

ΦΥΣΙΚΗ.— **Ἡ ἀτμοσφαιρική ρύπανση τῶν ἐσωτερικῶν χώρων: Μιὰ ἀπειλή γιὰ τὴν πολιτιστική μας κληρονομιά**, ὑπὸ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ κ. Π. Σ. Θεοχάρη ἐν συνεργασίᾳ μετὰ τῶν κ.κ. Χρ. Ζερεφοῦ, Γ. Δράκου, Ι. Ζιώμα καὶ G. Cass, διὰ τοῦ ἀκαδημαϊκοῦ κ. Περ. Θεοχάρη.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στὴ σύγχρονη ἐποχή, ἡ εὐρωπαϊκὴ πολιτιστικὴ κληρονομιά, ποὺ ἐπέζησε ἀπὸ πολέμους, κλοπές, πυρκαγιές, ἀπειλεῖται ἀπὸ ἓνα καινούριο κίνδυνο, τὴ ρύπανση τοῦ περιβάλλοντος (Euro abstracts, 1995). Ἡ δράση τῶν ρύπων ἀλλοιώνει, καὶ τὶς περισσότερες φορὲς μὴ ἀντιστρέψιμα, μνημεῖα καὶ κτίρια. Τὸ χειρότερο δὲ εἶναι ὅτι, ὅπως δείχνει ἡ συστηματικὴ ἔρευνα τὰ τελευταῖα χρόνια, ἀπειλεῖ καὶ τοὺς πολιτιστικούς θησαυροὺς ποὺ βρίσκονται σὲ ἐσωτερικούς χώρους, ὅπως μουσεῖα, πινακοθῆκες, ἐκκλησίες, βιβλιοθῆκες, ἀρχειοθῆκες (Thomson, 1978· Baer and Banks, 1985b· Cass et al., 1989· Bribblecombe, 1990· E. C. Research Workshop, 1995· Havermans, 1995· Larsen 1995· Leissner et al. 1995). Ἡ καταστροφικὴ δράση τοῦ περιβάλλοντος δὲν ἀλλοιώνει μόνον αἰσθητικὰ τὰ μοναδικὰ αὐτὰ ἀντικείμενα, ἀλλὰ συνοδεύεται καὶ μὲ τὴν ἀπώλεια πολυτίμων πληροφοριῶν, ποὺ, ἀκόμη καὶ ἐὰν καταστῆ δυνατόν νὰ ἐπανορθωθεῖ αἰσθητικὰ τὸ ἀντικείμενο, αὐτὲς χάνονται.

Ρύποι ποὺ συνήθως προέρχονται ἀπὸ τὸ ἐξωτερικὸ περιβάλλον καὶ διεισδύουν στὰ μουσεῖα κτλ. εἶναι τὸ ὄζον, τὰ ὀξειδία τοῦ ἀζώτου, τὸ νιτρικὸ ὄξύ, τὸ διοξειδίου τοῦ θείου, τὰ περοξυακετυλονιτρίλια (PAN) (Cass et al., 1989· Hisham καὶ Grosjean, 1991). Ἄλλοι ὅμως ρύποι, ὅπως φορμαλδεΐδη, μυρμηγκικὸ ὄξύ, ὀξικὸ ὄξύ καὶ χλωριωμένον ὑδρογονάνθρακες, δημιουργοῦνται ἀπὸ ἐσωτερικὲς πηγὲς ποὺ ὑπάρχουν μέσα στὰ κτίρια (Baer and Banks, 1985· Bribblecombe, 1990· Hisham and Grosjean, 1991). Στὰ μουσεῖα, ἴσως οἱ πιὸ συχνὰ ἀπαντῶμενες ἐσωτερικὲς πηγὲς ρύπων εἶναι οἱ ἐπισκέπτες καὶ διάφορα καταναλωτικὰ ὑλικά.

Τὰ ἀερομεταφερόμενα σωματίδια, εἰδικὰ τὰ πολὺ μικρὰ, ὅπως αὐτὰ τῆς αἰθάλης, εἶναι πανταχοῦ παρόντα στοὺς ἐσωτερικούς χώρους καὶ συνιστοῦν μιὰ μεγάλη ἀπειλή γιὰ τὰ ἔργα τέχνης, ἀλλὰ ἡ μελέτη τους εἶναι ἐκτὸς τοῦ σκοποῦ αὐτῆς τῆς παρουσίας (Nazaroff et al., 1993· Christoforou et al., 1994). Θὰ μᾶς ἀπασχολήσει ἐδῶ ἡ ἀπειλή ἀπὸ τοὺς φωτοχημικὰ συνδεόμενους ἀέριους ρύπους σὲ χώρους ποὺ στεγάζουν

* P. S. THEOCARIS, CHR. ZEREFOS, G. DRAKOU, J. ZIOMAS, G. CASS. **Indoor air pollution: A threat to our cultural heritage.**

πολιτιστικές συλλογές. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει μερικά, διεθνώς αποδεκτά, επιτρεπόμενα όρια για τις μέγιστες εσωτερικές συγκεντρώσεις όρισμένων δραστηκών αερίων ρύπων σε κτίρια που στεγάζουν πολιτιστικούς θησαυρούς και μερικές επίσης γνωστές επιδράσεις των ρύπων αυτών σε υλικά απαντώμενα σε μουσεΐα, βιβλιοθήκες και αρχειοθήκες (Thomson, 1978· Baer and Banks, 1985b· Brimblecombe, 1990).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.

Κάποια διεθνή όρια εσωτερικών συγκεντρώσεων αερίων ρύπων
μέσα σε μουσεΐα, βιβλιοθήκες, αρχειοθήκες
(από τους Baer and Banks, 1985 a, b· Brimblecombe, 1990)

Άέριος ρύπος	Συστηνόμενο όριο	Όργανισμός
NO ₂	0.0	NMAB, BML
NO ₂	< 2.5 ppb	NBS
O ₃	1 ppb	NMAB
HNO ₃	0.0	NMAB

Σχόλια: NMAB = National Materials Advisory Board;
NBS = National Bureau of Standards; BML = British Museum Libraries.

Άέριος ρύπος	Δράση στα υλικά
(από τους Thomson, 1978· Baer and Banks, 1985 a, b· Brimblecombe, 1990)	
NO ₂	Ξεθωριάζει βαφές - χρώματα. Μειώνει την άντοχη των ύφασμάτων. Επιδρά στα φωτογραφικά φιλμς.
O ₃	Καταστρέφει το καουτσούκ. Ξεθωριάζει βαφές - χρώματα. Επιδρά στα φωτογραφικά υλικά. Καταστρέφει τα βιβλία.
HCHO	Επηρεάζει φωτογραφίες, μεταλλικά αντικείμενα.
HNO ₃	Επηρεάζει μεταλλικά και μαρμάρια αντικείμενα, χρώματα, ύφασματα, φωτογραφικά υλικά.

Η παρούσα έργασια είναι μια μελέτη των επιπέδων αέριας ρύπανσης σε δύο αντιπροσωπευτικά κτίρια τής Θεσσαλονίκης, που στεγάζουν ανεκτίμητους πολιτιστικούς θησαυρούς. Το ένα κτίριο είναι μια παλαιά, παραδοσιακή εκκλησία με φυσικό αερισμό (εκκλησία τής Αγίας Σοφίας), ενώ το άλλο είναι ένα σύγχρονο μουσεΐο με

κοινό μηχανικό σύστημα αερισμού-κλιματισμού (Αΐθουσα τής Βεργίνας, 'Αρχαιολογικό Μουσείο Θεσσαλονίκης). Οί τιμές τών έσωτερικών συγκεντρώσεων όρισμένων αντιπροσωπευτικών αέριων ρύπων, όπως O_3 , NO , NO_2 , $HCHO$, PAN , HNO_3 , στα κτίρια αυτά ύπολογίστηκαν με έφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου τών Nazaroff-Cass (1986/89), με τή βοήθεια στοιχείων που προέκυψαν από μετρήσεις. Κάτω από τήν ύπόθεση ότι ή καταστροφική δράση τών αέριων στους πολιτιστικούς θησαυρούς είναι ανάλογη τής ροής τών ρύπων προς τις επιφάνειες, έγινε ένας ύπολογισμός αυτών τών ροών, από τα αποτελέσματα του μοντέλου, για να εκτιμηθεΐ ό ένδεχόμενος κίνδυνος καταστροφής τών στεγαζομένων έργων τέχνης.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΩΝ NAZAROFF-CASS (1986/89)
ΣΤΗΝ ΕΚΚΛΗΣΙΑ ΤΗΣ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΪΘΟΥΣΑ ΤΗΣ ΒΕΡΓΙΝΑΣ ΣΤΟ
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Τό διεθνές μαθηματικό μοντέλο τών Nazaroff-Cass, είναι τό πλέον πολύπλοκο από τα ύπάρχοντα μοντέλα, τα όποια στόχεύουν στην πρόβλεψη τών έσωτερικών συγκεντρώσεων φωτοχημικά συνδεομένων αέριων ρύπων. Τό μοντέλο, και ειδικά ό χημικός του μηχανισμός, δοκιμάστηκε επιτυχώς σε πειραματικά δεδομένα πολλών ήμερών σε δύο κτίρια, τό ένα τής Θεσσαλονίκης και τό άλλο τών 'Αθηνών, από τό 'Εργαστήριο Φυσικής τής 'Ατμόσφαιρας, του 'Αριστοτελείου Πανεπιστημίου τής Θεσσαλονίκης (Drakou et al., 1995a· Drakou 1996). Κατόπιν τούτου, τό μοντέλο εφαρμόστηκε σε δύο αντιπροσωπευτικά κτίρια τής Θεσσαλονίκης. Τό ένα είναι μιá παλιά Βυζαντινή εκκλησία, φυσικάς αεριζομένη, με μεγάλη παράθυρα και τό δεύτερο μιá αΐθουσα στο αρχαιολογικό μουσείο τής Θεσσαλονίκης, ή αΐθουσα τής Βεργίνας με δικό της σύστημα κλιματισμού, χωρίς παράθυρα, με τεχνητό φωτισμό, απομονωμένη από τό ύπόλοιπο κτίριο (Drakou et al., 1995b).

Τά βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Για τήν εκκλησία, μέσες ώριαίες τιμές τών έξωτερικών συγκεντρώσεων τών O_3 , NO , NO_2 , CO και τών όργανικών αέριων ένώσεων, έδόθηκαν από τους άρμοδίους του έπιτοπίως λειτουργούντος σταθμού του Δήμου τής Θεσσαλονίκης. Τά αντίστοιχα δεδομένα για τό μουσείο έδόθηκαν από τό 'Εργαστήριο Φυσικής τής 'Ατμόσφαιρας του Α.Π.Θ., του όποιου ό σταθμός έλέγχου τής άτμοσφαιρικής ρύπανσης απέχει 1.5 km από τό μουσείο. Οί ύπολογισμοί τών έσωτερικών συγκεντρώσεων έγιναν και με τις δύο έκδοχές του μοντέλου: Με Χημεία περίπτωση (M.X.) και Χωρίς Χημεία περίπτωση (X.X.) (Shair and Heitner, 1974· Hales et al., 1974· Nazaroff and Cass et al., 1989).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.

Σύνοψη τών δεδομένων εισόδου για τις προσομοιώσεις

Κτίριο	Έπιφάνεια m ²	Όγκος m ³	Ρυθμός έναλλαγής αέρα (h ⁻¹)	Φωτισμός
Άγια Σοφία	7575	9539	0,3 - 2,0	Φυσικός
Βεργίνα	1065	1065	0,0 - 2,3	Τεχνητός
<i>Με Χημεία Περίπτωση (M.X.)</i>			<i>Άγια Σοφία</i>	<i>Βεργίνα</i>
Ταχύτητες έναπόθεσης (cm/sec)				
O ₃			0.051	0.036
NO ₂			0.014	0.006
NO			0.003	0.0
HCHO, RCHO ^a			0.005	0.005
PAN			0.035	0.035
HNO ₂ , HNO ₃ , HNO ₄ , HO ₂ , H ₂ O ₂				
NO ₃ , N ₂ O ₅ , RCO ₃ , RNO ₄ , RONO, RO ₂			0.07	0.07
OLEB ^b , ALK ^c , ARO ^d , CO, C ₆ H ₆			0.0	0.0

a. Όλες οι ανώτερες Άλδεΐδες.

b. Το σύνολο τών όλεφινών.

c. Το σύνολο τών άλκανίων.

d. Όλοι οι άρωματικοί υδρογονάνθρακες.

Χωρίς Χημεία Περίπτωση (X.X.)

Περίπτωση με ίδια δεδομένα εισόδου με την M.X., αλλά ό χημικός μηχανισμός του μοντέλου τίθεται εκτός λειτουργίας.

Στό σχήμα 1 (α, β, γ) παρουσιάζονται οι μετρημένες εκτός τής έκκλησίας συγκεντρώσεις μαζί με τις υπολογισμένες από το μοντέλο μέσα συγκεντρώσεις για ένα διήμερο (6-7 Μαρτίου 1995), για τους ρύπους O₃, NO, NO₂.

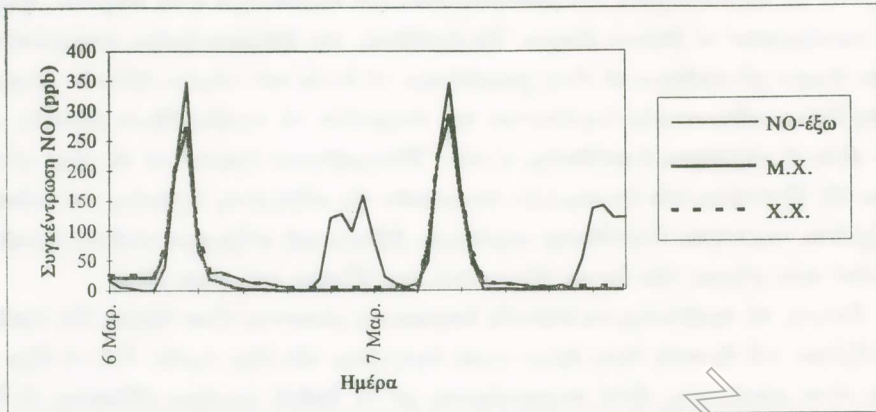
Τά συμπεράσματα πού συνάγονται από τά αποτελέσματα του μοντέλου είναι τά εξής: Τά επίπεδα τών ρύπων μέσα στην έκκλησία επηρεάζονται πρωταρχικά από τή διεύθυνση και τήν ταχύτητα του άνεμου, παράγοντες πού καθορίζουν τις εισερχόμενες ποσότητες νέου αέρα στο κτίριο. Έχοντας ή έκκλησία τήν κυρία είσοδό της στο βορρά, πόρτα πού ανοιγοκλείνει συνεχώς τήν ήμέρα, έχει αύξημένους ρυθμούς έναλλαγής αέρα με τόν έξωτερικό όταν πνέει βόρειος άνεμος. Τότε όμως αύξημένη αναμένεται νά είναι και ή μεταφορά ρύπων από έξω μέσα στο κτίριο, γεγονός πού επιβε-

βαιώνουν τὰ ἀποτελέσματα τοῦ μοντέλου ὅπως γιὰ παράδειγμα ἡ 6η Μαρτίου, ἡμέρα ποὺ κυριάρχησαν οἱ βόρειοι ἄνεμοι. Ἐν ἀντιθέσει, τὴν ἐπόμενη ἡμέρα, ἐπεκράτησαν νότιοι ἄνεμοι μὲ συνέπεια νὰ εἶναι χαμηλότερα τὰ ἐντὸς τοῦ κτιρίου ἐπίπεδα ρύπων. Ἐνας ἄλλος καθοριστικός παράγοντας ποὺ ἐπηρεάζει τὰ προβλεφθέντα ἐπίπεδα ρύπων εἶναι οἱ ταχύτητες ἐναπόθεσης αὐτῶν. Ἐθεωρήθησαν ὑψηλές γιὰ τὸ χῶρο αὐτό, λόγω τῆς ἀδρότητας τῶν ἐσωτερικῶν ἐπιφανειῶν τῆς αὐξημένης ὑγρασίας καὶ σκόνης. Αὐξημένες ταχύτητες ἐναπόθεσης σημαίνουν βέβαια καὶ αὐξημένο κίνδυνο προσβολῆς ἀπὸ τοὺς ρύπους τῶν ἔργων τέχνης ποὺ στεγάζονται στὸ χῶρο αὐτό.

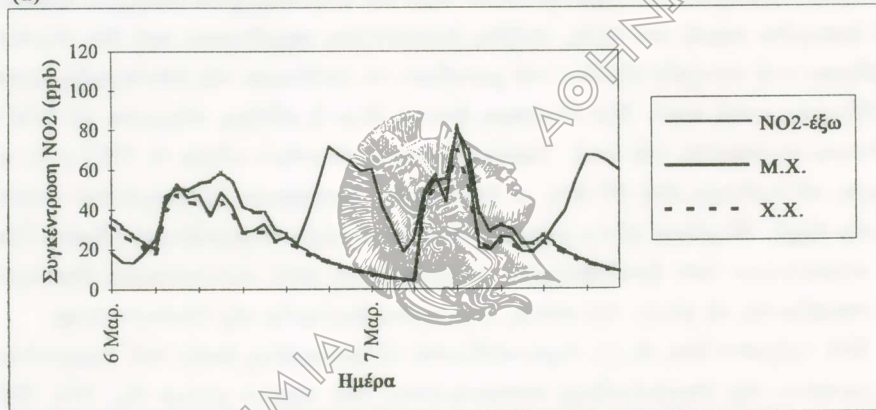
Γενικά, τὰ προβλεπόμενα ἐπίπεδα ἐσωτερικῆς ρύπανσης εἶναι ὑψηλά. Τὰ ὀξείδια τοῦ ἀζώτου γιὰ ἄρκετὲς ὥρες ἔχουν τιμὲς ἐφάμιλλες τῶν ἔξω τιμῶν. Γιὰ τὸ ὄζον οἱ τιμὲς εἶναι μικρότερες, ἀλλὰ συγκρινόμενες μὲ τὰ διεθνῆ κριτήρια (Πίνακας 1) δὲν εἶναι εὐκαταφρόνητες. Ἄν λάβουμε δὲ ὑπ' ὄψιν ὅτι στὴν ἐκκλησία ὑπάρχουν κατὰ κανόνα ἀναμμένα κεριά, καντήλες, πλῆθος ἐπισκεπτῶν, παράγοντες ποὺ δὲν συμπεριελήφθησαν στὰ στοιχεῖα εἰσόδου τοῦ μοντέλου, τὸ πρόβλημα τῆς ἐσωτερικῆς ρύπανσης ὀξύνεται κατὰ πολὺ. Μιὰ ἰδιαίτερη ἀπειλὴ εἶναι ἡ αἰθάλη, σύμφωνα μὲ τοὺς ὑπεύθυνους συντηρητὲς τοῦ ναοῦ. Χαρακτηριστικὰ, τὸ κτίριο κάηκε τὸ 1917 μ.Χ. καὶ σήμερα, σὲ λιγότερο ἀπὸ 80 ἔτη, οἱ ἐσωτερικὲς ζωγραφικὲς διακοσμήσεις γίνονται ἀπὸ τὴν ἀρχή. Ὁ χῶρος αὐτὸς φαίνεται νὰ εἶναι ἐντελῶς ἀπροστάτευτος ἐναντι ὅλων τῶν παραγόντων ποὺ ἀποδεδειγμένα καταστρέφουν τοὺς πολιτιστικὸς θησαυροὺς ποὺ στεγάζονται σὲ αὐτὴν τὴν παλιά, φημισμένη ἐκκλησία τῆς Θεσσαλονίκης.

Στὰ σχήματα 2 (α, β, γ), παρουσιάζονται οἱ μετρημένες ἐκτὸς τοῦ Ἀρχαιολογικοῦ μουσείου τῆς Θεσσαλονίκης συγκεντρώσεις τῶν ἀερίων ρύπων O_3 , NO , NO_2 , μαζὶ μὲ τὶς ὑπολογισμένες ἀπὸ τὸ μοντέλο συγκεντρώσεις μέσα στὴν αἴθουσα τῆς Βεργίνας, γιὰ τὸ διήμερο 6-7 Μαρτίου 1995.

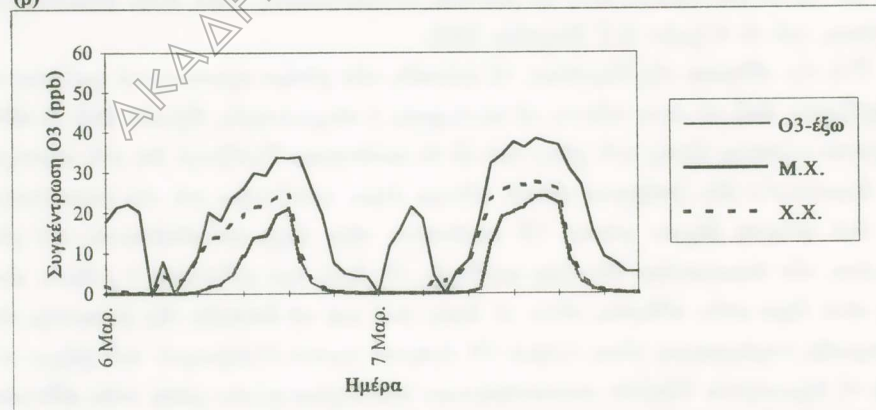
Γιὰ τὴν αἴθουσα τῆς Βεργίνας, τὰ ἐπίπεδα τῶν ρύπων πρωταρχικὰ φαίνεται νὰ καθορίζονται ἀπὸ τὸ πότε τίθεται σὲ λειτουργία ὁ κλιματισμὸς, δηλαδή ἀπὸ τὸ πότε εἰσάγεται φρέσκος ἀέρας στὸ χῶρο καὶ σὲ τί ποσότητες. Τονίζεται ὅτι στὸ σύστημα τῶν ἀεραγωγῶν δὲν ὑπάρχουν εἰδικὰ φίλτρα ἀέρα, κατάλληλα γιὰ τὴν καταστροφὴ τῶν ὑπὸ μελέτη ἀερίων ρύπων. Οἱ ποσότητες νέου ἀέρα ποὺ εἰσάγονται στὸ χῶρο, μέσω τῶν ἀεραγωγῶν, δὲν εἶναι σταθερές. Οἱ ὥρες ποὺ αὐξάνεται ὁ ρυθμὸς εἰσροῆς νέου ἀέρα στὴν αἴθουσα, εἶναι οἱ ὥρες ποὺ καὶ τὰ ἐπίπεδα τῆς ρύπανσης τῆς ἐξωτερικῆς ἀτμόσφαιρας εἶναι ὑψηλά. Οἱ ἀνάγκες λοιπὸν ἐξαερισμοῦ τοῦ χῶρου εὐνοοῦν τὴ δημιουργία ὑψηλῶν συγκεντρώσεων τῶν ἀερίων ρύπων μέσα στὴν αἴθουσα. Οἱ προβλεπόμενες ἀπὸ τὸ μοντέλο συγκεντρώσεις γιὰ τὸ NO ἐλάχιστα ὑπολείπονται τῶν ἐξωτερικῶν τιμῶν του, κατὰ τὶς ὥρες ποὺ λειτουργεῖ τὸ μηχανικὸ σύστημα ἐξαερισμοῦ. Ἀνάλογη εἶναι καὶ ἡ συμπεριφορὰ τοῦ NO_2 . Μάλιστα κάποιες ὥρες οἱ ἐν-



(α)

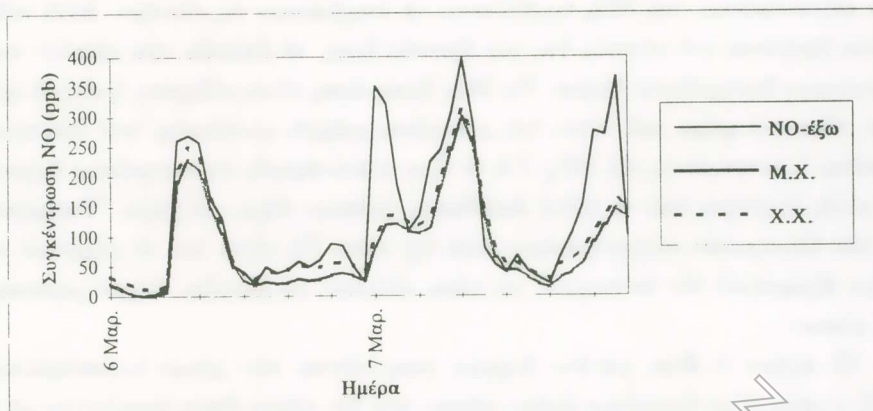


(β)

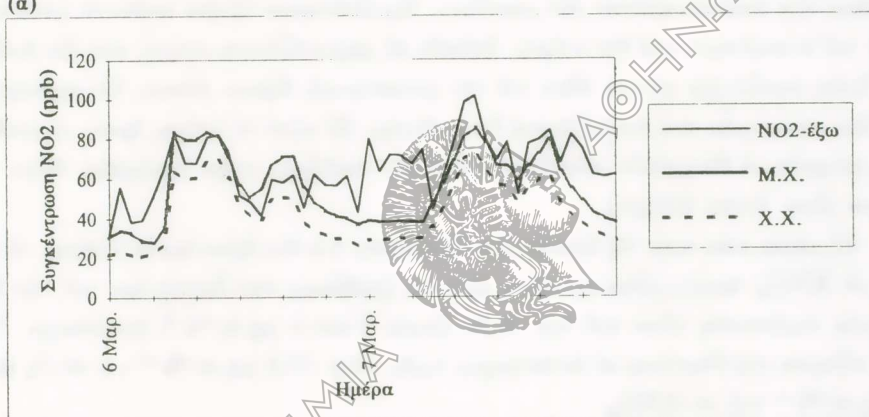


(γ)

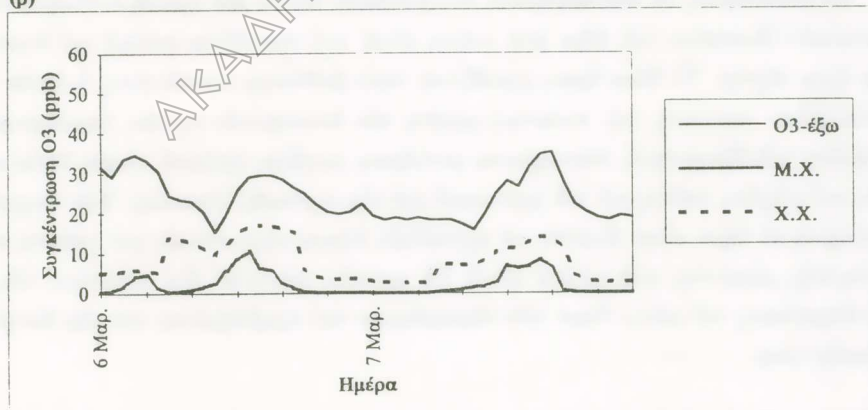
Σχήμα 1: ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ (6, 7 Μαρτίου 1995).



(α)



(β)



(γ)

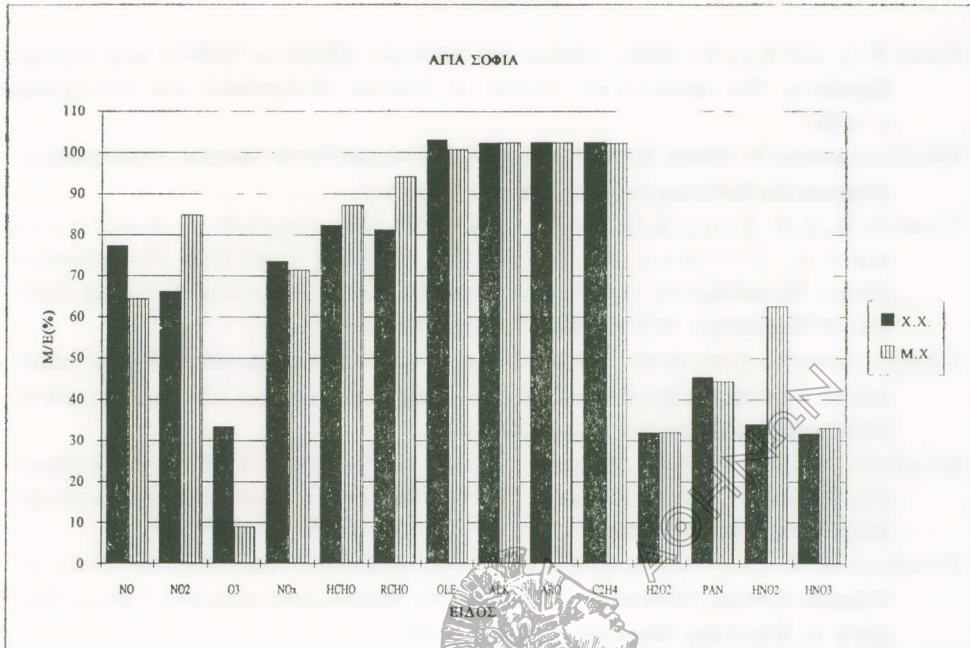
Σχῆμα 2: ΑΙΘΟΥΣΑ ΒΕΡΓΙΝΑΣ (6, 7 Μαρτίου 1995).

τός) συγκεντρώσεις του NO_2 προβλέπεται να υπερβαίνουν τις «έκτός». Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι, για αρκετές ώρες, τα επίπεδα των «έκτός» συγκεντρώσεων διατηρούνται ύψηλά. Τις ίδιες όμως ώρες, είναι αύξημένη ή είσοδη φρέσκου αέρα στο χώρο και λόγω του μειωμένου ρυθμού φωτόλυσης στο έσωτερικό εύνοείται ή συσσωρευση του NO_2 . Για το όσον οι έσωτερικές συγκεντρώσεις δείχνουν και αυτές εξάρτηση από το ρυθμό διείσδυσης φρέσκου αέρα στο χώρο. Υπολείπονται των έξωτερικών συγκεντρώσεων αλλά όχι πολύ. Τη νύχτα που το μηχανικό σύστημα εξαερισμού δεν λειτουργεί, τα φώτα σβήνουν, το μοντέλο δείχνει μηδενισμό των ρύπων.

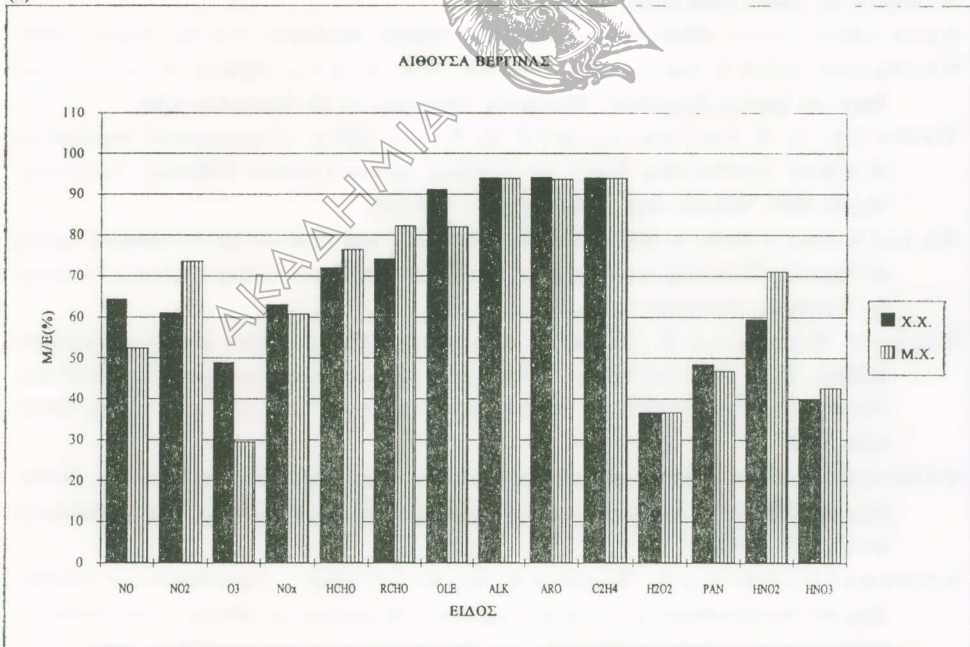
Το σχήμα 3 δίνει για ένα διήμερο τους λόγους των μέσων συγκεντρώσεων ($M/E = \text{μέσα}/\text{έξω}$) όρισμένων αερίων ρύπων, στα δύο κτίρια, όπως προκύπτουν με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Προβλέπονται ύψηλα ποσοστά κατά κανόνα και συγκρίσιμα στα δύο κτίρια. Δηλαδή το κλιματιζόμενο κτίριο, που δεν διαθέτει όμως κατάλληλα φίλτρα αέρα για την καταστροφή αερίων ρύπων, δεν προσφέρει μεγάλη προστασία στα στεγαζόμενα έργα τέχνης. Σε αυτό το κτίριο, όμως, οι συνθήκες μπορούν να ελεγχθούν ευκολότερα από τις συνθήκες στην εκκλησία, όπου τα πάντα είναι εκτός ελέγχου.

Οι μέσες ροές προς τις έσωτερικές επιφάνειες για δύο δραστικούς ρύπους, το O_3 και το HNO_3 , υπολογιζόμενες κάτω από τις υποθέσεις που δεχτήκαμε για την Με Χημεία περίπτωση, είναι για την Αγία Σοφία 8 και $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, αντίστοιχα. Για την αίθουσα της Βεργίνας οι αντίστοιχες τιμές είναι $13.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ για το O_3 and $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ για το HNO_3 .

Έν κατακλείδι, τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνουν μια πρώτη εκτίμηση των ρυπαντικών ιδιοτήτων του αέρα στα κτίρια αυτά, που στεγάζουν παλαιά και ανεκτίμητα έργα τέχνης. Το θέμα όμως χρειάζεται πολύ βαθύτερη προσέγγιση, ή οποία θα περιλαμβάνει ποιοτική και ποσοτική μελέτη των έσωτερικών πηγών, ολοκληρωμένη μελέτη του εξαερισμού, ταυτόχρονες μετρήσεις μεγάλου αριθμού ρύπων εντός και εκτός του κτιρίου, καθώς και του φωτισμού και της σχετικής υγρασίας. Έάν ανιχνευθεί πλήρως το θέμα είναι δυνατόν να προταθούν λύσεις ουσιαστικές για μείωση της έσωτερικής ρύπανσης στα κτίρια αυτά. Το μοντέλο αποτελεί ένα πολύτιμο οδηγό στην διερεύνηση του ρόλου όλων των παραμέτρων του προβλήματος και της αλληλεπίδρασής τους.



(α)



(β)

Σχήμα 3 (α, β): Σύγκριση τῶν μέσων λόγων τῶν ἀέριων ρύπων γιὰ ἓνα διήμερο.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Baer N. S. and Banks (1985), «Indoor Air Pollution: Effects on Cultural and Historic Materials». *The International Journal of Museum Management and Curatorship* 4 : 9-20.
- Bribblecombe P. (1990), Review article: «The Composition of Museum Atmospheres». *Atmospheric Environment* Vol. 24B, No. 1, pp. 1-8.
- Cass G. R., J. R. Druzik, D. Grosjean, W.W. Nazaroff, P. M. Whitmore and C. L. Wittman (1989), «Protection of Works of Art from Photochemical Smog». *Environmental Quality Laboratory Report 28*. Pasadena: California Institute of Technology. GCI Scientific Program Report.
- Christoforou C. S., L. G. Salmon and G. R. Cass (1994), «Deposition of Atmospheric Particles within the Buddhist Cave Temples at Yungang, China», *Atmospheric Environment* Vol. 28, No. 12, pp. 2081-2091.
- Drakou G., C. Zerefos, I. Ziomas (1995a), «A Preliminary Study on the Relationship between Indoor and Outdoor Air Pollution Levels», *Fresenius Environmental Bulletin* (4 : 689-694, 1995).
- Drakou G., C. Zerefos, I. Ziomas (1995b), «Numerical Simulations of Indoor Air Pollution Levels», *Workshop on Effects of the Environment on Indoor Cultural Property in Wurzburg, Germany 11-13 Dec. 1995*.
- Drakou G., (1996) PhD thesis, to be published.
- Euro abstracts, «Protection of Europe's Cultural Heritage», Vol. 33, October 1995.
- European Commission Research Workshop, «Effects of the Environment on Indoor Property», Wurzburg, Germany 11-13 December 1995.
- Hales Ch., A. M. Rollenson and F. H. Shair (1974), «Experimental Verification of Linear Combination Model for Relating Indoor-Outdoor Pollutant Concentrations», *Env. Science and Technology* 8 : 452-453.
- Havermans J. B. G. A. (1995), «Influences of SO₂ and NO_x on the Accelerated Ageing of Paper», *Workshop on Effects of the Environment on Indoor Cultural Property in Wurzburg, Germany 11-13 Dec. 1995*.
- Hisham Mohamed W. H. and D. Grosjean (1991), «Sulfur Dioxide, Hydrogen Sulfide, Total Reduced Sulfur, Chlorinated Hydrocarbons and photochemical oxidants in Southern California Museums». *Atm. Envir.* Vol. 25 A, No. 8, pp. 1497-1505, 1991.
- Larsen R. (1995), «Deterioration and Conservation of Vegetable Tanned Leather», *Workshop on Effects of the Environment on Indoor Property* στο Wurzburg, Germany 11-13 Dec. 1995.
- Leissner J., Martin G., Blades N., Redol P. (1995), «Assessment and Monitoring the Environment of Cultural Property», *Workshop on Effects of the Environment on Indoor Cultural Property* στο Wurzburg, Germany 11-13 Dec. 1995.
- Nazaroff W.W. and G. R. Cass (1981), «Mathematical Modeling of Chemically Reactive Pollutants in Indoor Air.: *Env. Science and Technology* 7 : 924-934.

Nazaroff W.W., A. J. Gadgil and C. J. Weschler (1993), «Critique of the Use of Deposition Velocity in Modeling Indoor Air Quality». Modeling of Indoor Air Quality and Exposure, ASTM STP 1205, Niren L. Nagda Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, pp. 81-104.

Shair F. H. and K. L. Heitner (1974), «Theoretical Model for Relating Indoor Pollutant Concentrations to Those Outside». Env. Science and Technology 8 : 444-451.

Thomson G. (1978), «The Museum Environment», London: Butterworths.

S U M M A R Y

Indoor air pollution: A threat to our cultural heritage.

Research over the past 20 years has shown that air quality inside buildings can be in certain cases as polluted as the outdoor air depending on the pollutant. Since the early 1970s', investigators have reported indoor ozone concentrations which were a significant fraction (greater than 0.5 in many cases) of those measured outdoors. In addition to ozone, high indoor/outdoor ratios for NO and NO¹ and other reactive species have also been reported by several investigators. This is important because of the adverse effects of air pollutants on the works of art. Indoor air pollutant levels are essentially unknown for museums, churches, archives in Greece, despite the extensive research of outdoor air pollutants carried out for Greek cities.

The research on the preservation of works of art housed inside buildings is an interdisciplinary exercise involving various scientific disciplines. A deteriorating factor which requires attention is the air pollution inside the buildings housing works of art. Concerning the indoor air pollutant levels several questions are raised such as: i) What are the parameters playing an important role on the indoor air quality and in what way they interact? ii) What are the mechanisms govern the deposition of the air pollutants on the indoor surfaces? In addressing such problems, indoor air quality mathematical models describing the concentrations and fate of indoor air compounds constitute important tools. The use of mathematical models for the simulation of indoor pollutant concentrations can be used to guide environmental research indoors. For example to diagnose the causes of observed indoor pollutant concentrations or to investigate the effectiveness of air purification systems or to predict how a modification in the building's operation will affect the indoor air quality. Furthermore, assuming that the deterioration of works of art is pro-

portional to the fluxes of the reactive species to their surfaces, it is possible to estimate from the model results the potential risk of damage to the housed works of art (Oskaynak et al., 1982; E.P.A., 1987; Cass et al., 1988; Weschler et al., 1989).

In the present work we represent the calculations of the indoor air pollutant concentration and the corresponding fluxes of reactive gases as O^3 and HNO^3 into representative buildings, one traditional 8th century Byzantine Church and one new museum (with air conditioning, ventilation and hearing system). The calculations are the results of the applications of an indoor air quality model (Nazaroff and Cass 1986-89), based on measured data.

As the model results have shown, the indoor/outdoor pollutant concentration ratios are comparable in these buildings and for some species these ratios are very high in both buildings. In most cases these ratios are higher of 30%, and depending on outdoor air pollution levels, that means that in many days the indoor air pollutant concentrations in the two buildings are higher than the air quality standards required for cultural heritage preservation. For example, the model have shown that the average calculated fluxes to interior surfaces for two reactive species, O^3 and HNO^3 are for Aghia Sofia 8 and 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{12}\text{h}^{11}$, respectively. The corresponding values for Vergina hall are 13,6 and 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{22}\cdot\text{h}^{11}$ for O^3 and HNO^3 .

Therefore measures should be taken to preserve the important and irreplaceable works of art which are housed inside them.

The present work seeks also to underline the fact that the specified standards for indoor air quality in buildings which house cultural property should be more stringent than the health-based air quality standards, considering the need to preserve unique materials for long periods of time (Thomson, 1978; Shaver et al. 1983; E.P.A., 1987; Baer and Banks, 1985; Cass et al., 1988; Brimblecombe, 1990; Cass, 1995 private communication). The recommended objectives for indoor air pollutants are a few parts per billion. These objectives combined with the fact that indoor air pollution is correlated with the outdoor air quality and with the building system, clearly shows that the indoor air quality problem occurs not only in buildings found in cities with high outdoor air pollution levels but also in some buildings found in remote locations (Drusik et al., 1990; Cass et al., 1991).