
ὀπῶν. Ἀπὸ τὶς «φωλιές» αὐτὰς ὅμως οἱ πεσσοὶ ἐξησθένησαν (ἀπὸ τὴ μείωση τῆς
διατομῆς τους καὶ τοὺς κραδασμοὺς) καὶ μερικοὶ ὑπέστησαν ἀρκετὰ σοβαρὰ βλάβη.

Προφανῶς ὁ χρονογράφος δὲν ἀναφέρεται στοὺς 4 μεγάλους πεσσοὺς τοῦ
κέντρου τοῦ ναοῦ, πού ἔφεραν τὰ κατακόρυφα φορτία τοῦ τρούλλου. Οἱ τερά-
στιοι σὲ διατομὴ αὐτοὶ πεσσοὶ οὔτε εὐαίσθητοι ἦσαν σὲ διάνοιξη μικρῶν σχετικὰ
ὀπῶν στηρίξεως ἱκριωμάτων οὔτε πληροφορία ἢ ἔνδειξη ὑπάρχει ὅτι ὑπέστησαν
κάποια βλάβη. Ἀντιθέτως ὁ Ἀνώνυμος χρονογράφος σημειώνει [6, τομ. Α',
σελ. 20] ὅτι οἱ μεγάλοι ἐκεῖνοι πεσσοὶ (στύλοι) ἔμειναν «ἀσάλευτοι» στὸ μεγάλο
σεισμό.

Πρέπει ἐπομένως νὰ πρόκειται περὶ τῶν 40 στυλίσκων, πού ἦσαν κυκλικῶς
διατεταγμένοι κάτω ἀπὸ τὸ κέλυφος καὶ ἐπάνω ἀπὸ τὴ βάση τοῦ τρούλλου. Μερικοὶ
ἀπὸ αὐτοὺς πρέπει πράγματι νὰ ἔσπασαν. Ἡ θραύση τους ὅμως δὲν ὠφείλετο στὴν
ἐκ τῶν ὀπῶν ἐξασθένησή τους ἀλλὰ σὲ ρήγματα — ἢ ἐσωτερικὴ ἀποδιοργάνωση —
πού εἶχαν ὑποστῆ ἀπὸ τὸν ἰσχυρὸ σεισμὸ καὶ τοὺς μετασεισμοὺς τοῦ προηγούμενου
Δεκεμβρίου. Ἡ διάνοιξη ὀπῶν πιθανῶς ἀπετέλεσε τὴ σταγόναν πού ἔκανε τὸ ποτήρι
τῆς ἀποδυναμώσεως νὰ ξεχειλίση καὶ ἢ ἤδη εὐαίσθητη ἰσορροπία τους νὰ καταστραφῆ.
Ἡ κατάρρευσή τους ἦταν ἤδη ἐπικειμένη καὶ ἢ παραμικρὰ περαιτέρω ἀποδυναμώση
ἢ δόνηση θὰ ἐπέφερε τὴν ἀστοχίαν (τὴ θραύση). Ἡ ἔναρξη τῆς καταρρέυσεως πρέπει
πράγματι νὰ ἔγινε ἀπὸ τοὺς στυλίσκους παρὰ τὴ βάση τοῦ τρούλλου (ἐφ' ὅσον ὁ

χρονογράφος έννοεῖ αὐτοὺς ὡς πεσσοὺς), ἡ αἰτία ὅμως δὲν ἦταν ἡ ἐδῶ ἀναφερομένη. Αὐτὴν θὰ τὴν ἰδοῦμε στὴν τελευταία παράγραφο.

β) Μερικοὺς αἰῶνες ἀργότερα ὁ χρονογράφος Γ. Κωδινὸς [4, σελ. 72] ἀναφέρει ὅτι κατὰ τὴν ἀποψη τεχνικῶν, τῶν ὁποίων τὴ γνώμη ἐζήτησεν ὁ Ἰουστινιανός, αἰτία τῆς πτώσεως τοῦ τρούλλου ὑπῆρξεν ἡ πρόωρος ἀφαίρεση τῶν ἱκριωμάτων, ποὺ ἔγινε γιὰ νὰ ἐπισπευσθῇ ἡ ἀγιογράφηση τῶν νέων κατασκευῶν τῆς ὀροφῆς. «... Καὶ ὅτι τὰς σκαλώσεις κόπτοντες οἱ τεχνῖται ἔρριπτον εἰς τὸ ἔδαφος καὶ ἀπὸ τούτου ἔπεσεν ὁ τρούλλος».

Μὲ ἄλλες λέξεις ὁ Κωδινὸς θεωρεῖ ὡς αἰτίαν τῆς καταρρέσεως, ἀφ' ἑνὸς μὲν τὴν πρόωρον ἀφαίρεση ξυλοτύπων-ὑποστηριγμάτων, ἀφ' ἑτέρου δὲ τοὺς κραδασμοὺς τοῦ δαπέδου καὶ τοῦ ἔδαφους ἀπὸ τὴν ρίψη τῶν τεμαχίων τῶν ἱκριωμάτων ἀπὸ μεγάλο ὕψος. Ἡ ἐρμηνεία δὲν ἀντέχει βέβαια εἰς σοβαρὰν βάσανον.

γ) Τὸν προηγούμενον αἰῶνα ὁ Γερμανὸς Χάμμερ [5] ἐθεώρησεν ὡς κυρίαν αἰτίαν καταρρέσεως τοῦ τρούλλου τὸ ἰλυῶδες (πηλῶδες) πολὺ μαλακὸν ἔδαφος, ἐπὶ τοῦ ὁποίου εἶχε θεμελιωθῇ ὁ ναός, ἰδιαιτέρως δὲ τὸ δυτικὸν τμήμα του.

Καὶ ἡ ἐκδοχὴ αὐτὴ δὲν φαίνεται νὰ εὐσταθῇ —οὔτε ὡς δευτερεύων ἴσως παράγων— ὅχι μόνον διότι ἡ ὅλη θεμελίωση περιγράφεται ἀπὸ τοὺς συγχρόνους ὡς πολὺ στιβαρὰ καὶ ἀρτία ἀλλὰ κυρίως διότι, ἐπὶ μακρὰν σειρὰν αἰῶνων καὶ μέχρι σήμερον, ἀπεδείχθη ἱκανοποιητικὴ καὶ ἐπαρκής, χωρὶς ποτὲ νὰ ἐμφάνιση ἢ νὰ δημιουργήσῃ ἄξια λόγου προβλήματα. Ἀπὸ καμμίαν ἱστορικὴν πηγὴν καὶ καμμίαν ἐνέργειαν τῶν συγχρόνων μὲ τὴν πτώση τοῦ τρούλλου τεχνικῶν δὲν προκύπτει —ἀμέσως ἢ ἐμμέσως— κάποιου εἶδους ἀστοχία ἢ ὀπωσδήποτε ἐλαττωματικότης τῆς θεμελιώσεως (ὀλοκλήρου ἢ τμήματός της).

δ) Μίαν ἄλλην ἐρμηνείαν τῆς κυρίας αἰτίας καταρρέσεως τοῦ γεντρικοῦ τρούλλου δίδει ὁ Εὐγ. Ἀντωνιάδης [6, σελ. 19 τοῦ Α' τόμου].

«Ὁ σεισμός», γράφει, «τοῦ 553 θὰ ἐξησθένησε κάπως τὴν κορυφὴν τῆς κακῶς ἐκτισμένης, ὡς εἶδομεν*, ἕως ἀψίδος, ἐνῶ ὁ τοῦ 557 διέρρηξεν αὐτὴν.

* Στὴ σελ. 16 εἶχε σημειώσει ὁ Ἀντωνιάδης: Κατὰ τὴν κρίσιν δυσάρεστόν τι συνέβη εἰς τὴν ἑῶν (ἀνατολικὴν) ἀψίδα, ὅπερ κατέστησεν αὐτὴν ἐπισφαλῆ. «Τῶν ἀψίδων... (λώρους δὲ αὐτὰς οἱ μηχανοποιοὶ ἐπικαλοῦσι)», γράφει ὁ Προκόπιος, «μία τις, ἢ πρὸς ἀνίσχοντα ἤλιόν ἐστιν, ἐπανειστήκει μὲν ἐκατέρωθεν ἤδη, οὕτω δὲ ὅλη τὸ μέσον συνετετέλεστο ἄλλ' ἔμενον ἔτι, οἱ δὲ πεσσοὶ ὧν δὴ ὑπερθεν ἡ οἰκοδομία ἐγένετο, τῶν ἐγκειμένων σφίσιν οὐκ ἐνεγκόντες τὸ μέγεθος ἀμηγέτη ἐξαπιναιῶ ἀπορρηγνύμενοι, οὐκ ἐς μακρὰν διαλυθησομένοις ἐφέκασαν. Οἱ μὲν οὖν τε Ἀνθέμιον καὶ Ἰσίδωρον τοῖς συμπεπτωκόσι περίφοβοι ὄντες ἐπὶ τὸν βασιλέα τὸ πρᾶγμα ἔγον, δυσέλπιδες ἐπὶ τῇ τέχνῃ γεγεννημένοι. Αὐτίκα δὲ ὁ βασιλεὺς ὅτω μὲν ποτε ἠγμένος οὐκ οἶδα, Θεῶ δὲ

Ὁ Ἰουστινιανὸς ἐπεμελήθη ἀμέσως τῆς σταρεώσεως τοῦ πεπονθότος τῆς ὀροφῆς μέρους, ἀλλ' εἰς μάτην· πέντε μόλις μῆνας μετὰ τὸν κλόνον τοῦ 557, ἦτοι τῇ 7 Μαΐου 558, ὥρα πέμπτη (ἦτοι περίπου 12ῃ μεσημβρινῇ), λέγει ὁ Θεοφάνης: «φιλοκαλουμένου τοῦ τροῦλλου τῆς μεγάλης ἐκκλησίας (ἦν γὰρ διερρηγμένος ἐκ τῶν μεγάλων σεισμῶν...) ἔπεσε τὸ ἀνατολικὸν μέρος τῆς προὔποστολῆς τοῦ ἁγίου θυσιαστηρίου καὶ συνέτριψε τὸ κιβώριον καὶ τὴν ἁγίαν τράπεζαν καὶ τὸν ἄμβωνα».

Στὴν ἐκδοχὴ αὐτῇ ἂς παρατηρήσουμε ὅτι ἡ κακοτεχνία, πού εἶχε γίνεαι κατὰ τὴν κατασκευὴ τῆς ἀνατολικῆς ἀψίδας, ὅταν κτιζόταν ὁ ναός, εἶχε ἀποκατασταθῆ ἀμέσως τότε καὶ φαντάζεται κανεὶς μὲ πόσῃ ἐπιμέλειαν λόγῳ τοῦ προξενηθέντος φόβου καὶ κάτω ἀπὸ τὸ ἄγρυπνο μάτι τοῦ Ἰουστινιανοῦ, τοῦ Ἀνθεμίου καὶ τοῦ Ἰσιδώρου. Ἡ ἐπανακατασκευὴ, κατὰ τεκμήριον, πρέπει νὰ ὑπῆρξεν ἀμεμπτη καὶ ἰδιαιτέρως ἀνθεκτικὴ ἀπὸ τὸ φόβο νέου ἀτυχήματος. Δὲν εἶναι ἐπομένως λογικῶς δυνατὸν νὰ ὑπῆρξε ἐκεῖ ἡ ἀρχικὴ αἰτία τῆς καταστροφῆς. Κάτι ἄλλο, ἀπροσδόκητο, κατεπόνησε τὴν κρίσιμη στιγμή τὴν ἀψίδα αὐτὴ καὶ αὐτὸ δὲν μπορεῖ παρὰ νὰ προερχόταν ἀπὸ τὸν τροῦλλο. Σοβαρὰν ἔνδειξη, ἀν μὴ ἀπόδειξη, τῆς λογικῆς αὐτῆς ἀποτελεῖ καὶ ἡ πληροφορία τῶν χρονογράφων, ὅτι ὁ Ἰσιδῶρος ὁ νεώτερος ἐνετόπισε τὴν προσοχὴν του κατὰ τὴν ἐπισκευὴ τὴν ἐνίσχυση τῆς ἀντοχῆς αὐτοῦ τοῦτου τοῦ τροῦλλου καὶ καμμία εἰδικὴ μνεία δὲν γίνεται γιὰ ἀνατολικὴ ἀψίδα, πού φαίνεται ὅτι ἀπλῶς ἐπανακατασκευάσθηκε.

Ἄς κρατήσουμε ὅμως γιὰ τὰ ἐπόμενα τίς πληροφορίες τοῦ Θεοφάνη ὅτι: I. Ἀπὸ τοὺς μεγάλους σεισμοὺς τοῦ Δεκεμβρίου τοῦ 557 εἶχε διαρραγῆ ὁ τροῦλλος καὶ II. ὅτι κατέρρευσε ὁ τροῦλλος αὐτὸς μὲ τμήμα τῆς ἀνατολικῆς ἀψίδας.

ε) Προσφάτως τέλος ἡσχολήθη πολὺ μὲ τὸ ναὸ τῆς Ἀγίας Σοφίας, τίς λεπτομέρειες κατασκευῆς του καὶ μὲ τὴν ἀποτύπωση τῶν στοιχείων του, ὅπως εἶναι σήμερα, ὁ Βρετανὸς μηχανικὸς R. Mainstone [8, 9, 10]. Αὐτὸς ξεκινώντας ἀπὸ τὴν παρατήρησίν του ἔτι, σήμερα ὑπάρχει κάποια ἀπόκλιση ἀπὸ τὴν κατακόρυφο τῶν ἄνω ἄκρων τῶν 4 μεγάλων πεσσῶν καὶ κάποια βύθιση τῆς κορυφῆς τῶν ἀψίδων (ἔρωτητέον ὅμως ἐὰν αὐτὰ ἐγιναν τότε — κατὰ τὸ σεισμὸ τῆς 14.12.557 — καὶ σχεδὸν στιγμιαίως ἢ μήπως πρόκειται γιὰ χρόνιες παραμορφώσεις πού συνετελέσθησαν μέσα στοὺς 14 καὶ πλέον αἰῶνες, πού παρήλθαν μέχρι σήμερα;) εἰκάζει ὅτι κατὰ τὸν μεγάλο σεισμὸ τοῦ Δεκεμβρίου τοῦ 557 οἱ πεσοὶ ἐδέχθησαν ἰσχυρὰν ὀριζοντίαν ὄθιση στὰ ἄνω ἄκρα τους, μὲ συνέπεια νὰ μετατοπισθοῦν κάπως

οἶμαι (οὐ γὰρ ἐστὶ μηχανικὸς) ἐς τὸ πέρασ αὐτοῖς περιελίξαι τὴν ἀψίδα ταύτην ἐπήγγελεν. Αὐτὴ γὰρ, ἔφη, ἐφ' ἑαυτῆς ἀνεχομένη, τῶν ἐνεργειῶν πεσσῶν οὐκέτι δεήσει...

Οἱ μὲν τεχνίται τὰ ἐπιτεταγμένα ἐποιοῦν, ἡ δὲ ἀψὶς ἐπὶ ἀσφαλοῦς ἠώρητο πᾶσα, ἐπισφραγίζουσα τῇ πείρᾳ τὴν τῆς ἐνοίας ἀλήθειαν».

τά άκρα αυτά όριζοντίως πρὸς τὰ ἔξω κατὰ τὴ διεύθυνση Β-Ν. Στὴ συνέχεια οἱ ἀψίδες ἀνοίξαν λόγω ὑποχωρήσεως τῶν στηριγμάτων τους (αὐτὸ πρέπει νὰ ἀναφέρεται κυρίως στὴν ἀνατολικὴ καὶ τὴ δυτικὴ ἀψίδα, ἐνῶ στὶς δύο ἄλλες οἱ συνέπειες ἦσαν ἐλαφρότερες, καθ' ὅσον ἡ μετατόπιση τῶν στηριγμάτων ἐκάστης ἔγινε πρὸς διεύθυνση κάθετο ἐπὶ τὸ ἐπίπεδόν τους, χωρὶς νὰ ἀπομακρυνθοῦν τὰ στηρίγματα ἀπ' ἀλλήλων).

Συνέπεια τῆς «βυθίσεως» τῆς ἀνατολικῆς ἀψίδας — λέγει ὁ Mainstone — ἦταν νὰ ὑποχωρήσῃ τὸ στηρίγμα μερικῶν στυλίσκων τοῦ τρούλλου καὶ νὰ ἐπέλθῃ ἄλυσιδωτὴ κατάρρευση.

Στὸ συλλογισμό αὐτὸν τοῦ Βρεταννοῦ μηχανικοῦ δύναται κανεὶς νὰ παρατηρήσῃ ὅτι ἐὰν ἡ ὀριζοντία μετατόπιση τῶν ἄνω ἄκρων τῶν πεσσῶν ὠφείλετο σὲ δράση σεισμοῦ, ἔπρεπε ὅλες οἱ μετακινήσεις νὰ ἔχουν γίνῃ πρὸς τὴν αὐτὴν κατεύθυνση, ὅποτε δὲν θὰ ἀνοίγε καμμιά ἀψίδα. Ἐὰν ἐπομένως σήμερα τὰ στηρίγματα τῶν ἀψίδων (ἔστω καὶ μιᾶς) ἔχουν μετακινήθῃ πρὸς τὰ ἔξω εἰς τρόπον ὥστε νὰ «βυθισθῇ» κάπως ἡ ἀψίδα, ἡ αἰτία δὲν πρέπει νὰ ἀναζητηθῇ σὲ σεισμό.

4. Ἀντισεισμικὸς ὑπολογισμὸς τοῦ τρούλλου μὲ τὶς γνώσεις τῶν μέσων τοῦ 20οῦ αἰῶνος.

Στὴν προσπάθειά μας νὰ ἀνεύρουμε ὄχι μόνον τὴν πραγματικὴ καταπόνηση καὶ συμπεριφορὰ τοῦ τρούλλου κατὰ τὸν ἰσχυρὸ σεισμό τῆς 14ης Δεκεμβρίου 557 ἀλλὰ καὶ τὸν βαθμὸ τῆς εὐθύνης, πού πρέπει ἴσως νὰ καταλογισθῇ στοὺς «μηχανοποιούς» τοῦ ναοῦ γιὰ κακὴ — κατὰ διαίσθηση βέβαια — ἐκτίμηση τῆς ἀναγκαίας ἀντοχῆς τοῦ τρούλλου, καὶ τῆς χρυσῆς τομῆς πού ἐπέλεξαν μεταξύ στατικῶν καὶ ἀρχιτεκτονικῶν ἀπαιτήσεων*, ἃς ξεκινήσουμε ἀπὸ τὸν τρόπο ὑπολογισμοῦ καὶ τὴν ἀνθεκτικότητα σὲ σεισμό, πού θὰ τοῦ προσέδιδε ἕνας στατικὸς πολιτικὸς μηχανικὸς τῶν μέσων τοῦ αἰῶνος μας. Γιὰ νὰ ἔχουμε συγκεκριμένην βάση, ἃς δεχθοῦμε ὡς τέτοιαν τὸν Ἑλληνικὸν Ἀντισεισμικὸν Κανονισμό τοῦ 1959 [11], πού ἐκφράζει ἄλλωστε τὴ στάθμη τῶν γνώσεων τῆς ἐποχῆς του, ἣτοι τῶν μέσων τοῦ αἰῶνος μας.

Βάσει λοιπὸν τοῦ Κανονισμοῦ αὐτοῦ καὶ δεδομένου ὅτι ὁ τρούλλος δὲν εἶχεν ἄλλην ὑπὲρ αὐτὸν κατασκευὴν, δέχεται κατὰ τὸν ἰσχυρότερον πιθανὸν σεισμὸν μίαν ἰσοδύναμον στατικὴν ὀριζοντίαν δύναμη, πού σὲ κάθε στάθμη ἔχει τιμὴ

$$W_i = \epsilon \cdot P_i \quad (1)$$

ὅπου: P_i εἶναι ὅλα τὰ ὑπὲρ τὴν θεωρουμένην στάθμην i κατακόρυφα φορτία καὶ ϵ ἕνας συνολικὸς συντελεστὴς καθοριζόμενος ἀπὸ τὸν Κανονισμό συναρτῆσει τῆς

* Εἶναι προφανὲς ὅτι ὅσον ἀνθεκτικώτερος — «βαρύτερος» — γινόταν ὁ τρούλλος ἐκεῖνος τόσοσον ἔχανε σὲ αἰσθητικὴ ὁμορφιά (καὶ μαζί του ἔχανε τὸ ὅλον οἰκοδόμημα).

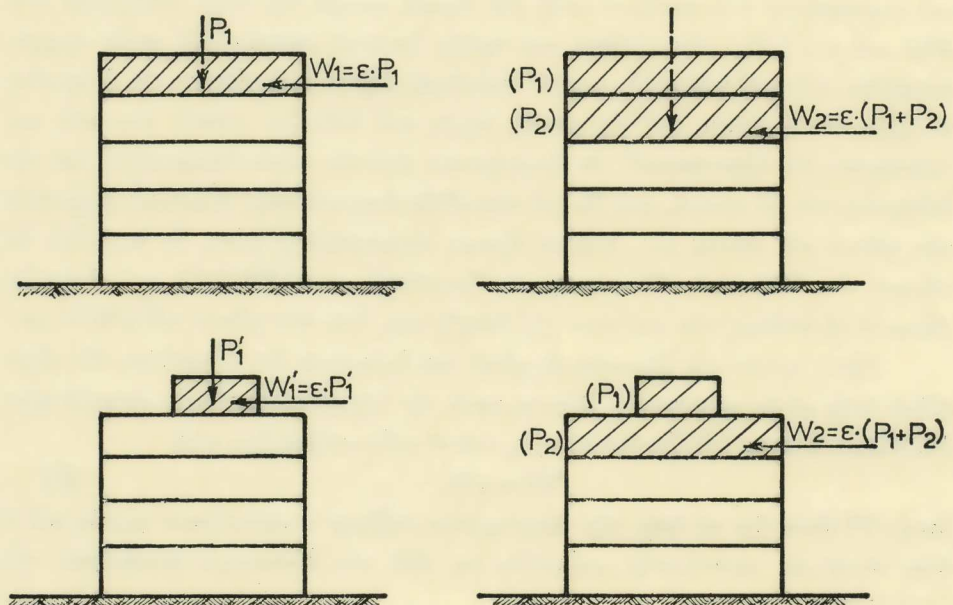
σεισμικῆς ἐπικινδυνότητος τῆς περιοχῆς (δηλ. ἀπὸ τὸ πόσον ἰσχυροὶ σεισμοὶ ἔχουν γίνῃ ποτὲ ἐκεῖ) καὶ ἀπὸ τῆ σύστασιν τοῦ ἐδάφους, ἐπὶ τοῦ ὁποίου πρόκειται νὰ ἀνεγερθῇ ἡ οἰκοδομή.

Ὁ συντελεστὴς ε παρέχεται κατὰ τὸν ἰσχύοντα Ἀντισεισμικὸ Κανονισμὸ ἀπὸ τὸν παρατιθέμενο πίνακα Α'.

Πίναξ τιμῶν τοῦ σεισμικοῦ συντελεστοῦ ε

Ἔδαφος	ε	Ἐπικινδυνότης περιοχῆς		
		μικρὰ	μέση	μεγάλῃ
Καλὸ		= 0,04	0,06	0,08
Μέτριον		0,06	0,08	0,12
Κακὸ		0,08	0,12	0,16

Τὸ Σχ. 2 καθιστᾶ σαφῆ τὸν τρόπο ἐφαρμογῆς τῆς σχέσεως (1) σὲ διάφορες στάθμες ἐνὸς τυπικοῦ οἰκοδομήματος. Ἡ ἀνωτέρω σχέση ἰσχύει τόσο γιὰ τὸν τροῦλλον στὴν ἀνωτάτη ἐκείνη θέση τοῦ ναοῦ, πού εὑρίσκεται, ὅσον καὶ σὲ μιὰ παραπλησία σὲ μορφή κατασκευῆ — π.χ. ἓνα Palais des sports — ἀπ' εὐθείας στῆρι-



Σχ. 2

ζομένην ἐπὶ τοῦ ἐδάφους ἢ ἀκόμη καὶ ἐπὶ μιᾶς ὑπερυψωμένης βάσεως (Σχ. 3).

Ὅσον ἀφορᾷ στὴν τιμὴ τοῦ ϵ , ποῦ ἐνδείκνυται νὰ ἐκλεγῆ ἀπὸ τὸν Πίνακα Α' γιὰ μιὰ, κατὰ τὸν Κανονισμό τοῦ 1959, ἀντισεισμικὴ στατικὴ μελέτη τοῦ ναοῦ τῆς Ἁγ. Σοφίας, πρέπει νὰ παρατηρήσουμε ὅτι:

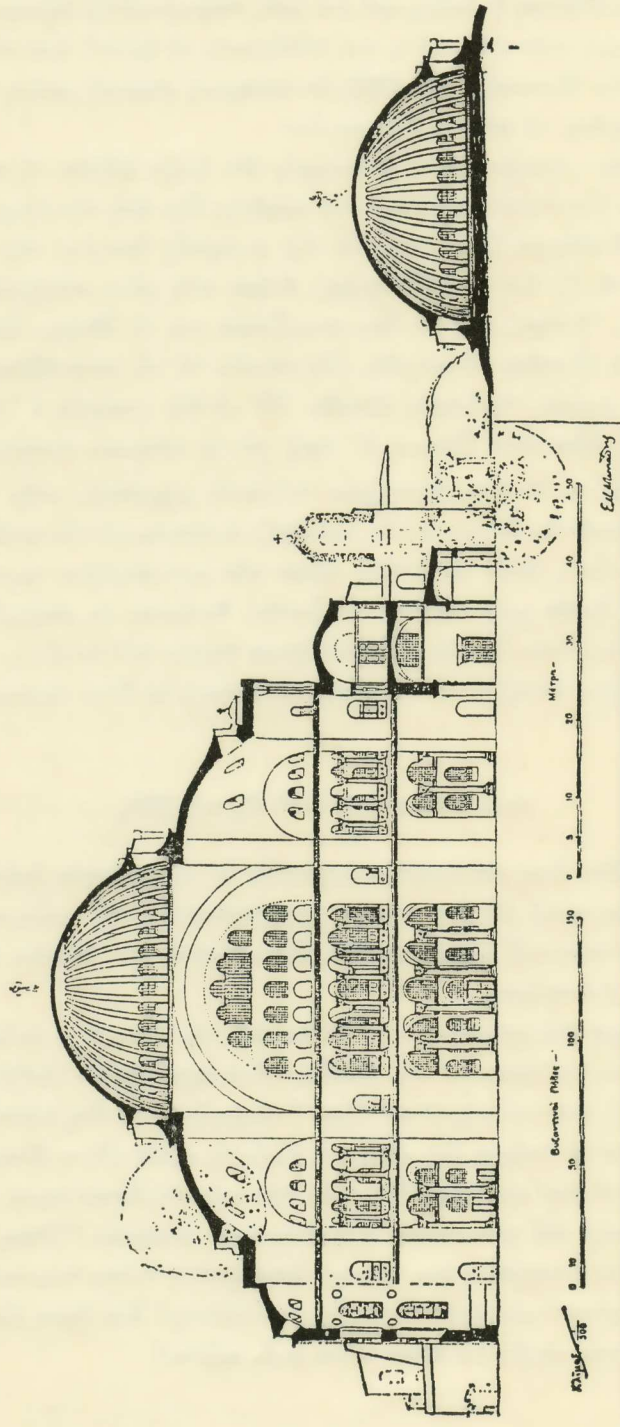
α) Ὁ Ἕλληνας ἀντισεισμικὸς κανονισμὸς δὲν ὀρίζει βέβαια τὴ σεισμικὴ ἐπικινδυνότητα τῆς Κωνσταντινουπόλεως, ὡς κειμένης ἔξω ἀπὸ τὴν ἑλληνικὴν ἐπικράτειαν, ἀπὸ τὰ διαθέσιμα ὅμως στοιχεῖα τῆς σεισμικῆς ἱστορίας της δυνάμεθα νὰ εἰποῦμε ὅτι αὐτὴ (ἢ Κωνοταντινούπολη) ἀνήκει στὴ μέση κατηγορία σεισμικῆς ἐπικινδυνότητας. Ἀκόμη, ἀπὸ τὰ ὅσα γνωρίζουμε γιὰ τὸ ἔδαφος, ἐπὶ τοῦ ὁποίου ἔχει ἀνεγερθῆ ἡ Μεγάλῃ Ἐκκλησία, ὀδηγούμεθα νὰ τὸ κατατάξουμε στὴ μέση κατηγορία τῶν μετρίως ποιότητος ἐδαφῶν. Μὲ τὰ δύο στοιχεῖα ὁ Ἀντισεισμικὸς Κανονισμὸς μᾶς δίδει στὸν Πίνακα Α' τιμὴ γιὰ τὸ σεισμικὸ συντελεστὴ $\epsilon=0,08$.

Αὐτὸ σημαίνει ὅτι ἕνας ἐπιστήμων πολιτικὸς μηχανικὸς, στὴν Ἑλλάδα τοῦ 1959 (καὶ γιὰ δεκαετίες ἀργότερα) θὰ ὑπελόγιζε ἀντισεισμικὰ τὸν τροῦλλο τῆς Ἁγ. Σοφίας κατὰ τρόπον, ὥστε νὰ ἀντέχη πέραν τῶν κατακορύφων φορτίων του καὶ στὴν ἐπ' αὐτοῦ δράση μιᾶς στατικῆς ὀριζοντίας δυνάμεως ἐκ σειμοῦ, ἕως πρὸς $W_0=0,08P_0$ (Ia), ὅπου P_0 ὅλα τὰ κατακόρυφα φορτία τοῦ τροῦλλου. Ἡ πραγματικὴ ἀντοχὴ μέχρις ἀστοχίας (ἐντόνου ρηγματώσεως) θὰ ἦταν περίπου τριπλασία, ἦτοι

$$\text{ὀριακὸ } W_0 \approx 3 \times 0,08 P_0 = 0,24P_0 \quad (2)$$

ἐὰν ληφθῆ ὑπ' ὄψιν ἕνας συντελεστὴς ἀσφαλείας δι' ἀβεβαιότητα δράσεων περίπου ἴσος μὲ 3 (ὅσος κατὰ μέγιστον ὄριον χρησιμοποιεῖται στὶς κατασκευές, πέραν βεβαίως τοῦ συντελεστοῦ ἀσφαλείας γιὰ ἀβεβαιότητα τῶν ὑλικῶν, ποῦ στὸ πρόβλημά μας δὲν ἐνδιαφέρει).

Θὰ δεῖξουμε στὰ ἐπόμενα ὅτι αὐτὴν ἀκριβῶς τὴν ἀντοχὴ σὲ ὀριζοντία δύναμη διέθετε ὁ μεγάλος τροῦλλος τῆς Ἁγ. Σοφίας. Οἱ «μηχανοποιοὶ» Ἀνθέμιος καὶ Ἰσίδωρος, σὰν καλοὶ στατικοὶ μηχανικοὶ εἶχαν διαμορφώσει τὴν ὅλη διάταξιν καὶ κατασκευὴ ἔτσι, ὥστε νὰ ὑπάρχη ὅλη αὐτὴ —ἢ κατὰ τὴ σχέση (2)— ἀντοχὴ, ἀλλὰ καὶ μόνον αὐτὴ. Ἀπὸ ἐκεῖ καὶ πέρα ἔστρεψαν προσοχὴ καὶ δυνατότητες στὴν ἐξυπηρέτηση αἰσθητικῶν καὶ γενικώτερα ἀρχιτεκτονικῶν ἀναγκῶν. Ὅπως ἀκριβῶς θὰ ἔκαναν δύο καλῶς συνεργαζόμενοι τεχνικοὶ ἐπιστήμονες —ἕνας πολιτικὸς μηχανικὸς καὶ ἕνας ἀρχιτέκτων— τῶν μέσων τοῦ εἰκοστοῦ αἰῶνος! Καὶ ὅμως ἐζοῦσαν οἱ μηχανικοὶ ἐκεῖνοι στὶς ἀρχές τοῦ ἔκτου μὸλις μ.Χ. αἰῶνος!



Σχ. 3. Ἡ κατὰ τὸν μείζονα ἕξονα τομὴ τῆς Ἁγίας Σοφίας, περὶ τὰ 950.

5. Νεώτερες εξελίξεις στο πρόβλημα τής σεισμικής δράσεως επί τών κατασκευών.

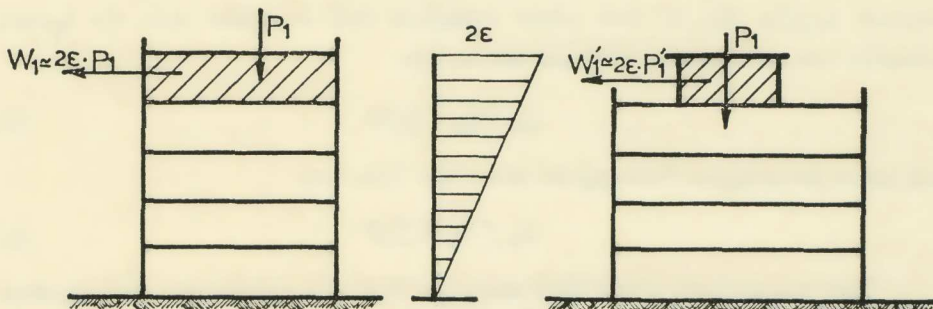
Αυτά πού είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ήσαν οί γενικώς άποδεκτές —χωρίς καμμιά ύποψία λάθους— αντίληψεις για τόν τρόπο έπενεργείας τών σεισμών επί τών κατασκευών μας, μέχρι τά μέσα περίπου του αιώνος μας. Κατά τις λίγες όμως άπό τότε δεκαετίες ύπήρξε μια άπροσδόκητος όσο και βαθειά σέ μερικούς τομείς εξέλιξη γνώσεων, πού έδειξε ότι για μερικούς τύπους κτηρίων και ιδιαίτέρως για μερικά μεμονωμένα τμήματά τους τά πράγματα είναι πολύ δυσμενέστερα άπό όσον μέχρι τότε τά έφантаζόμεθα.

Συγκεκριμένα διεπιστώθη ότι οικοδομήματα με μη όμαλή διαδοχή καθ' ύψος τών κατόψεων τών έπαλλήλων όρόφων και τών δυσκαμψιών, δέχονται στις θέσεις άνωμαλίας πολύ δυσμενή σεισμική καταπόνηση. Τά πράγματα γίνονται ιδιαίτέρως έπαχθη για στοιχειά με τέτοια άνωμαλία, πού ταλαντούνται σέ ώρα σεισμού σάν ανεξάρτητοι πρόβολοι με δική τους περίοδο, διαφορετικήν άπό εκείνη του όλου ύπολοίπου κτηρίου.

Άς παρακολουθήσουμε όμως κάπως αναλυτικά τις όσες άπό τις εξελίξεις αυτές, ενδιαφέρουν την εκ σεισμού καταπόνηση του μεγάλου κεντρικού τρούλλου τής 'Αγ. Σοφίας, πού είναι τó κεντρικό πρόβλημά μας.

α) Καθ' ύψος κατανομή τής ισοδυνάμου στατικής όριζοντίας δυνάμεως λόγω σεισμού επί ένός κτηρίου:

"Άλλοτε ή κατανομή αυτή έθεωρείτο όμοιόμορφος σέ όλο τó ύψος του κτηρίου, σήμερα όμως γίνεται διεθνώς δεκτή μία τριγωνική κατανομή, με μηδενική τεταγμένη στη βάση και μεγίστην στην κορυφή του κτηρίου. 'Η όλική σεισμική δύναμη W δέν αλλάζει. Αυτό σημαίνει τριγωνική κατανομή του σεισμικού συντελεστού· στην κορυφή παίρνει την τιμή $2ε$ και στη βάση μηδενίζεται (σχ. 4). Με άλλες λέξεις ένα στοιχειό τής κατασκευής, πού εύρίσκεται στην κορυφή της (π.χ. ó άνώτατος



Σχ. 4

δροφος ενός πολυωρόφου κτηρίου ή ο τροϋλλος ενός ναού) δέχονται κατά προσέγγιση όριζόντια σεισμική δύναμη

$$W = 2\epsilon \cdot P_0 \quad (3)$$

ήτοι διπλασίαν εκείνης που έδιδε ή σχέση (1).

Τα πράγματα δέν αλλάζουν στη βάση (τόν κατώτατο όροφο του κτηρίου).

Άς σημειωθῆ ότι μερικοί κανονισμοί (π.χ. ο άμερικανικός) θεωροϋν άνεπαρκή ακόμη και τη νέα αυτή τριγωνική κατανομή τῆς όλης επί τῆς κατασκευῆς άσκουμένης ίσοδύναμης στατικής δράσεως. Γι' αυτό και άφαιροϋν από αυτήν ένα τμήμα της, τó όποϊον δέχονται άσκούμενο στην κορυφή του κτηρίου. Ούτω τó ύψηλότερο στοιχείο του κτηρίου (π.χ. ο τροϋλλος ενός ναού) ύπολογίζεται με πολύ μεγαλύτερη παρά άλλοτε σεισμική δύναμη.

β) Πιό μεγάλη σημασία για τó πρόβλημά μας έχει μία άλλη εξέλιξη τών επί τών άντισεισμικών κατασκευών γνώσεών μας, συνδεομένη με την διαφοροποίηση τών ταλαντώσεων μιās μονολιθικής κατασκευῆς και κάποιων στοιχείων της (έξαρτημάτων της, θά έλεγε κανείς) που λόγω θέσεως, μορφῆς και τρόπου συνδέσεώς τους με την ύπόλοιπη κατασκευή, έχουν μιá αϋτοτέλεια συμπεριφορᾶς σέ σεισμό. Τοϋτο έπετεύχθη μόνον χάρη στις τεχνικές προόδους τών τελευταίων έτών, στη χρήση δηλ. τών ηλεκτρονικών ύπλογιστών και όργάνων μετρήσεων παραμορφώσεως, ως και την έπακολουθήσασαν δυνατότητα άντιμετωπίσεως τῆς δράσεως του σεισμοϋ επί τών κατασκευών ως δυναμικοϋ φαινομένου, όπως πράγματι εἶναι.

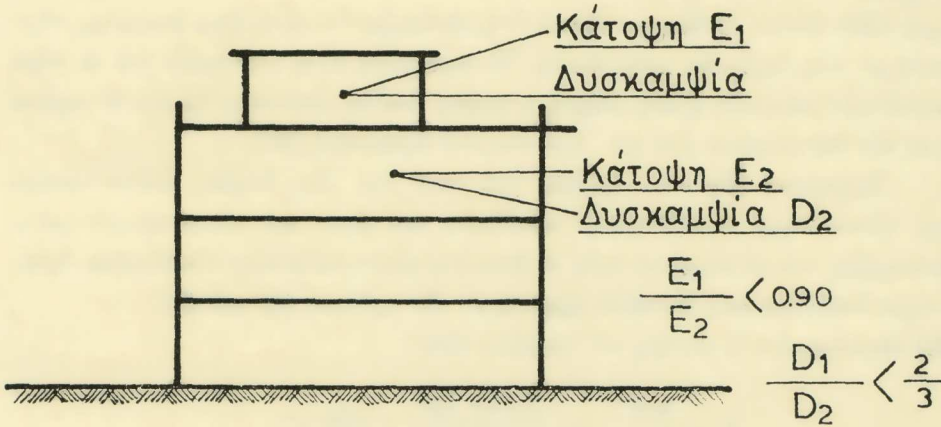
Άπό τις σχετικές μελέτες προέκυψε ότι, όταν σέ μία κατασκευή ύπάρχη στοιχείο που στηρίζεται στον ύπόλοιπο φορέα με στηρίγματα μειωμένης δυσκαμψίας και κατά τρόπο ώστε να μπορη να ταλαντοϋται με δική του περίοδο, σέ ώρα σεισμοϋ καταπονείται με ηϋξημένη σεισμική δράση παρά εάν τó στοιχείο αϋτό έστηρίζετο αϋτοτελώς στο έδαφος. Οί πλέον πρόσφατοι Άντισεισμικοί Κανονισμοί (όπως ο εϋρωπαϊκός του 1982 - [13]) δέχονται ότι ή έπαύξηση τῆς δράσεως του σεισμοϋ άρχίζει (Σχ. 5) από λόγον κατόψεων (του στοιχείου προς την άμέσως κάτωθέν του κατασκευήν) 0,90 και κάτω, δηλ.

$$E_1 / E_2 \leq 0,90 \quad (4)$$

και λόγον άντιστοίχων δυσκαμψιών κάτω τών 2/3, ήτοι

$$D_1 / D_2 \leq 2/3 \quad (5)$$

Στις περιπτώσεις αυτές (που συντρέχει δηλ. μία τουλάχιστον από τις άνωτέρω σχέσεις (4) και (5), καθώς και για οϊοδήποτε προφανώς δευτερεϋον στοιχείο



Σχ. 5. «Ανώμαλα» κτήρια

μιάς οικοδομής (εξάρτημα), που ταλαντούται με δική του περίοδο και μάλιστα πολύ μικρότερη τής του υπόλοιπου κτηρίου (π.χ. στηθαϊόν, αέτωμα, μαρκίζα κ.ά.) ή εκ σεισμού ισοδύναμη στατική δράση αντιστοιχεί σε συνολικό σεισμικό συντελεστή —κατά την έννοια των ισχυόντων κανονισμών μας — σε 3ε έως 8ε ήτοι

$$W_0 = (3\varepsilon \div 8\varepsilon) \cdot P_0 \quad (6)$$

όπου P_0 το συνολικό κατακόρυφο φορτίο του θεωρουμένου «άνωμάλου» ή έντελως δευτερεύοντος στοιχείου.

Οι συνέπειες από την μέχρι πρό τινος άγνοιά μας τής σχέσεως (6) ένεφανίσθησαν κατά τους σεισμούς των τελευταίων δεκαετιών, τους πρώτους που έπληξαν μεγάλους οικισμούς με μοντέρνα δόμηση από ύψηλά πολυώροφα οικοδομήματα. Στόν τόπο μας σοβαρές υπήρξαν οι σχετικές βλάβες κατά τους σεισμούς των Άλκυονίδων νήσων τόν Φεβρουάριον 1981. Πολλά μικρά κτίσματα επί δωματών (ταρασών) πολυκατοικιών στίς σεισμόπληκτες περιοχές έρρηγματώθηκαν έντονα, χωρίς να ύστερούν ποιοτικά από την υπόλοιπον οικοδομήν. Σε παλαιότερα κτήρια έπεφταν καπνοδόχοι και αετώματα. Χαρακτηριστική είναι ή περίπτωση, που αναλύουμε στό άρθρο μας [16]. Νεοανγερεθείσα οικοδομή στην περιοχή Άθηνών είχε πέντε πλήρεις όρόφους με κοινή κάτοψη 18×18 μέτρων. Ένας έκτος όροφος (δῶμα) είχε κάτοψη 6×18 μέτρων δηλ. στή σχέση (4) ήταν

$$E_1 / E_2 = 1/3 \ll 0,90$$

Κατά τους σεισμούς του Φεβρ. 1981 και τὰ όκτώ ύποστυλώματα, επί των όποίων έφερετο ό περιωρισμένης επιφανείας άνώτατος εκείνος όροφος, αποδιωργανώθηκαν

πλήρως, τόσον στις κεφαλές τους ὅσον καὶ στοὺς πόδες τους. Ἡ ὑπόλοιπος οἰκοδομὴ οὐδὲν ἔπαθε. Ὁ ἔλεγχος τῆς μελέτης ἀπέδειξε ὅτι αὐτὴ ἦταν ἀπολύτως σύμφωνη μὲ τοὺς ἰσχύοντες κανονισμούς. Ἡ περίπτωση εἶναι κραυγαλέα γιὰ τὸ πόσο μεγαλύτερη σεισμικὴ δράση ἐδέχθη ὁ μικρὸς ἐκεῖνος ἀνώτατος ὄροφος ἐν σχέσει πρὸς τὴν ἐκτιμωμένην ἀπὸ τὸν Ἀντισεισμικὸ Κανονισμὸ [11].

Ἐρχόμενοι ἤδη στὸν τροῦλλο τοῦ ναοῦ τῆς Ἀγ. Σοφίας, διαπιστώνουμε ὅτι, τόσον λόγῳ περιορισμένης κατόψεως του ὅσον καὶ λόγῳ περιορισμένης δυσκαμψίας του σὲ σύγκριση πρὸς τὸ ἀποκάτω κύριον καὶ ἐνιαῖον οἰκοδόμημα, ἐμπίπτομεν ἀπολύτως στὶς διατάξεις ἀμφοτέρων τῶν σχέσεων (4) καὶ (5).

Πιὸ συγκεκριμένα ἡ κάτοψη τοῦ τροῦλλου εἶναι

$$E_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \times 32^2}{4} \simeq 800 \mu^2$$

ἐνῶ ἡ ἀμέσως κάτωθεν του στέγης, διαστάσεων 71×76 μέτρων, ἔχει κάτοψη

$$E_2 = 71 \times 76 = 5400 \mu^2$$

ἢ ἔστω $E'_2 = 5400 - 800 = 4600 \mu^2$

$$\text{*Αρα } \frac{E_1}{E_2} = \frac{800}{4600} \simeq 0,17 \ll 0,90$$

Ἡ δυσκαμψία ἐξ ἄλλου τοῦ τροῦλλου προσδιορίζετο ἀπὸ τοὺς 40 στύλους, μὲ τοὺς ὁποίους ἐστηρίζετο ἐπὶ τῆς ὑπολοίπου στέγης, ἐνῶ ἡ δυσκαμψία τοῦ ἀμέσως ἀποκάτω ὄροφου καθορίζεται ἀπὸ τοὺς παχεῖς ἐπιμήκεις τοίχους καὶ ἀπὸ μεγάλης διατομῆς ὑποστυλώματα (πεσσούς). Ἔτσι καὶ ἡ σχέση (5) πληροῦται μὲ τὸ παραπάνω καὶ μὲ ἀπόλυτη βεβαιότητα, καίτοι δὲν διατίθενται ἀξιόπιστα στοιχεία γιὰ ἀκριβῆ ὑπολογισμὸ.

Προφανὲς συμπέρασμα συνάγεται ὅτι ὁ τροῦλλος ἀποτελοῦσε ἓνα ἀνεξάρτητο στοιχεῖο τοῦ ὅλου οἰκοδομήματος τοῦ ναοῦ, ταλαντούμενον σὲ ὥρα σειсмоῦ μὲ δικόν του, πολὺ ταχύτερον ἢ τὸ ὑπόλοιπον κτήριο, ρυθμὸ, καθὼς βρισκόταν σὰν ἐλεύθερος πρόβολος ὀρθούμενος πρὸς τὰ ἄνω, στὸ ὑψηλότερο μάλιστα σημεῖο τοῦ ναοῦ καὶ συνεδέετο μὲ αὐτὸν μὲ κατακορύφους στύλους, ἐνῶ σὲ ὅλο τὸ ὑπόλοιπο κτήριο, τοῖχοι, δάπεδα καὶ ὅλα τὰ στοιχεῖα τῆς στέγης ἦσαν πλήρως μεταξὺ τους κατὰ ἐπιμήκεις γραμμές —στὴν οὐσία κατὰ ἐπιφάνειες— συνδεδεμένα καὶ ἐταλαντοῦντο μὲ κοινὸ ρυθμὸ (κοινὴ περίοδο), ὡς ἄκαμπτον σύνολον.

Βάσει ὧν τῶν ἀνωτέρω καὶ προσβλέποντες στὴ σχέση (6), μπορούμε μὲ

βεβαιότητα να είποῦμε ὅτι γιὰ τὸν θεωρούμενο τροῦλλο ἡ στατικῶς ἰσοδύναμη ἐκ σεισμοῦ ὀριζοντία δράση εἶναι τῆς τάξεως τοῦλάχιστων

$$W_1 = 4\epsilon \cdot P_1 \quad (7)$$

Πρέπει περαιτέρω νὰ ληφθῆ ὑπ' ὄψη ὅτι, σύμφωνα μὲ ὅσα εἶπαμε ἤδη στὴν παράγραφο 2, ὁ σεισμός τῆς 14.12.557 ἦταν ὁ ἰσχυρότερος καὶ καταστρεπτικώτερος, ποῦ εἶχε πλήξει ποτὲ τὴ Βασιλίδα ἀπὸ τῆς κτίσεώς της (τὸ 330 μ.Χ. ὑπὸ τοῦ Μ. Κωνσταντίνου). Ἀπὸ τὶς ἀφηγήσεις τῶν χρονογράφων γιὰ τὶς προξενηθεῖσες βλάβες συνάγεται ὅτι ἡ ἔντασή του ἦταν περίπου IX-X βαθμοὶ τῆς σήμερα χρησιμοποιουμένης δωδεκαβαθμίου κλιμακῆς Μερκάλλι (γιὰ τὸ μέγεθος τοῦ σεισμοῦ καὶ τὸ πιθανὸν ἐπίκεντρον οὐδεμία ἐκτίμηση εἶναι ἐφικτὴ ἐκ τῶν ὑστέρων σήμερα, οὔτε ὅμως καὶ εἶναι ἀπαραίτητα στὸ πρόβλημά μας). Μὲ τὰ ἀνωτέρω στοιχεῖα συνάγομεν ὅτι ἡ καταλληλοτέρα τιμὴ τοῦ σεισμικοῦ συντελεστοῦ βάσει τοῦ Πίνακος Α', γιὰ ἕνα ἀντισεισμικὸ ἔλεγχο τοῦ ναοῦ, εἶναι $\epsilon = 0,08$. Τότε ὅμως ἡ ὑπολογιστικὴ τιμὴ τῆς ἐπὶ τοῦ τροῦλλου ὀριζοντίας σεισμικῆς δυνάμεως κατὰ τὴ σχέση (7) εὐρίσκεται

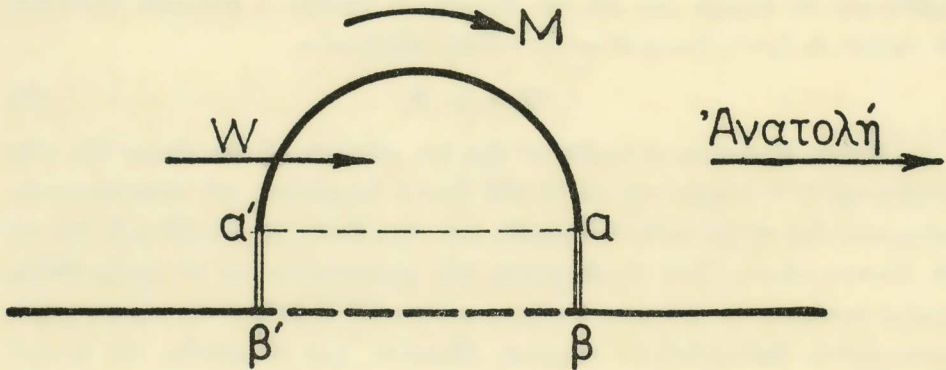
$$W_1 = 4\epsilon P_1 = 4 \times 0,08P_1 = 0,32P_1 \quad (8)$$

Ἡ τιμὴ ὅμως αὐτὴ διαπιστώνουμε ὅτι εἶναι οὐσιωδῶς μεγαλύτερα ἀπὸ τὴν ἀντίστοιχη ἀντοχὴ (φέρουσα ἰκανότητα) τοῦ στοιχείου, ὅπως μᾶς τὴν ἔδωσε ἡ σχέση (2) καὶ ὅπως εἶχαν κάθε λογικὴ ὑποχρέωση νὰ ἐξασφαλίσουν οἱ μηχανοποιοὶ τοῦ ναοῦ, ἀκόμη καὶ ἂν διέθεταν τὶς γνώσεις ἐνὸς ἐπιστήμονος πολιτικοῦ μηχανικοῦ τῶν μέσων τοῦ 20οῦ αἰῶνος καὶ ἀκολουθοῦσαν πιστὰ τοὺς κατὰ τὴν αὐτὴν χρονικὴν στιγμὴν ἀντισεισμικοὺς κανονισμούς. Γι' αὐτὸ καὶ ὁ τροῦλλος ἀσπρόχρηστος, δηλ. ἐρρηγματώθηκε σοβαρά.

Κατὰ τοὺς πρὸ τοῦ Δεκεμβρίου 557 ἀσθενεστεροὺς σεισμούς, ὁ κατὰ τὸ πνεῦμα τῶν Κανονισμῶν μας εὐδέποτε ὑπερέβη τὸ 5% ἢ τὸ πολὺ 6% (δηλ. $\epsilon \leq 0,05$ ἢ ἔστω $\epsilon \leq 0,06$). Τότε κατὰ τὴν (7)

$$W_1 = 4\epsilon \cdot P_1 \leq 4 \times 0,06P_1 = 0,24P_1$$

καὶ ἡ κατασκευὴ ἀντεῖχε διότι ἡ ὡς ἄνω δράση δὲν ξεπερνοῦσε τὴν κατὰ τὴν (2) συμβατικὴ ἀντοχὴ, ἀξιοποιουμένου τοῦ συντελεστοῦ ἀσφαλείας τῶν συμβατικῶν ὑπολογισμῶν ποῦ ἐκάλυπτε ἀβεβαιότητες καὶ σφάλματα στὴν ἐκτίμηση δράσεων. Τώρα τέλος εἴμεθα σὲ θέση νὰ διαγράψουμε καὶ τὴν πορεία τῆς ἀστοχίας, συνδυάζοντας τὶς σημερινὲς ἐπιστημονικὲς γνώσεις μας μὲ τὶς ἀφηγήσεις τῶν τότε χρονογράφων. Ἡ ἰσχυρὰ κατὰ τὴν σχέση (8) σεισμικὴ δράση ἐπὶ τοῦ τροῦλλου φαίνεται ὅτι εἶχε τὴν κατεύθυνση Δ-Α. (Δύση-Ἀνατολή). Ὅπως φαίνεται στὸ Σχ. 6 ἡ μεγάλη τέμνουσα δυνάμη στοὺς στυλίσκους — σὲ καθένα



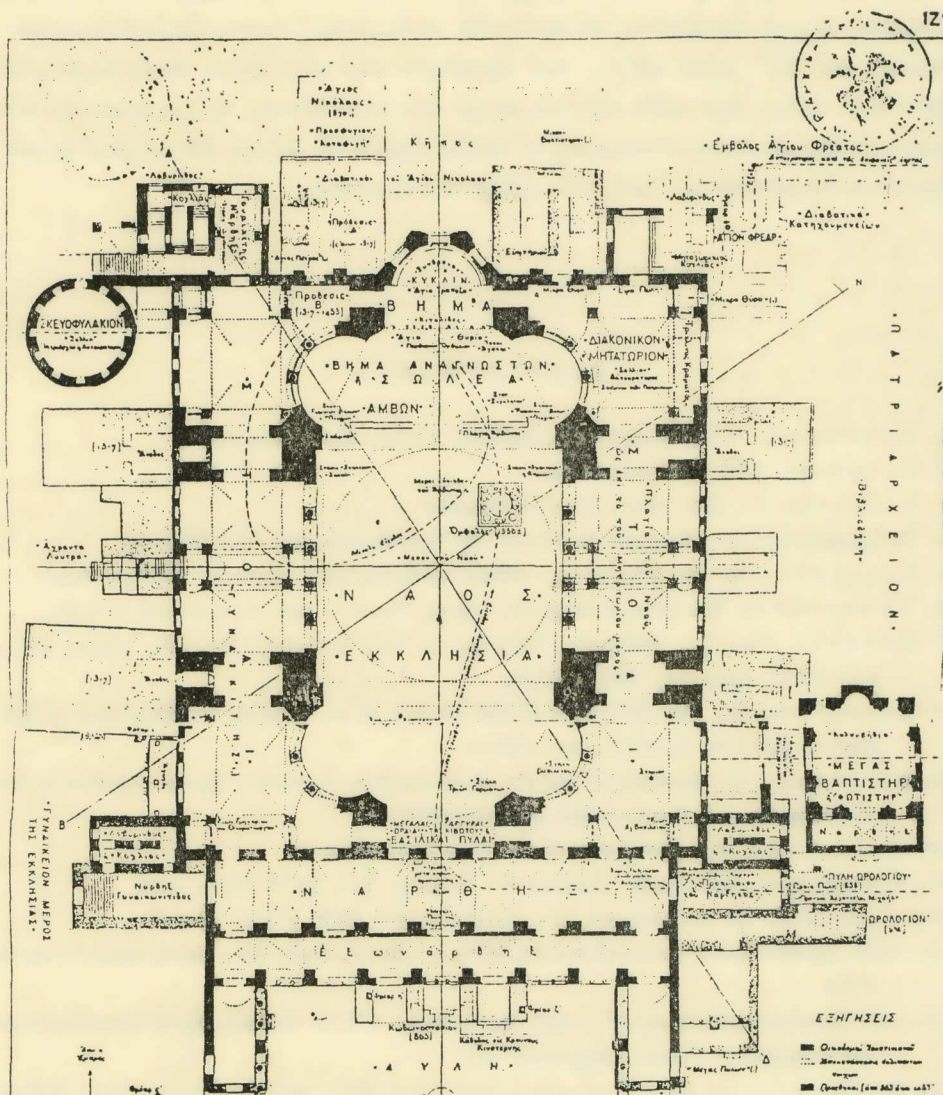
Σχ. 6. (αβ, α'β' στυλίσκοι)

$$H = \frac{Wl}{40} \quad (9)$$

συνοδεύθηκε και από σημαντική καμπτική ροπή, που έπεβάρυνε σέ θλίψη τους πρὸς ἀνατολὰς στυλίσκους. Σὲ πρώτη φάση δὲν ἐξηντλήθη ἡ θλιπτική ἀντοχή τους ἀλλὰ κατεπονήθη ὑπερέτρως (μὲ ἡυξημένον κατακόρυφον φορτίον) ἢ ἐώα, δηλ. ἡ ἀνατολικὴ ἀψίδα. Αὕτῃ ἐρρηγματώθηκε, ὑπεχώρησε ἔστω ἑλαφρὰ καὶ παρέσυρε μαζί της τοὺς ἐπ' αὐτῆς —ἢ γειτονικοὺς τοὺς— στυλίσκους τοῦ τρούλλου. Εἶναι πάρα πολὺ πιθανὸν ὅτι παραλλήλως οἱ στυλίσκοι εἶχαν ἤδη ἄρκετὰ ἀποδυναμωθῆ ἀπὸ τὴν ἰσχυρὰ ἐκ σεισμοῦ τέμνουσα δύναμη.

6. Συμπεράσματα

Ὅπως ἐπεσημάναμεν ἤδη, ὁ Ἄνθემιος καὶ ὁ Ἰσίδωρος κατὰ τὸν σχεδιασμὸν τοῦ κεντρικοῦ τρούλλου διαμέτρου 32 ὀλοκλήρων μέτρων στὸ νὰ τῆς τοῦ Θεοῦ Ἁγίας Σοφίας, (διαστάσεων περίπου 71 × 76 μέτρων), ἠθέλησαν νὰ συνδυάσουν βαθθὺ θρησκευτικὸ συναίσθημα μὲ αἰσθητικὴ τελειότητα. Παραλλήλως ὅμως δὲν ἀμέλησαν οὔτε ἐθυσίασαν τίποτε ἀπὸ τὴν ἐπιβαλλομένην ἀνθεκτικότητα. Προσέδωσαν στὸν τρούλλο ἐντοχή σὲ κατακόρυφα φορτία καὶ σὲ ὀριζοντία σεισμικὴ δράση, ὅσες ἀκριβῶς θὰ ἐξησφάλιζαν μὲ λεπτομερεῖς στατικούς ὑπολογισμοὺς καὶ καλοὶ ἐπιστήμονες πολιτικοὶ μηχανικοὶ τῶν μέσων τοῦ εἰκοστοῦ αἰῶνος. Ἐὰν δὲν μπόρεσαν νὰ διαισθανθοῦν κρυφὰ καὶ ἀπροσδόκητα προβλήματα συμπεριφορᾶς τοῦ τρούλλου, στὴ θέση πού βρισκόταν, ἔναντι σεισμοῦ, δὲν εἶναι κατακριτέοι. Κανεὶς ἀπὸ τοὺς ἐπιγενομένους μηχανοποιοὺς καὶ ἐπιστήμονες μηχανικοὺς ἐπὶ 14 ὀλοκλήρους αἰῶνες δὲν θὰ τὰ ὑποψιασθῆ. Μόνον τὰ μοντέρνα ὄργανα παρακολοθησεως τῆς συμπεριφορᾶς τῶν κατασκευῶν καὶ ἐκτελέσεως



Σχ. 7. Κάτοψη ισόγειου 'Αγ. Σοφίας

των υπολογισμών, κατά τις πρόσφατες δεκαετίες, θα αποκαλύψουν πτυχές του αντισεισμικού προβλήματος, που μέχρι πρό ολίγου ούτε έφантаζόμεθα καν. Ποία έπομένως μομφή επιτρέπεται να προσαφθῆ στους μεγαλόπνοους εκείνους «μηχανοποιούς» του ΣΤ' μόλις αιώνας, που άβοήθητοι από οιονδήποτε υπολογισμών και άβοήθητοι άκόμη από κάθε σχετική πείρα του παρελθόντος, προχώρησαν πρωτόποροι σε νέες σύνθετες κατασκευές, οι όποιες έμελλε να μείνουν αντικείμενα πανανθρώπινου θαυμασμού σε όλους τους μελλοντικούς αιώνες;

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Προκόπιος, «Περὶ κτισμάτων», έκδόσεις Βόννης, τόμος είκοστός.
2. Θεοφάνης (†817), Χρονογραφία.
3. Κεδρηνός Γ. (ΙΑ' αιών), Σύνοψις Ιστοριών.
4. Τὸ Χρονικὸ τοῦ Γ. Κωδινού για τὸ κτίσιμο τῆς Ἁγιᾶ-Σοφιάς, έκδ. «ΑΚΡΙΤΑΣ».
5. Σκαρλᾶτος Δ. Βυζάντιος, «Κωνσταντινούπολις», τόμοι 3, Ἀθήνησι 1869.
6. Ἀντωνιάδης Εὐγέν., «Ἐκφρασις Ἁγίας Σοφίας», τόμ. 3, Κων/πολις, 1912.
7. Μπούρας Χαράλ., Μαθήματα Ἱστορίας τῆς Ἀρχιτεκτονικῆς τόμος Β', Ἀθήναι 1977, έκδ. ΕΜΠ, Σχήματα, Ἀθήναι 1975.
8. Mainstone R., The Structure of the Church of St. Sophia, Istanbul, (read at the Science museum, London, Dec. 1965).
9. Mainstone R., Justinian's church of St. Sophia, Istanbul: Recent studies of its construction and first partial reconstruction.
10. Mainstone R., Developments in Structural Forms.
11. Ἀντισεισμικὸς Κανονισμὸς Οἰκοδομικῶν Ἔργων», Β.Δ. 19/26 Φεβρ. 1959
12. Ἀτροποποίηση και Συμπλήρωση Β.Δ. 19/26-2-1959» ΦΕΚ 239 Α' 16-4-84
13. CEB (Comité Euro-International du Béton), «Model Coole for seismic design», April 1985
14. ACI Standard 318-71 και 77 (1971 και ἀναθεώρ. 1977): Building Code Requirements for Reinforced Concte (Appendix A).
15. Σπυρόπουλος Π. — Καραβεζύρογλου Μ., Ἀντισεισμικά Κτίρια», Ἀθήναι 1979
16. Spyropoulos P., «Report on the Greek Earthquakes of Febr. 24-25, 1981», ACI Concrete Intern. Febr. 1982.

S U M M A R Y

**Causes and Responsibility for the failure of the first dome of «Agia Sofia»
Church in Constantinople**

In 537 A.C. the people of Constantinople gloriously celebrated the consecration of their new church «Agia Sofia» (meaning God's Wisdom), in the presence of emperor Justinian. At that time and for many centuries later Agia Sofia was the largest church in the world, covering a total of 5400 m² (71×76 m). The central dome with a diameter of 32 m (area 800 m²) and a height of 11 m. was resting on the church roof underneath through 40 perimetrical columns forming windows in the spaces between to facilitate the natural lighting of the interior.

In the twenty years that followed, Constantinople was troubled by intense seismic activity. On December 14th, 557 A.C., the most severe earthquake took place, causing extensive damage to many structures in the city including the dome of the church. Shortly after the earthquake the dome was temporarily supported while repairs were carried out; but during this work the dome eventually collapsed.

What was the cause of failure and how much responsibility is accountable to Anthemios and Isidoros, the architects of the church? What ought they have done? Is this a case of engineering negligence?

Chroniclers of that era and of later dates have expressed various opinions but with out any solid foundations. Some modern scientists (Ref. 8, 9, 10) have also accused Anthemios of inadequate design with reference to underestimation of the expected seismic force on the dome.

But, what would be the structural strength of the same dome, if designed by a qualified engineer from the middle of our century? The analysis of the Paper shows that the design would be no better in accordance with the available structural standards (e.g. the first integrated «Greek Code for seismic resistant structures» brought to force in 1959). From there on the architect would be allowed to fulfil any artistic choice or requirement. And that would be the case fourteen whole centuries after Anthemios!

It was only during the last few decades that scientific development has

revealed some specific factors affecting seriously the magnitude of seismic force on some kinds of structures such as this particular dome:

- (a) Structural elements at the higher parts of a building suffer double the seismic force compared to that taken into account by older design methods .
- (b) This seismic force increases up to eight times more if the structural element has relatively low stiffness or small area.

The dome under discussion presented both the above «irregularities». The ratio of its area over the area of the main structure underneath was 0,17, i.e. much less than 0,90 defined as irregularity threshold by European Codes (CEB 1985). At the same time the respective stiffness ratio was much lower than 2)3 (CEB limit) since the vertical stiffness of the dome was derived mainly from the forty supporting columns. In other words, during the earthquake the dome was responding as a vertical cantilever supported on the main structure through the low stiffness columns alone and oscillating at a much higher pace than the rest of the building.

Such weak points in structure, with regard to earthquake, were completely unknown to scientists until very recently, no provision having been made by any of the preexisting engineering Codes. If those were the circumstances only a few decades ago then, no blame of negligence could be justified against those empirical pioneer engineers of the 6th century, which despite the lack of basic scientific or computational tools, guided by imagination and intuition alone, have created fabulous masterpieces, everlasting treasures of mankind. The structural deficiencies of the dome would not be avoided, even if it was designed and constructed by a qualified engineer from the middle of our century.