



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ  
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

# ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ ΤΡΙΓΩΝΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

## **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Καθηγητής ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΤΣΟΥΤΣΟΣ**

**(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)**

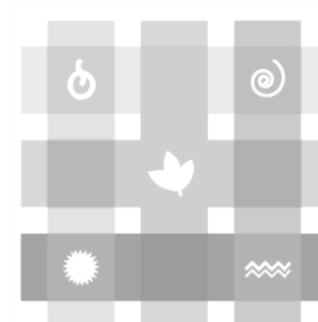
**Επ. Καθηγητής ΞΕΚΟΥΚΟΥΛΩΤΑΚΗΣ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Αν.Καθηγήτρια ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗ ΠΑΓΩΝΑ –**

**ΝΟΝΗ**

**ΧΑΝΙΑ, 2017**



« Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις για τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης. »

Τριγώνης Νικόλαος  
Χανιά , Μάρτιος 2017

## Ευχαριστίες

Προτού γίνει λόγος για οποιοδήποτε επιστημονικό ή ερευνητικό ζήτημα στο παρόν κείμενο, οφείλω να αναγνωρίσω την πολύτιμη βοήθεια ορισμένων ανθρώπων, χωρίς την αρωγή των οποίων δε θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Πρωτίστως αισθάνομαι την ανάγκη να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επόπτη και υπεύθυνο εκπόνησης της παρούσας έρευνας, Καθηγητή Θεοχάρη Τσούτσο, υπεύθυνο του Εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, στον Τομέα της Περιβαλλοντικής Διαχείρισης, για την περισσή όρεξη, την απaráμιλλη βοήθεια, την άριστη συνεργασία και την αδιάκοπη καθοδήγησή του σε κάθε μου βήμα.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερωσ την υποψήφια Διδάκτορα Παπαδάκη Δήμητρα, για την εξαιρετική συνεργασία, την πολύτιμη και πρόθυμη βοήθειά της αλλά και την συνεχή υποστήριξη σε οτιδήποτε χρειαζόμουν

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Γεώργιο Κυριακίδη και την ομάδα του, για την εποικοδομητική μας συνύπαρξη στο Εργαστήριο «Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας» ( ΙΤΕ ) Κρήτης, στο οποίο πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων ως προς την φωτοκαταλυτική δράση του διοξειδίου του τιτανίου στο δομημένο περιβάλλον.

Ευχαριστώ, ακόμα θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Νικόλαο Ξεκουκουλωτάκη ,Διευθυντή του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικής Οργανικής Χημείας-Μικρορύπανσης και την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Παγώνα ( Νόννη) Μαραβελάκη που διετέλεσαν μέλη της τριμελούς μου επιτροπής.

Τέλος , νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφερε, καθώς και τους φίλους μου, οι οποίοι στάθηκαν αλληλέγγυοι όλα αυτά τα χρόνια, κάνοντας το έργο αυτό ευκολότερο.

Τριγώνης Νικόλαος  
Χανιά , Μάρτιος 2017

## Περίληψη

Η περιβαλλοντική ρύπανση αποτελεί ένα καίριο πρόβλημα. Αυτό δεν μπορεί να αγνοηθεί εφόσον αποτελεί άμεση αρνητική επιρροή στο σύγχρονο και μελλοντικό, φυσικό αλλά και ανθρωπογενές περιβάλλον. Η σύγχρονη επιστήμη βασιζόμενη σε νέες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες και διεργασίες καθώς και στην αειφόρο και βιώσιμη ανάπτυξη αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο βελτίωσης της παρούσας προβληματικής κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της ετερογενούς φωτοκατάλυσης στην δομική βιομηχανία αποτελεί μία σημαντικά ελπιδοφόρα προοπτική λόγω των πλεονεκτημάτων που οι μέθοδοι αυτές προσφέρουν σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους απορρύπανσης.

Η ετερογενής φωτοκατάλυση με χρήση νανοϋλικών και ιδιαίτερα του διοξειδίου του τιτανίου, αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία. Αυτό, αντικατοπτρίζεται στο αυξανόμενο ενδιαφέρον των επιστημόνων παγκοσμίως ως προς εργαστηριακές και δημόσιες πρακτικές εφαρμογές της φωτοκατάλυσης αλλά και τις θεωρητικές δημοσιεύσεις και επιστημονικά άρθρα.

Ο τομέας εφαρμογής της φωτοκαταλυτικής τεχνολογίας στους αέριους ρύπους αποτελεί ένα πεδίο μη κορεσμένο και ανοιχτό προς μελέτη ιδίως στην κλίμακα των εφαρμογών σε πραγματικές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας η βιομηχανία υλικών όλη αυτήν την τεχνογνωσία της φωτοκατάλυσης η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια, παρασκεύασε υλικά τα οποία πλέον της προφανής χρήσης τους, θα μπορούσαν να συνδράμουν στην βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, φωτοκαταλύοντας ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Στην παρούσα εργασία με τίτλο «Φωτοκαταλυτική δράση του διοξειδίου του τιτανίου στο δομημένο περιβάλλον» γίνεται μελέτη ορισμένων εκ των βιομηχανικών αυτών υλικών με δύο διαφορετικά είδη διοξειδίου του τιτανίου. Το ένα είδος εμπορίου και το δεύτερο παρασκευασμένο στο εργαστήριο του ΙΤΕ, με σκοπό τη διερεύνηση της συνεισφοράς τους στην ελάττωση της φορμαλδεΐδης, ατμοσφαιρικού ρύπου που συναντάμε στην καθημερινότητα μας. Η παραπάνω πειραματική εργασία εκπονήθηκε σε εργαστηριακές συνθήκες υπό την επίδραση ακτινοβολίας UV.

Αξιοποιώντας τη νανοτεχνολογία, στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην μελέτη, για το ποιο από τα δομικά

υλικά και σε ποια συγκέντρωση του εμπορικού ή του εργαστηριακού νανοϋλικού διοξειδίου του τιτανίου είναι πιο αποτελεσματικό ως προς την μείωση της φορμαλδεΐδης σε εσωτερικούς χώρους.

## **Abstract**

Environment pollution is a major problem which cannot be ignored because it is a direct negative influence to the modern future natural and human environment , as for the science which is based to the new and friendly to the environment technologies and recreations plus to the sustainable and livable development the application of the heterogeneous photocatalysis to the structure industry is a very important hopefully prospective because of the advantaged of the methods that are used comparing the conventional methods of pollution .

The use of nanomaterials especially of titanium dioxide during the heterogeneous photocatalysis is being more and more important. This reflexes to the increasing interest of the scientists from all over the world far the laboratory and public practical uses of photocatalysis but also in the theoretical publications and scientific articles.

The section of using the photocatalysis technology of the gaseous pollutants is an unsaturated field which is open to study especially at a scale of applications in real conditions. The industry of materials using all the technologic of photocatalysis which has developed the last years, has made materials which beside their obvious use, could contribute in the improvement of the atmosphere quality, by photocatalysing the atmosphere pollutants.

At the present essay with the title “the photocatalytic action of the titanium dioxide in built environment” there is a study of some industrial materials with two different titanium dioxide, one of which is more commercially know and the second is made at the laboratory of Technology and Research Institution of Crete, with the intention of studying the contribution into the reduction of formaldehyde-an air pollutant which we face every day. The above experimental essay was done under laboratory conditions under the influence of UV radiation.

Using the benefits of nanotechnology at the present research our interest was focused in the study of which of the structed materials and in what quantity of the

commercially known or the laboratory nano-titanium dioxide is more effective as for as the reduction of formaldehyde in indoors spaces.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑ.....</b>	<b>11</b>
2.1 Ρύπανση εσωτερικών χώρων.....	11
2.2 Ρύποι εσωτερικών χώρων .....	13
2.3 Φορμαλδεΐδη.....	16
2.4 Σύνδρομο αρρώστου κτηρίου .....	17
2.5 Εισαγωγή στην φωτοκατάλυση.....	19
2.6 Φωτοκατάλυση με διοξείδιο του τιτανίου.....	20
2.7 Χρήση νανοϋλικών στο δομημένο περιβάλλον.....	22
2.8 Φωτοκαταλυτική δράση δομικών υλικών.....	25
<b>3. ΜΕΘΕΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....</b>	<b>30</b>
3.1 Πειραματική Διάταξη.....	30
3.2 Λειτουργία θαλάμου-Συμπεριφορά Φορμαλδεΐδης-Αρχικές Συνθήκες.....	44
3.3 Επιλογή μήτρας – Αποτελέσματα.....	49
3.3.1 Ασβεστοκονία .....	49
3.3.2 Τσιμεντούχο Κονίαμα.....	52
3.3.3 Τσιμεντόχρωμα.....	54
3.3.4 Συγκριτικά αποτελέσματα διοξειδίου του τιτανίου.....	57
3.3.5 Αλλαγή συγκέντρωσης διοξειδίου του τιτανίου.....	58
<b>ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>	<b>59</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>65</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>67</b>

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Μηχανισμός φωτοκατάλυσης με διοξείδιο του τιτανίου.....	21
Εικόνα 1.2 Πυραμίδα του Λούβρου με επικάλυψη διοξειδίου του τιτανίου.....	24
Εικόνα 1.3 Εκκλησία στην Μισερικόρντια στην Ρώμη με φωτοκαταλυτικό τσιμέντο..	24
Εικόνα 1.4 Πεζοδρόμιο στα Βριλήσσια με φωτοκαταλυτικούς κυβόλιθους.....	25
Εικόνα 1.5 Leopord II τούνελ στις Βρυξέλλες πριν και μετά την φωτοκαταλυτική επικάλυψη.....	25
Εικόνα 3.1 Ανιχνευτής φορμαλδεΐδης FP - 30 και βασικά μέρη του οργάνου.....	32
Εικόνα 3.2 Ανιχνευτής φορμαλδεΐδης FP – 30 κατά την διάρκεια μέτρησης στο εργαστήριο του ΙΤΕ.....	32
Εικόνα 3.3 Χρησιμοποιημένα φίλτρα ανιχνευτή φορμαλδεΐδης FP – 30 στο εργαστήριο του ΙΤΕ.....	33
Εικόνα 3.4 Φίλτρα ανιχνευτή φορμαλδεΐδης FP-30 στο ψυγείο του εργαστηρίου του ΙΤΕ για την ασφαλή διατήρησή τους.....	33
Εικόνα 3.5 Τελικό διάλυμα φορμαλδεΐδης στο εργαστήριο του ΙΤΕ.....	35
Εικόνα 3.6 Μικροπιπέτα εργαστηρίου ΙΤΕ ρυθμισμένη στα 10 $\mu\text{L}$ .....	35
Εικόνα 3.7 Ανιχνευτής θερμοκρασίας και υγρασίας HC2-WIN-USB.....	36
Εικόνα 3.8 Λογισμικό HC2-WIN-USB.....	37
Εικόνα 3.9 Εσωτερικό γυάλινου θαλάμου.....	36
Εικόνα 3.10 Κλειστός εξωτερικός αλουμινένιος θάλαμος συνδεδεμένος με τον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης.....	38
Εικόνα 3.11 Πειραματική απεικόνιση θαλάμου σε πραγματική μέτρηση με ενεργοποιημένα τους UV λαμπτήρες και τον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης.....	39
Εικόνα 3.12 Ηλεκτρολογικός πίνακας ελέγχου αλουμινένιου εξωτερικού θαλάμου...	41
Εικόνα 3.13 Ολοκλήρωση πειραματικής διαδικασίας , χρησιμοποιημένα φίλτρα , δομικά υλικά , γυάλινος και αλουμινένιος θάλαμος με ξεκάθαρη συνδεσμολογία και ανιχνευτής φορμαλδεΐδης συνδεδεμένος με τον θάλαμο με το κόκκινο καλώδιο ενώ το πράσινο καλώδιο συνδέεται με τον απαγωγό αερίων του εργαστηρίου.....	41
Εικόνα 3.14 Εργαστηριακός εξοπλισμός ( μάσκα και γάντια ) για την αποφυγή τυχόν ατυχήματος.....	42
Εικόνα 3.15 Φωτογράφιση του φοιτητή Τριγώνη Νικόλαου , με την υποψήφια Διδάκτορα Δήμητρα Παπαδάκη κρατώντας δύο τυχαία πάνελ που	

χρησιμοποιήθηκαν	για	την	υλοποίηση	της
έρευνας.....				43

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Κατάταξη δομικών που περιέχουν διοξείδιο του τιτανίου.....	27
Πίνακας 3.1 Υπό μελέτη δομικά υλικά εργαστηριακής έρευνας.....	42
Πίνακας 3.3 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΰδης για το τσιμέντο .....	51
Πίνακας 3.4 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΰδης για το τσιμεντόχρωμα.....	56
Πίνακας 3.5 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΰδης για την ασβεστοκονία με διαφορετικές συγκεντρώσεις τιτανίας TCM.....	59



## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1 Συγκέντρωση φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο για 3 τυχαία δομικά υλικά.....	46
Διάγραμμα 3.2 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο.....	48
Διάγραμμα 3.3 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την υγρασία.....	48
Διάγραμμα 3.4 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% TCM ασβεστοκονία σε σχέση με ασβεστοκονία χωρίς τιτανία.....	50
Διάγραμμα 3.5 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% P-25 ασβεστοκονία σε σχέση με ασβεστοκονία χωρίς τιτανία.....	50
Διάγραμμα 3.6 Σύγκριση συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τις τρεις περιπτώσεις ασβεστοκονίας.....	51
Διάγραμμα 3.7 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% TCM τσιμέντο σε σχέση με τσιμέντο χωρίς τιτανία.....	52
Διάγραμμα 3.8 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% P-25 τσιμέντο σε σχέση με τσιμέντο χωρίς τιτανία .....	53
Διάγραμμα 3.9 Σύγκριση συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τις τρεις περιπτώσεις τσιμέντου.....	53
Διάγραμμα 3.10 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% TCM τσιμεντόχρωμα σε σχέση με τσιμεντόχρωμα χωρίς τιτανία.....	55
Διάγραμμα 3.11 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% P-25 τσιμεντόχρωμα σε σχέση με τσιμεντόχρωμα χωρίς τιτανία.....	55
Διάγραμμα 3.12 Σύγκριση συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τις τρεις περιπτώσεις τσιμεντοχρώματος.....	56
Διάγραμμα 3.13 Σύγκριση εμπλουτισμένων δομικών υλικών με διοξείδιο του τιτανίου TCM 2 % .....	57
Διάγραμμα 3.14 Σύγκριση εμπλουτισμένων δομικών υλικών με διοξείδιο του τιτανίου P-25 2 %.....	57
Διάγραμμα 3.15 Αλλαγή συγκέντρωσης τιτανίας TCM στην ασβεστοκονία.....	58

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ποιότητα του αέρα που καταναλώνουμε στους κλειστούς, εσωτερικούς χώρους -μέρος το οποίο ένας κάτοικος αστικής πόλης υπολογίζεται ότι περνάει περίπου το 90% του χρόνου του- είναι άκρως σημαντική για την υγεία μας. Έρευνες σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν δείξει ότι ο αέρας που αναπνέουμε μέσα στο σπίτι ή στο γραφείο μας δεν είναι τόσο καθαρός όσο νομίζουμε. Αντιθέτως, ορισμένες φορές μπορεί να περιέχει περισσότερους ρύπους από ότι η εξωτερική ατμόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε τι που υπάρχει στους εσωτερικούς χώρους , από τα έπιπλα και τα χαλιά έως και τα καθαριστικά είδη, μπορούν να εκλύουν διάφορες χημικές ενώσεις όπως η εξεταζόμενη στην παρούσα ερευνητική εργασία, φορμαλδεΐδη, οι οποίες επιβαρύνουν τον ανθρώπινο οργανισμό. [ Kolarik Barbara et al . , 2010 ]

Μελέτες επίσης μαρτυρούν ότι οι μεταβολές της σύστασης του αέρα , ιδιαίτερα των εσωτερικών -δημόσιων και μη- χώρων, είναι ο κύριος παράγοντας της ραγδαίας αύξησης των αναπνευστικών ασθενειών. Η συχνότητα εμφάνισης αναπνευστικών δυσκολιών, αλλεργικών αντιδράσεων αλλά και σε μερικές περιπτώσεις σοβαρότερων ασθενειών οφείλουν την ύπαρξή τους σε αυτές τις μεταβολές . Το παραπάνω φαινόμενο αναφέρεται ως « Σύνδρομο Αρρώστου Κτηρίου » (Sick-Building Syndrome). [ Wan-Je Jo et al. , 2009 ]

Η ανάγκη εύρεσης μεθόδων περιβαλλοντικής αποκατάστασης αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες. Η κατάλυση των ρύπων υπό την επίδραση του φωτός, δηλαδή η φωτοκατάλυση , θεωρείται μία εκ των σημαντικότερων τεχνολογιών αντιμετώπισης περιβαλλοντικών προβλημάτων.[Fujishima A. et al., 2009]

Ρίχνοντας μία ματιά στο παρελθόν, το 1972 οι πρωτοπόροι στον τομέα της φωτοκατάλυσης Fujishima και Honda, κατάφεραν την φωτοκαταλυτική διάσπαση του νερού στα στοιχεία του χρησιμοποιώντας φωτοηλεκτρόδιο ημιαγωγού διοξειδίου του τιτανίου. Η αποτελεσματική αυτή μετατροπή της ενέργειας του φωτός σε χημική ενέργεια, έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη της φωτοκαταλυτικής τεχνολογίας. Η φωτοκατάλυση κατέχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ούσα μία μέθοδος υψηλής αποτελεσματικότητας, με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και ταυτόχρονη υψηλή αποτελεσματικότητα. [ Binas V.D. et al. , 2012 ]

Τα οξειδία του τιτανίου με την παρουσία φωτός λειτουργούν σαν καταλύτης που αποδομούν τους ρύπους. Το διοξείδιο του τιτανίου είναι μία από τις πιο σημαντικές και ευρέως διαδεδομένες ουσίες που χρησιμοποιούνται σε όλα τα πεδία της φωτοκατάλυσης. Η χρήση του, σε αντιδράσεις φωτοκατάλυσης αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Το διοξείδιο του τιτανίου, νανοϋλικό στο οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια, είναι ένας ημιαγωγός με μεγάλη φωτοκαταλυτική δραστηριότητα. [Shihui Chen et al., 2012]

Στην παρούσα εργασία, εξετάζουμε σε επίπεδο μικροκλίμακας και υπό εργαστηριακές συνθήκες, την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους υπό την επίδραση ακτινοβολίας UV. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην κατάλυση του ρύπου της φορμαλδεΐδης, μία εξαιρετικά τοξική χημική ένωση η οποία προσβάλλει τον ανθρώπινο οργανισμό.

Ο εμπλουτισμός των οικοδομικών υλικών με διοξείδιο του τιτανίου, επιτυγχάνει αντιμικροβιακή δράση και αυτό-καθαρισμό του υλικού, καθώς και καθαρισμό του αέρα από τους ρύπους. Για να πραγματοποιηθεί η έρευνα χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα δείγματα από γυψοσανίδα εμπλουτισμένα με ένα από τα τρία οικοδομικά υλικά, τσιμέντο, ασβέστη, τσιμεντόχρωμα καθώς και το νανοϋλικό, είτε του εμπορίου (P-25) είτε το εργαστηριακό (TCM).

Η έρευνα για την φωτοκατάλυση της φορμαλδεΐδης και την βελτίωση της ποιότητας του εξεταζόμενου εναέριου χώρου πραγματοποιήθηκε σε πραγματικές συνθήκες μέσα σε ένα ειδικά σχεδιασμένο κουτί, το οποίο διέθετε λαμπτήρες ακτινοβολίας UV. Στο εσωτερικό του κουτιού, διαμορφώθηκε ένας θάλαμος στον οποίο τοποθετούνταν: υγρός ρύπος φορμαλδεΐδης, το δομικό υλικό με ή χωρίς το νανοϋλικό. Έπειτα, με μία σειρά διαδικασιών, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενώς στο πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, καταγράψαμε της μετρήσεις του αέριου ρύπου της φορμαλδεΐδης ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Για την καλύτερη προσέγγιση της έρευνας, πραγματοποιήθηκαν αρκετές επαναλήψεις για να αποφευχθεί ο παράγοντας του ανθρώπινου σφάλματος αλλά και του οργάνου. Ωστόσο, οι διαφορές μεταξύ των αρχικών μετρήσεων ήταν σχεδόν μηδαμινές.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη της φωτοκαταλυτικής δράσης του διοξειδίου του τιτανίου στο δομημένο περιβάλλον. Αναλυτικότερα μελετά το συνδυασμό των οικοδομικών υλικών με ποικίλες συγκεντρώσεις του εμπορικού ή του εργαστηριακού νανοϋλικού διοξειδίου του

τιτανίου. Σκοπός της μελέτης είναι η ανεύρεση του πιο αποτελεσματικού συνδυασμού ως προς την μείωση του αέριου ρύπου της φορμαλδεΐδης σε εσωτερικούς χώρους, πάντα υπό την επίδραση ακτινοβολίας UV, σε πειραματικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

## **2. Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑ**

### **2.1 Ρύπανση εσωτερικών χώρων**

Η εσωτερική ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, αποτελεί σημαντική παράμετρο στην μελέτη οικοδόμησης των κτιρίων, καθώς είναι στενά συνδεδεμένη τόσο με την υγεία όσο και με την άνεση των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται μέσα σε αυτά.

Οι περισσότεροι άνθρωποι παγκοσμίως περνάνε το μεγαλύτερο μέρος του καθημερινού χρόνου τους σε κλειστούς χώρους, όπως το σπίτι, το γραφείο, το σχολείο, το γυμναστήριο, χώροι διασκέδασης κ.α. . Σε κλειστούς όμως χώρους, εντοπίζονται ρύποι που προκαλούν πονοκεφάλους, σοβαρές αλλεργίες και άλλες ασθένειες οι οποίες υποβαθμίζουν σε μεγάλο βαθμό την εσωτερική ατμοσφαιρική ποιότητα του αέρα, άρα και την ποιότητα ζωής. [ Kolarik Barbara et al. , 2010 ]

Παρατηρείται, το φαινόμενο της αέριας ρύπανσης και συγκεκριμένα της ρύπανσης των εσωτερικών χώρων. «Αέρια ρύπανση καλείται η παρουσία στην ατμόσφαιρα κάθε είδους ουσίας, σε τέτοια συγκέντρωση ή διάρκεια που να μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην υγεία του ανθρώπου και άλλων ζωντανών οργανισμών, όσο και στα οικοσυστήματα που αυτοί ενδιαιτούν». [Parlalidis Theologos et al . , 2009]

Το εσωτερικό περιβάλλον σε οποιοδήποτε κτίριο είναι ένα συνονθύλευμα παραγόντων μεταξύ της περιοχής, του κλίματος, του συστήματος εξαερισμού του κτιρίου, των τεχνικών οικοδόμησης, των μολυσματικών πηγών καθώς και των χρηστών του κτιρίου .

Η ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους λοιπόν , καθορίζεται από τρεις βασικούς παράγοντες: φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς . Ως φυσικοί παράγοντες αναφέρονται η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ο αερισμός, ο

φωτισμός και η σκόνη που ενδεχομένως υπάρχει στο κτήριο. Οι χημικοί παράγοντες αναλύονται σε αιωρούμενα σωματίδια, βαρέα μέταλλα, τοξικά στοιχεία, ιόντα, πτητικές οργανικές και ανόργανες αέριες ενώσεις. Τέλος, τους βιολογικούς παράγοντες απαρτίζουν διάφοροι μικροοργανισμοί καθώς και τυχόν αλλεργιογόνα που έχουν διεισδύσει από το εξωτερικό περιβάλλον. [ Auriven Joonas et al. , 2008 ]

Παρατηρείται λοιπόν ότι, οι εσωτερικοί ρύποι ενός κτιρίου προκύπτουν τόσο από εξωτερικές πηγές, δηλαδή, εκπεμπόμενους ρύπους οι οποίοι διεισδύουν στον εσωτερικό χώρο, όσο και από τις εσωτερικές πηγές. [ Auriven Joonas et al. , 2008 ]

Οι κύριες εξωτερικές πηγές που επηρεάζουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος είναι οι ακόλουθες: Βιομηχανικές εκπομπές, ρύπανση λόγω της κυκλοφορίας, κοντινές πηγές εκπομπής ρύπων, ρύποι από χώμα. Ως κύριες εσωτερικές πηγές που επηρεάζουν την ποιότητα του εσωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα αναφέρονται οι εξής : Ανθρώπινος μεταβολισμός αέρα , δραστηριότητες και χρήση των κατοίκων, οικοδομικά υλικά και εξοπλισμός, σύστημα ψύξης και θέρμανσης. [Auriven Joonas et al. , 2008 ]

Οι πηγές ρύπανσης των εσωτερικών χώρων διακρίνονται αρχικά, ανάλογα με τη θέση τους ως προς τον εσωτερικό χώρο, δηλαδή εξωτερικές ή εσωτερικές πηγές. Παράλληλα διαχωρίζονται ανάλογα με την επικινδυνότητα τους, δηλαδή με το πόσο επιβλαβής είναι η εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, εξετάζεται το μέγεθος συγκεντρώσεως αυτών, καθώς και η περιοδικότητα εκπομπής των ρύπων, δηλαδή ο ρυθμός εκπομπής ρύπων, σε συνεχή ή περιστασιακή βάση. [ Wan-Je Jo et al. , 2009 ]

Βάση των παραπάνω, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) σε συνεργασία με πολλούς επιστήμονες ανά τον κόσμο και έπειτα από ειδικευμένες έρευνες, κατέληξε στη διαβάθμιση των ρύπων της ατμόσφαιρας εσωτερικών χώρων, αναφορικά με την πιθανότητα πρόκλησης βλαβών στον ανθρώπινο οργανισμό. Ουσιαστικά, οι επιστήμονες έχουν καθορίσει κάποια πρότυπα ποιότητας αέρα, δηλαδή τις ποσότητες συγκέντρωσης των ρύπων αυτών που δεν επηρεάζουν την υγεία και είναι ασφαλή ακόμα και για τα πλέον ευαίσθητα άτομα.

## 2.2 Ρύποι εσωτερικών χώρων

Όταν στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, δηλαδή όταν δεν τηρούνται τα πρότυπα ποιότητας αέρα που έχουν καθοριστεί, τότε παρουσιάζονται ιδιαίτερα προβλήματα υγείας στους χρήστες του εκάστοτε κτιρίου. Οι σημαντικότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι οι εξής :

### 1. Το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόν μεταβολισμού και αποτέλεσμα υλικών που περιέχουν άνθρακα. Πρόκειται για ένα αέριο μη τοξικό το οποίο έχει επιπτώσεις στην αναπνοή και είναι ικανό να προκαλέσει ναυτία αλλά και ασφυξία όταν βρίσκεται σε κλειστό χώρο σε αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις. Προέρχεται κυρίως από τις συσκευές καύσης και θέρμανσης, καθώς και από την ανθρώπινη παρουσία μέσα σε ένα κτίριο. Για τον περιορισμό του διοξειδίου του άνθρακα σε εσωτερικούς χώρους θα πρέπει να γίνεται συχνός αερισμός του χώρου. [ Friedlingstain P . et al. , 2010 ]

### 2. Το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ )

Το μονοξείδιο του άνθρακα σε αντίθεση με το διοξείδιο θεωρείται τοξικό αέριο. Πρόκειται για ένα μη εύκολα ανιχνεύσιμο αέριο καθώς είναι άοσμο, άχρωμο και άγευστο. Προέρχεται κυρίως από την καύση του άνθρακα καυσίμων, όπως η βενζίνη ή το ξύλο, από χρήση οικιακών συσκευών και ψησταριών, από το κάπνισμα, καθώς και από διάφορες εξωτερικές πηγές, όπως οι εκπομπές μηχανοκίνητων οχημάτων . Το μονοξείδιο του άνθρακα έχει την ιδιότητα να εμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου στα κύτταρα. Η έκθεση του σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να δημιουργήσει αρκετές δυσμενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο. [ Friedlingstain P . et al. , 2010 ]

### 3. Το Μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου ( NO , NO<sub>2</sub> )

Πρόκειται για τα οξείδια του αζώτου τα οποία είναι προϊόντα καύσης στερεών, υγρών και αέριων καυσίμων σε αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες, όπως είναι η περίπτωση της διεργασίας της καύσης σε αυτοκίνητα. Γενικά, τα NO<sub>x</sub> προκαλούν ένα ευρύ πρόβλημα υγείας δημιουργώντας σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους. Ως μέτρο περιορισμού των συγκεκριμένων οξειδίων θεωρείται η μείωση των δραστηριοτήτων που προκαλούν την εκπομπή τους και ο καλός εξαερισμός. [M.M Ballari et al. , 2010]

### 4. Το όζον (O<sub>3</sub>)

Το όζον παράγεται από συσκευές γραφείων όπως τα φωτοτυπικά και πρόκειται για ένα αέριο που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές φθορές ως προς τον άνθρωπο, τους πνεύμονες , αλλά και ως προς το εσωτερικό και εξωτερικό οικοσύστημα λόγω των επιπτώσεων αναφορικά με τη χλωρίδα. Μέτρο περιορισμού του όζοντος είναι επίσης ο πολύ καλός αερισμός του εκάστοτε κτιρίου. [Friedlingstain P . et al. , 2010 ]

### 5. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)

Πρόκειται για οργανικές ενώσεις οι οποίες μπορούν να βρεθούν στη φάση αερίου στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι χημικές ουσίες που συγκρατούν διοξείδιο και συμμετέχουν σε φωτοχημικές αντιδράσεις στον περιβαλλοντικό αέρα και ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο συμβάλλουν στην φωτοχημική ρύπανση του αέρα. Προέρχονται κυρίως από οικοδομικά υλικά, μηχανοκίνητα οχήματα καθώς και των καπνό του τσιγάρου. Άλλες πηγές μπορεί να είναι καλλυντικά καθώς και προϊόντα καθαρισμού. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι οι πτητικές οργανικές ενώσεις καθορίζουν κατά μεγάλο ποσοστό την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και γι' αυτό πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση τους. Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες πτητικές οργανικές ενώσεις είναι το βενζόλιο, το τουτόλιο, η φορμαλδεΐδη, για την οποία θα γίνει ανάλυση σε επόμενη παράγραφο, καθώς και η ακετόνη. [Yu Gong et al. , 2016]

## 6. Το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>)

Προέρχεται από εξωτερικές πηγές και κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων και αποτελεί ατμοσφαιρικό ρύπο. Πρόκειται για ένα ρύπο ο οποίος προκαλεί ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος, και σε υψηλές συγκεντρώσεις ερεθισμό ακόμα και στο δέρμα. Ιδιαίτερα ευαίσθητο στον παραπάνω ρύπο είναι τα άτομα με αναπνευστικά προβλήματα καθώς και οι ηλικιωμένοι άνθρωποι. Ως μέτρο περιορισμού της εκπομπής του διοξειδίου του θείου στους εσωτερικούς χώρους είναι η εγκατάσταση συστήματος απαγωγής καυσαερίων καθώς και η διατήρηση του σε άριστη κατάσταση. [Kai Zhanh , 2016]

## 7. Ο περιβαλλοντικός καπνός του τσιγάρου (Enviromental Tobacco Smoke – ETS)

Περιβαλλοντικός καπνός του τσιγάρου ορίζεται το μίγμα των καπνών που προέρχεται από το κάπνισμα ενός τσιγάρου , μίας πίπας και γενικά του καπνού που εκπνέει ο εκάστοτε καπνιστής . Είναι ένα σύνθετο μίγμα αρκετών ενώσεων, μεταξύ των οποίων περισσότερες από 40 είναι αποδεδειγμένο ότι προκαλούν καρκίνο αλλά και αρκετούς περεταίρω ερεθισμούς στην ανθρώπινη υγεία. [ Per Ivar Ling et al., 1987]

## 8. Βιολογικοί ρύποι

Οι βιολογικοί ρύποι αποτελούνται από τα βακτήρια, τους μύκητες και τους ιούς. Οι κυριότερες συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη των βιολογικών ρύπων είναι η υγρασία, η μούχλα, η σκόνη, ο ανεπαρκής αερισμός καθώς και ο κακός φωτισμός ενός κλειστού χώρου. Οι βιολογικοί ρύποι μπορούν να προκαλέσουν πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων στον άνθρωπο και την υγεία του όπως αλλεργικές, μολυσματικές καθώς και τοξικές επιδράσεις του ανθρώπινου οργανισμού με το περιβάλλον του. Κάποια μέτρα περιορισμού της έκθεσης στους βιολογικούς ρύπους είναι το καλό καθαρίσμα του κτιρίου, η σωστή συντήρηση των κλιματιστικών και της θέρμανσης, ο σωστός εξαερισμός του κτιρίου καθώς και ο έλεγχος της υγρασίας. [Bartra et al. ,2007]



Στην περίπτωση που οι παραπάνω ρύποι εσωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα, δεν ακολουθούν τα πρότυπα ποιότητας αέρα που έχουν τεθεί από τους επιστήμονες και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), δημιουργείται η λεγομένη ρύπανση των εσωτερικών χώρων η οποία με την σειρά της συμβάλει στο φαινόμενο που καλείται «Σύνδρομο Αρρώστων Κτιρίων».

## 2.3 Φορμαλδεΐδη

Η φορμαλδεΐδη ή αλλιώς μεθανάλη είναι ένα άχρωμο αέριο με έντονη οσμή από μια οικογένεια αερίων που ονομάζεται αλδεΐδες. Πρόκειται για μία φυσική οργανική ένωση με χημικό τύπο  $\text{HCHO}$  ή  $\text{CH}_2\text{O}$ . Το συναντάμε συνήθως στον εσωτερικό αέρα των σπιτιών κυρίως σε μικρές συγκεντρώσεις αλλά και σε εξωτερικούς χώρους. Μπορεί να εκπέμπεται από οικοδομικά υλικά και έπιπλα, καθώς αποτελεί υποπροϊόν καύσης και μπορεί να εισέλθει στον εσωτερικό αέρα ενός κτηρίου από πηγές όπως το κάπνισμα. [Shiraishi F. et al., 2005]

Πρόκειται για ένα ερεθιστικό αέριο το οποίο θεωρείται ως ένας από τους κυριάρχους εσωτερικούς ρύπους και η έκθεση του σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει αδυναμία στα μάτια, τη μύτη και το λαιμό. Η μακροχρόνια έκθεση σε μέτριες συγκεντρώσεις έχουν συνδεθεί με αναπνευστικά προβλήματα. Επίσης, το παραπάνω αέριο θεωρείται καρκινογόνο. [F. Shiraishi et al. , 2007]

Βασιζόμενοι στα παραπάνω, πολλές κυβερνήσεις και οργανισμοί ανά τον κόσμο, έπειτα από πειραματικές μελέτες ως προς τον ερεθισμό της ανθρώπινης υγείας μέσω της φορμαλδεΐδης, έχουν εκδώσει κάποια ασφαλή επιτρεπτά όρια. Κατέληξαν, λοιπόν, στο συμπέρασμα, ότι η συγκέντρωση φορμαλδεΐδης, στον αέρα, που δεν ξεπερνά τα 0,3 ppm θα παρέχει προστασία από τους ερεθισμούς των ματιών και την προσβολή του αναπνευστικού συστήματος στο μεγαλύτερο ποσοστό των ανθρώπων. Όμως, για την προστασία ακόμα και των πιο ευπαθών ανθρώπων ομάδων, συνίσταται όριο φορμαλδεΐδης με αέριες συγκεντρώσεις μικρότερες των 0,1 ppm. [F. Shiraishi et al. , 2007]

Συγκεκριμένα, έπειτα από πειραματικές μελέτες προσδιορίστηκε η τιμή TLV, δηλαδή, η ανώτατη συγκέντρωση μιας ουσίας στον αέρα, στην οποία μπορεί να εκτεθεί ο άνθρωπος χωρίς επίπτωση στην υγεία του, καθώς και η τιμή TLV – TWA, η

οποία αφορά συγκεντρώσεις σε κατά μέσο όρο 8ωρης εργασίας ημερησίως ή 40ωρης εργασίας εβδομαδιαίως. [Philp B. Richard , 2001] .

Πιο αναλυτικά, ως προς την τιμή TLV αναφέρονται συγκεντρώσεις μικρότερες των 0,5 ppm και ως προς την TLV- TWA, τιμές κοντά στο 0,3 ppm, με ανώτατη τιμή, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 ppm . Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται επίσης, από την παγκόσμια επιτροπή υγείας του οργανισμού WHO .

Οι κύριες πηγές φορμαλδεΐδης στα σπίτια προέρχονται από δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στο σπίτι, προϊόντα ξύλου, όπως επένδυση επίπλων με κόντρα πλακέ, ξύλο και προϊόντα που χρησιμοποιούν κόλλες. Άλλες πηγές φορμαλδεΐδης μπορεί να είναι τα έπιπλα του σπιτιού , τα χαλιά , βερνίκια και γενικά υφάσματα όπως μία κουρτίνα ή ακόμα και τα ρούχα μας. Επίσης, όπως προαναφέραμε, η φορμαλδεΐδη αποτελεί παραπροϊόν καύσης, άρα στις κύριες πηγές αναφέρονται η απελευθέρωση φορμαλδεΐδης από σόμπες ξύλου, τζάκια τα οποία δεν έχουν σωστό εξαερισμό, καυσαέρια των οχημάτων που εισέρχονται από υπάρχον γκαράζ καθώς και το τσιγάρο. [Ki-Hyun Kim et al. , 2011]

Σε γενικές γραμμές, τα προϊόντα που αποτελούν τις κύριες πηγές φορμαλδεΐδης στους εσωτερικούς χώρους μειώνονται με τον καιρό. Ουσιαστικά , οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε νεοδόμητα ή πρόσφατα ανακαινισμένα σπίτια λόγω των δομικών υλικών.

## **2.4 Σύνδρομο αρρώστου κτηρίου (SBS)**

Το « Σύνδρομο Αρρώστων Κτιρίων - Sick Building Syndrome », πρόκειται για έναν όρο ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα δυσμενή συμπτώματα της υγείας του άνθρωπο που προκύπτουν από τα προβλήματα με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα.

Ουσιαστικά, το φαινόμενο «Σύνδρομο των αρρώστων κτιρίων», αναφέρεται στις καταστάσεις τις οποίες οι κάτοικοι των κτιρίων βιώνουν προβλήματα υγείας ή ταλαιπωρούνται, γεγονός που συνδέεται άρρηκτα με το χρόνο τον οποίο βρίσκονται σε ένα κτίριο, ενώ την ίδια στιγμή καμία ασθένεια ή συγκεκριμένη αιτία των παραπάνω αποτελεσμάτων, δεν μπορεί να προσδιοριστεί. [ Kolarik Barbara et al. , 2010 ]

Ως προς τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) έχει αναγνωριστεί μία ομάδα συμπτωμάτων που δεν έχουν σαφή αιτιολογία και οφείλονται στην έκθεση των ατόμων σε μεταβλητές του κτιρίου, όπως είναι η ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων, ο φωτισμός και ο θόρυβος. Τα συμπτώματα μπορούν να εμφανιστούν μεμονωμένα ή ακόμα και σε συνδυασμό , δημιουργώντας μεγαλύτερο κίνδυνο στην ανθρώπινη υγεία. [A. Mendes et al. , 2014]

Για τον προσδιορισμό των συμπτωμάτων μιας ασθένειας που μπορεί να διαγνωσθεί και να αποδοθεί άμεσα στους αέριους ρύπους ενός εσωτερικού χώρου χρησιμοποιούμε τον όρο, «Ασθένεια σχετική με το Κτίριο» . [ JT Salin et al. , 2016]

Ωστόσο, δεν υπάρχει επαρκής θεωρία όσον αφορά τα ιατρικά περιστατικά που σχετίζονται με αυτό, καθώς, τα συμπτώματα του δεν είναι συγκεκριμένα και δεν προκαλούνται από κάποια συγκεκριμένη ασθένεια. Επίσης, τα συμπτώματα μπορεί να διαφοροποιούνται από κτίριο σε κτίριο, ανάλογα με τους διαφορετικούς παράγοντες που τα προκαλούν σε κάθε περίπτωση .

Παραθέτοντας όμως μία πιο γενική σκέψη ως προς τα συμπτώματα, μπορούμε να τα αναφέρουμε συγκεντρωτικά και κατηγοριοποιημένα ως τα κοινά συμπτώματα του συνδρόμου του αρρώστου κτιρίου, δηλαδή :

- Δερματικά συμπτώματα, όπως αναφυλαξία προσώπου, χεριών και γενικά δερματικές παθήσεις .
- Συμπτώματα στον φάρυγγα, όπως βήχας, ξηρός λαιμός καθώς και πόνοι στο λαιμό .
- Συμπτώματα στα μάτια , όπως ερεθισμός ματιών ή πρήξιμο βλεφάρων .
- Ρινικά Συμπτώματα, όπως καταρροή και συμφόρηση .
- Γενικά συμπτώματα, όπως, κόπωση, υπνηλία, πονοκέφαλοι, αδυναμία συγκέντρωσης, λήθαργος, πυρετός, καθώς και πόνοι μυών . [Dr Carrie A. Redlich , 1997]

Για την εξάλειψη του παραπάνω συνδρόμου αλλά και των ρύπων των εσωτερικών χώρων -τα οποία όπως αναφέραμε, δημιουργούνται όταν δεν τηρούνται τα καθορισμένα πρότυπα εσωτερικού αέρα- προτείνονται διάφοροι τρόποι όπως ο πολύ καλός εξαερισμός τον κτιρίων και ο έλεγχος της υγρασίας .Τα τελευταία χρόνια γίνεται μεγάλος λόγος για την τεχνολογία της φωτοκατάλυσης , καθώς έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την αποδόμηση οργανικών και ανόργανων ρύπων . Όπως

αναφέρεται από τους επιστήμονες η εφαρμογή της φωτοκατάλυσης αποτελεί μία ολοκληρωμένη, οικονομική λύση για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους .

## **2.5 Εισαγωγή στην φωτοκατάλυση**

Μία από τις προηγμένες διεργασίες οξειδωσης που έχει απασχολήσει πλήθος ερευνητών τις τελευταίες δεκαετίες είναι η φωτοκατάλυση. Όπως αναφέραμε, το 1972 οι πρωτοπόροι στον τομέα της φωτοκατάλυσης Fujishima και Honda , κατάφεραν την φωτοκαταλυτική διάσπαση του νερού στα στοιχεία του χρησιμοποιώντας φωτοηλεκτρόδιο ημιαγωγού διοξειδίου του τιτανίου . Πρόκειται για την επιτάχυνση μιας φωτοαντίδρασης με την παρουσία καταλύτη, κατά βάση διοξείδιο του τιτανίου, ο οποίος χωρίς να καταναλώνεται, μειώνει ουσιαστικά την ενέργεια που χρειάζεται για να ενεργοποιηθεί, προσφέροντας έναν εναλλακτικό μηχανισμό πραγματοποίησης της. [Mills A. et al. , 1997 ]

Ουσιαστικά, μιλάμε για την αποτελεσματική μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική ενέργεια. Δηλαδή μία οξειδωτική μέθοδο μέσω της οποίας είναι δυνατό να καταστραφούν τοξικές οργανικές χημικές ενώσεις ή ουσίες. Η διαδικασία της φωτοκατάλυσης εξαρτάται κατά πολύ από την ικανότητα του καταλύτη να δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίου–οπής. Καθώς γνωρίζουμε, οι περισσότερες μελέτες που έχουν εκπονηθεί μέχρι στιγμής, σχετικά πάντα με τις περιβαλλοντικές εφαρμογές της φωτοκαταλυτικής τεχνολογίας, εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στην χημεία των ημιαγωγών. [ A. Fujishima et al. 1999 ]

Η φωτοκατάλυση διακρίνεται σε δύο τύπους, την ομογενή και την ετερογενή . Η ετερογενής φωτοκατάλυση έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική, παγκοσμίως, κυρίως σε εργαστηριακό περιβάλλον. Ωστόσο, καρποφόρες έχουν αποβεί εφαρμογές φωτοκατάλυσης και σε πραγματικές συνθήκες, με σκοπό την διάσπαση αέριων και υγρών ρύπων, σε δημόσια έργα. [ A. Fujishima et al. 2000 ]

Ως προς τον μηχανισμό της φωτοκαταλυτικής δράσης, ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και πρακτικής εφαρμογής των φωτοκαταλυτικών ιδιοτήτων των ημιαγωγικών σωματιδίων, αποτελούν τα δομικά υλικά. Η προσθήκη αυτών των σωματιδίων, με κυριότερο το διοξείδιο του τιτανίου, αποσκοπούν στην αποφυγή

συσσώρευσης οργανικών και ανόργανων ρύπων στα τοιχώματα των κτιρίων. Επιπρόσθετα, στοχεύουν στη βελτίωση του ατμοσφαιρικού αέρα στον περιβάλλοντα χώρο, καθώς η επαφή των ρύπων με το φωτοκαταλυτικό υλικό δημιουργεί φωτοκαταλυτική οξείδωση. [Jun Chen et al. , 2009]

Πιο αναλυτικά, όταν στον ημιαγωγό προσπέσουν φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα, τότε ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους διεγείρονται στην ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας ζεύγος αντίθετα φορτισμένων φορτίων, τα φωτοηλεκτρόνια, με αρνητικό φορτίο και στις θετικές οπές με θετικό φορτίο. Η παραπάνω φωτονιακή διέγερση αφήνει πίσω της μία κενή ζώνη σθένους δημιουργώντας έτσι το ζεύγος ηλεκτρονίου- οπής που αναφέραμε παραπάνω. [Jun Chen et al. , 2009]

Τέλος μετά από αρκετά χρόνια έρευνας πάνω στο χώρο της κατάλυσης των ρύπων, και με γνώμονα το στραμμένο ενδιαφέρον πολλών επιστημονικών κλάδων για τον τομέα αυτόν, καταλήγουμε πως η εφαρμογή της φωτοκατάλυσης αποτελεί μία ολοκληρωμένη, οικονομική λύση, για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους. Βασιζόμενοι σε αυτό το συμπέρασμα και με την χρήση του κατάλληλου ημιαγωγού, διοξειδίου του τιτανίου, εκπονήθηκε η παρούσα ερευνητική εργασία, στον τομέα της φωτοκαταλυτικής δράσης στο δομημένο περιβάλλον .

## **2.6 Φωτοκατάλυση με διοξείδιο του τιτανίου**

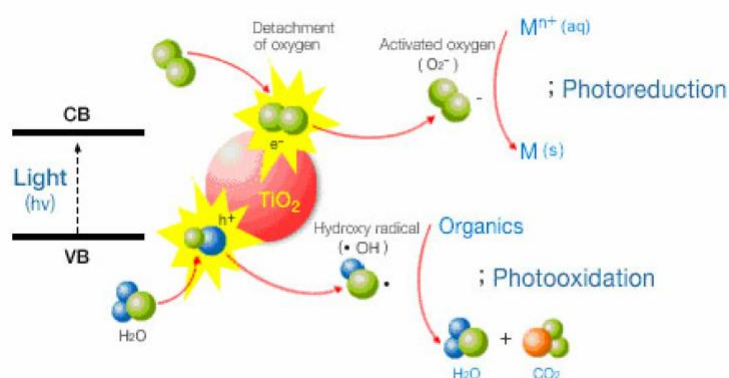
Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στο παρελθόν, και αναφερόμενοι στα τέλη της δεκαετίας του 60 , όπου και κάνει την εμφάνισή του το συναρπαστικό υλικό, διοξειδίου του τιτανίου . Το διοξείδιο του τιτανίου το οποίο συμβολίζεται  $TiO_2$  είναι ένα από τα οξείδια του τιτανίου και αποτελεί το ένατο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της γης. Επιπλέον, φέρει το όνομα λευκό ρουτίλιο. [ A. Fujishima et al. , 2000 ]

Η ιστορία , ξεκινά με την φωτοηλεκτροχημική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας και στη συνέχεια κάνει την εμφάνισή της στον τομέα της φωτοκαταλυτικής δράσης. Αναδεικνύοντας, έτσι, το διοξείδιο του τιτανίου σ' ένα εξαιρετικό φωτοκαταλυτικό υλικό με σκοπό τον περιβαλλοντικό καθαρισμό. [ A. Fujishima et al. , 2000 ]

Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί, από μεγάλο αριθμό επιστημονικών εργασιών, ότι το διοξείδιο του τιτανίου αποτελεί έναν εξαιρετικό ημιαγωγό για την αποδόμηση οργανικών και ανόργανων ενώσεων, τόσο στην υδατινή όσο και στην αέρια φάση. [Binas V.D et al. , 2012]

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του έναντι άλλων ημιαγωγών είναι :

- 1) Η μεγάλη διαθεσιμότητα του παρόντος υλικού.
- 2) Η μεγάλη σταθερότητα. ( αδρανές υλικό )
- 3) Η ελάχιστη έως ανύπαρκτη τοξικότητα.
- 4) Είναι ένα υλικό το οποίο δύναται να δρα σε συνθήκες περιβάλλοντος, πράγμα που έμμεσα δηλώνει και χαμηλό ενεργειακό κόστος.
- 5) Το χαμηλό κόστος του υλικού. [ Zhang et al. , 2001 ].



Εικόνα 1.1 Μηχανισμός φωτοκατάλυσης με διοξείδιο του τιτανίου.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1 ο μηχανισμός της φωτοκατάλυσης του διοξειδίου του τιτανίου πραγματοποιείται με την απορρόφηση φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα. Έτσι, ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους του παρόντος ημιαγωγού διεγείρονται στην ζώνη αγωγιμότητας με αποτέλεσμα την δημιουργία των θετικών οπών και των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Ουσιαστικά, οι οξειδωτικές ρίζες σχηματίζονται από τα αντίθετα φορτία τα οποία αντιδράνε στην επιφάνεια του ημιαγωγού. [ Fujishima et al . 2000 ]

Σημαντική παράμετρο στη φωτοκαταλυτική δραστικότητα του διοξειδίου του τιτανίου αποτελεί το μέγεθος του νανοϋλικού των σωματιδίων. Γνωρίζουμε ότι όταν το μέγεθος μειώνεται, η φωτοκαταλυτική απόδοση του καταλύτη μεγαλώνει, καθώς μεγαλύτερος αριθμός μορίων μπορούν να αντιδράσουν με ζεύγη ηλεκτρονίων και θετικών οπών . [ Zhao Yu et al. , 2003 ]

Ως προς τα χημικά χαρακτηριστικά που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση μιας φωτοκαταλυτικής αντίδρασης, αναφέρεται η προσθήκη μεταλλοκατιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα του διοξειδίου του τιτανίου. Η προσθήκη αυτή μπορεί να προκαλέσει αποτελεσματικότερο διαχωρισμό των φορτίων, καθώς και ταχύτερη μεταφορά τους στην επιφάνεια, όπου αντιδρούν πιο αποτελεσματικά προς σχηματισμό δραστικών οξειδωτικών . [ Fujishima et al . 2000 ]

Τέλος, αναφορικά με την επίδραση εξωτερικών παραμέτρων ως προς την απόδοση μιας φωτοκαταλυτικής αντίδρασης, σημαντικό ρόλο παίζουν παράγοντες όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, η ακτινοβολία αλλά και τα είδη χημικών ενώσεων που συνυπάρχουν στο εκάστοτε φωτοκαταλυτικό σύστημα. [ Hermann et al. , 2000 ]

## **2.7 Χρήση νανοϋλικών στο δομημένο περιβάλλον**

Τα φωτοκαταλυτικά δομικά υλικά ανοίγουν νέους δρόμους στον τομέα της κατασκευαστικής με πολλαπλά οφέλη, όπως η υψηλή ποιότητα, το καθαρό περιβάλλον καθώς και η υγιεινή διαβίωση. Η βιομηχανία των δομικών υλικών είναι από τους λίγους παραγωγικούς τομείς που ακολουθούν τις τάσεις της επιστήμης και της τεχνολογίας μελετώντας τα νέα ευρήματα , ανεξαρτήτως της οικονομικής κρίσης. Στο πλαίσιο αυτό η βιομηχανία δομικών υλικών έχει επωφεληθεί ιδιαίτερα από τις πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας. [Monika J. Hanus et al . , 2013]

Έπειτα από αρκετές έρευνες, εργαστηριακές και μη, αναφέρεται ότι η πιο σημαντική εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία των δομικών υλικών είναι αυτή των φωτοκαταλυτικών υλικών. Ο συνδυασμός των φωτοκαταλυτικών νανοϋλικών με δομικά υλικά, όπως η ασβεστοκονία, το τσιμέντο, ο χάλυβας, το τσιμεντόχρωμα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των λεγόμενων φωτοκαταλυτικών αυτοκαθαριζόμενων δομικών υλικών . [ Chen Jun et al. , 2009]

Τα φωτοκαταλυτικά αυτοκαθαριζόμενα υλικά έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν τους οργανικούς και τους ανόργανους ρύπους από την επιφάνεια τους, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη προσπάθεια είτε από τον χρήστη του εκάστοτε χώρου είτε από τις δημόσιες αρχές. Ταυτόχρονα λειτουργούν θετικά για την προστασία του περιβάλλοντος και την απολύμανση των χώρων χάρις στις φωτοδιασπαστικές τους ιδιότητες. Ειδικά για τους ανόργανους ρύπους, τα προϊόντα της φωτοκατάλυσης είναι νερό και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ όσον αφορά τους ανόργανους ρύπους, η μέχρι τώρα μελέτη έχει δείξει ότι αποδομούνται με τη φωτοκατάλυση και παράγονται ακίνδυνα, μη τοξικά προϊόντα. [ Monika J. Hanus et al.,2013 ]

Τα οφέλη από αυτόν το συνδυασμό των δομικών υλικών με τα νανοϋλικά είναι πολλαπλά. Πρόκειται για υλικά που μπορούν να συνεισφέρουν όχι μόνο στη βελτίωση της κατασκευής, την δημόσια υγεία και ευεξία του ανθρώπου, αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος, την εξυγίανση εσωτερικών χώρων και την προστασία κτιρίων ιστορικής κληρονομιάς και μνημείων. [ Chen Jun et al. , 2009]

Αναφορικά με την περιβαλλοντική δημόσια προστασία, τα φωτοκαταλυτικά δομικά υλικά ανοίγουν νέους δρόμους και προσφέρουν νέες βελτιωμένες επιλογές για την κατασκευή αλλά και την απλή επικάλυψη ενός κτιρίου. Αυτό φαίνεται εξάλλου και από την μεγάλη δημόσια απήχηση που υπάρχει από διάφορα ευρωπαϊκά κράτη τα τελευταία χρόνια, με την πυραμίδα του Λούβρου στην Γαλλία να αποτελεί μία, ίσως την πιο γνωστή, εφαρμογή εξωτερικής επικάλυψης κτιρίου με διοξείδιο του τιτανίου. Ακολουθούν η εφαρμογή φωτοκαταλυτικού τσιμέντου στις όψεις του δημαρχείου της πόλης Μπέργκαμο στην Ιταλία, ο ποδηλατόδρομος στην περιοχή των Βριλησσιών, κατασκευασμένος με φωτοκαταλυτικούς κυβόλιθους, ενώ το πρώτο κτίριο που κατασκευάστηκε με φωτοκαταλυτικό τσιμέντο είναι η εκκλησία της Μισερικόρντια στην πόλη της Ρώμης. Ένα ακόμα έργο πάνω στον τομέα της φωτοκατάλυσης αποτελεί το Leopold II τούνελ στις Βρυξελλές . [ M. Katsiotis, 2011 ]

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα χρήσης νανοϋλικών για κατασκευές και επικαλύψεις κτιρίων σε ευρωπαϊκές χώρες. Επίσης, με το πέρασμα των χρόνων παρατηρείται αύξηση της βιομηχανικής, πράγμα που αποτελεί σημείο στροφής για την βιομηχανία δομικών υλικών παγκοσμίως. Λόγος γίνεται για την χρήση των φωτοκαταλυτικών δομικών υλικών και στην χώρα μας την τελευταία δεκαετία. [Monika J. Hanus et al . , 2013 ]



Αναφέροντας την προστασία της ιστορικής κληρονομιάς, όπως γίνεται κατανοητό, η μείωση της συγκέντρωσης των αέριων ρύπων αλλά και οι ιδιότητες αυτοκαθαρισμού των δομικών υλικών με χρήση νανοϋλικών, μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην προστασία της ιστορικών μνημείων. Ουσιαστικά αυτό μπορεί να υλοποιηθεί απομακρύνοντας τις βλαβερές ουσίες και τους αέριους ρύπους από το περιβάλλον των μνημείων, συμβάλλοντας έτσι στην διατήρησή τους, ιδίως στα περισσότερο επιβαρυμένα αστικά κέντρα. [ M. Katsiotis, 2011 ]

Φυσικά, η φωτοκατάλυτική δράση των δομικών υλικών ποικίλει στα διάφορα δομικά υλικά. Αυτό σημαίνει ότι με την ίδια ποσότητα νανοϋλικού και στις ίδιες περιβαλλοντικές, φυσικές και χημικές συνθήκες η φωτοκαταλυτική δράση του τσιμέντου λόγω χάριν, μπορεί να είναι πιο ενθαρρυντική από ότι της ασβεστοκονίας.



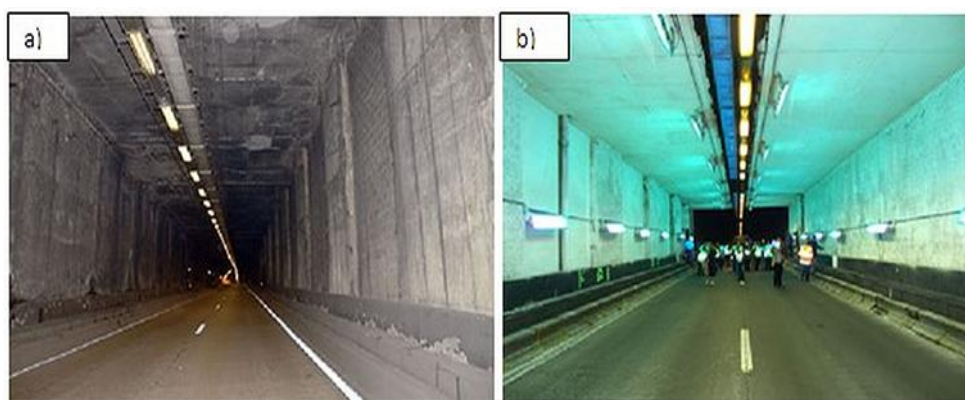
Εικόνα 1.2 Πυραμίδα του Λούβρου με επικάλυψη διοξειδίου του τιτανίου.



Εικόνα 1.3 Εκκλησία στην Μισερικόρντια στην Ρώμη με φωτοκαταλυτικό τσιμέντο.



Εικόνα 1.4 Πεζοδρόμιο στα Βριλήσσια με φωτοκαταλυτικούς κυβόλιθους.



Εικόνα 1.5 Leopord II τούνελ στις Βρυξέλλες πριν και μετά την φωτοκαταλυτική επικάλυψη.

## 2.8 Φωτοκαταλυτική δράση δομικών υλικών

Ενώ υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση φωτοκαταλυτικών δομικών υλικών, η έλλειψη εξειδικευμένης γνώσης οδηγεί σε μία τυπική διαδικασία έρευνας και σύγκρισης μεταξύ των δομικών υλικών για τον έλεγχο της φωτοκαταλυτικής δράσης και την αποτελεσματικότητά τους.

Η σημασία της ετερογενούς φωτοκατάλυσης που εφαρμόζεται σε δομικά υλικά έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία. Ξεκινώντας, στον τομέα αυτόν, πρώτα με έρευνες πάνω στο γυαλί και στην συνέχεια σε άλλα οικοδομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, τα κεραμικά πλακίδια, το γύψο, τα κεραμίδια, τα στεγανωτικά, το τσιμέντο και την ασβεστοκονία . [Bertrand R. et al. , 2009 ]

Όσον αφορά στα τσιμεντοειδή υλικά, ειδικά αυτά που εκτίθενται σε εξωτερικές συνθήκες, είναι άμεσα και συνεχώς εκτεθειμένα σε πολλούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, μικροοργανισμούς και διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Ως

επί των πλείστων, έχουν μία ταχεία διαδικασία υποβάθμισης που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα, σε πολλές περιπτώσεις, σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες των υλικών, μεταξύ των οποίων και αισθητικές αλλοιώσεις. Το σχετικά υψηλό πορώδες και η τραχύτητα των τσιμεντοειδών υλικών καθώς και των υλικών σκυροδέματος, επιτρέπουν την εναπόθεση των οργανικών και ανόργανων ρύπων καθώς και των αιωρούμενων σωματιδίων. [Bertrand R. et al. , 2009 ]

Για να αποφευχθεί λοιπόν η οποιαδήποτε υποβάθμιση των δομικών υλικών, χρησιμοποιήθηκαν κοινές πρακτικές όπως η χρήση στεγανοποιητικών ή χημικών καθαριστικών, χωρίς όμως να φέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, επιτακτική ανάγκη αποτελεί η εφαρμογή καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον τσιμεντοειδών υλικών. Ωστόσο, λόγω των προαναφερθέντων οφελών τους, προϊόντα όπως το φωτοκαταλυτικό τσιμέντο, το αυτοκαθαριζόμενο επίχρισμα, οι φωτοκαταλυτικές πλάκες πεζοδρομίου έχουν εμφανιστεί στην παγκόσμια αγορά και ήδη απορροφώνται από τις αγορές του εξωτερικού. [ Betrand Ryot et al. , 2009 ]

Η εφαρμογή του διοξειδίου του τιτανίου σε υλικά με βάση το τσιμέντο, οδηγούν στην οξείδωση μιας σειράς από οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Καταλήγουμε λοιπόν, στο ότι το διοξείδιο του τιτανίου, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση του κύκλου ζωής των τσιμεντοειδών υλικών καθώς θα μπορούσε επίσης να μειώσει σημαντικά τη συγκέντρωση ορισμένων ρύπων στον αέρα. Ιδίως σε κλειστούς δημόσιους χώρους όπως σήραγγες ή χώρους στάθμευσης, αλλά και σε μολυσμένα ατμοσφαιρικά ανοικτούς χώρους, όπως αστικά κέντρα ή μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. [ Aurinen Joonas et al., 2008 ]

Πράγματι , με τον εμπλουτισμό της επιφάνειας των δομικών υλικών με διοξείδιο του τιτανίου, επιτυγχάνεται αντιμικροβιακή δράση, αυτοκαθαρισμός και καθαρισμός του αέρα από τους ρυπαντές του, εξαιτίας των ιδιοτήτων που αποκτούν τα υλικά κατασκευής. Το παραπάνω, φυσικά επαληθεύεται και αποδεικνύεται έπειτα από πολλές εργαστηριακές μελέτες πάνω στην απορρυπαντική επίδραση των φωτοκαταλυτικών δομικών υλικών. Παρακάτω, στον Πίνακα 1.1, αναφέρεται η γενική κατάταξη των δομικών υλικών που κατασκευάζονται με τη χρήση διοξειδίου του τιτανίου . [ Mahsa Heidari Dolatabadi , 2013]

**Πίνακας 1.1 Κατάταξη δομικών υλικών που περιέχουν διοξείδιο του τιτανίου**

<b>Κατηγορίες</b>	<b>Προϊόντα με Διοξείδιο του τιτανίου</b>	<b>Ιδιότητες των προϊόντων</b>
<b>Εσωτερικά υλικά κατασκευής</b>	Πλακάκια , ταπετσαρία , στόρια , χρώματα , επιστρώσεις δομικών υλικών	Αυτοκαθαριζόμενη λειτουργία
<b>Εξωτερικά υλικά κατασκευής</b>	Πλακάκια , γυαλί , πάνελ, τσιμέντο , ασβεστοκονίασμα, σκυρόδεμα	Αυτοκαθαριζόμενη και αντι-βακτηριακή λειτουργία
<b>Υλικά οδοποιίας</b>	Επιστρώσεις σε τοιχώματα σήραγγας , οδοστρώματα από τσιμέντο ή σκυρόδεμα , επιστρώσεις σε οδοφράγματα	Αυτοκαθαριζόμενη και αντι-βακτηριακή λειτουργία

Αναφέρεται ότι, σ' μία από τις τελευταίες ανασκοπήσεις της νανοτεχνολογίας υπάρχει μεγαλύτερη μείωση του ρύπου όταν η επιφάνεια των δομικών υλικών που είναι εμπλουτισμένη με το διοξείδιο του τιτανίου έχει υψηλή απορροφητικότητα ή πορώδες. [ Aurinen Joonas et al., 2008 ]

Οι περισσότερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως ως προς την φωτοκαταλυτική δράση των δομικών υλικών αφορούν τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) καθώς και τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) μέσα στις οποίες συγκαταλέγεται και η φορμαλδεΰδη η οποία μελετάται στην παρούσα ερευνητική εργασία. Έχει αποδειχθεί λοιπόν ότι οι παραπάνω ρύποι, σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μπορούν να οξειδωθούν από την χρήση διοξειδίου του τιτανίου υπό την υπεριώδη ακτινοβολία .

Πιο συγκεκριμένα, οι Maggos et al., μελέτησαν την απορρυπαντική αποτελεσματικότητα των χρωμάτων που περιέχουν διοξείδιο του τιτανίου σ' ένα κλειστό χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων με χρήση φωτοκαταλυτικών χρωμάτων στο πάνω μέρος του συγκεκριμένου χώρου. Συγκεκριμένα, το ταβάνι του χώρου ήταν ζωγραφισμένο με ένα λευκό ακρυλικό χρώμα που περιείχε διοξείδιο του τιτανίου. Γνωρίζοντας ότι ο χώρος ήταν αρκετά επιβαρυνμένος λόγω των καυσαερίων των αυτοκινήτων, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φωτοκαταλυτική οξείδωση των οξειδίων του αζώτου και των οργανικών πτητικών ενώσεων ήταν σημαντική. [ Maggos et al., 2007 ]

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ITC-CNR ως μέρος του έργου Picada (ευρωπαϊκό κοινοτικό έργο), ως προς

φωτοκαταλυτικές καινοτόμες επενδύσεις. Η έρευνα επικεντρώθηκε στην απορρύπανση του αέρα εσωτερικών χώρων, με χρήση τσιμεντοειδούς υλικού και χρήση εμπορικού διοξειδίου του τιτανίου. Η μέτρηση της φωτοκαταλυτικής δραστηριότητας και αποδόμησης προς το βενζόλιο, τουτόλιο και την φορμαλδεΐδη, μέσω ενός ειδικού αντιδραστήρα αλλά και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, διεξήγαγε σημαντικά αποτελέσματα. [ A. Strini et al . 2005 ]

Αξίζει επιπλέον να αναφερθεί άλλη μία έρευνα για την απομάκρυνση τουτολίου και φορμαλδεΐδης. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε υπό εργαστηριακές ελεγχόμενες συνθήκες από την ερευνητική ομάδα EnVOC του τμήματος οργανικής χημείας στο Πανεπιστήμιο της Γάνδης στο Βέλγιο. Για την υλοποίηση της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικά δομικά υλικά. Σε αυτά τοποθετήθηκε επίστρωση ενός από τα πιο εμπορικά και ικανοποιητικά για τις φωτοκαταλυτικές ικανότητες του, διοξειδία του τιτανίου, το Degussa P-25. Σύμφωνα με την έρευνα τα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν έχοντας την επίστρωση του διοξειδίου του τιτανίου υπό την επίδραση UV-A ακτινοβολίας, παρουσιάστηκαν ως αξιόλογοι φωτοκαταλυτικοί αποδομητές. [Kristof Demeestre et al., 2006 ]

Επιπρόσθετα, σημαντική ήταν η έρευνα πάνω στην φωτοαποικοδόμηση της φορμαλδεΐδης από φωτοκαταλύτη διοξειδίου του τιτανίου υπό την παρουσία οξειδίων του αζώτου, τουτολίου και πτητικών οργανικών ενώσεων, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο του Χονγκ Κονγκ στο τμήμα Πολιτικών και Δομικών Μηχανικών. Η συγκεκριμένη έρευνα έδωσε μεγάλη σημασία στους παράγοντες που μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην φωτοαποδόμηση ενός ρύπου. Ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες αναδείχθηκε η υγρασία. [ Ao C. H. et al. , 2004 ]

Παρατηρώντας την κατάλυση της φορμαλδεΐδης, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες για την αποδόμηση της , όταν βρίσκεται είτε σε αέρια είτε σε υδάτινη φάση . Στο πανεπιστήμιο του Νανσί στην Γαλλία υλοποιήθηκε μία έρευνα ως προς την υδάτινη φάση της φορμαλδεΐδης. Σε αυτή τη μελέτη η φορμαλδεΐδη αποικοδομείται σε ένα φωτοκαταλυτικό αντιδραστήρα από γυαλί το οποίο είναι επικαλυμμένο με διοξείδιο του τιτανίου. Ο αντιδραστήρας φωτίζεται με UV-A και τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο διασποράς που δημιουργήθηκε από την ερευνητική ομάδα με χημική αντίδραση ελέγχθηκε υπό διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και ρυθμού ροής, καθώς τα αποτελέσματα έδειξαν

ότι ο σταθερής κλίνης φωτοκαταλυτικός αντιδραστήρας καταλύει αποτελεσματικά την φορμαλδεΐδη σε υδατικό διάλυμα. [A . Cloteaux et al . , 2014 ]

Μία ακόμα έρευνα για την αέρια φορμαλδεΐδη πραγματοποιήθηκε έπειτα από την κατασκευή ενός φύλλου με σύνθεση διοξειδίου του τιτανίου και ζεόλιθο με μία ειδική τεχνική κατασκευής φύλλων για τοίχους , τις λεγόμενες ταπετσαρίες . Έπειτα από διαδοχικά πειράματα βρέθηκε ότι για την απομάκρυνση του τουτολίου, η βέλτιστη αναλογία διοξειδίου του τιτανίου προς τον ζεόλιθο είναι 1 : 4 , ενώ για τη φορμαλδεΐδη δε βρέθηκε βέλτιστη σύνθεση λόγω της υψηλής προσρόφησης της φορμαλδεΐδης στο ζεόλιθο. Η έρευνα θεωρήθηκε αποτελεσματική διεξάγοντας το συμπέρασμα ότι πρέπει να γίνεται χρήση τέτοιων ειδικών φύλλων στους τοίχους για την απομάκρυνση των ρύπων εσωτερικών χώρων. [ Ichiura H. et al . , 2003 ]

Πολλές εργαστηριακές μελέτες έχουν αποδείξει την επίδραση της χρήσης φωτοκαταλυτικών δομικών υλικών στην απορρύπανση του αέρα. Παρά όμως το γεγονός ότι τα πειράματα και οι έρευνες είναι ενθαρρυντικά και δίνουν αξιόλογα αποτελέσματα, ο αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων απαιτεί συστηματική έρευνα ώστε να είμαστε σε θέση για περαιτέρω πιλοτικές εφαρμογές της φωτοκαταλυτικής δράσης στο δομημένο περιβάλλον.

Παρατηρούμε επίσης ότι στις περισσότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα της χρήση φωτοκαταλυτικών δομικών υλικών για την απορρύπανση των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως το τσιμέντο, καθώς και το σκυρόδεμα. Τα δύο αυτά υλικά, σε εργαστηριακή αλλά και πιλοτική κλίμακα, μας έχουν δώσει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα σε συνδυασμό πάντα με τον κατάλληλο ημιαγωγό. Αναλύοντας επομένως τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, θα είμαστε ένα βήμα πιο κοντά στον ισχυρισμό της αποτελεσματικότητας, του τσιμέντου ως φωτοκαταλυτικό υλικό σε σχέση με την ασβεστοκονία και το τσιμεντόχρωμα, καθώς και με ποιο σε συνδυασμό με ποιό από τα δύο διοξείδια του τιτανίου που χρησιμοποιήσαμε .

### **3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

Το πειραματικό μέρος της εργασίας και η μεθοδολογία της έρευνας αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια :

- 1) Την διάταξη του πειράματος
- 2) Την πειραματική διαδικασία
- 3) Την ανάλυση των αποτελεσμάτων
- 4) Τα συμπεράσματα των πειραματικών αποτελεσμάτων

Σκοπός της παρούσας εργαστηριακής μελέτης των υλικών, αποτελεί ο προσδιορισμός της επίδρασης, του είδους και της ποσότητας του διοξειδίου του τιτανίου αλλά και της χημικής σύνθεσης του υλικού, ως προς τη φωτοκαταλυτική τους ικανότητα. Η ικανότητα αυτή παρατηρείται σε συγκεκριμένα χρονικά στάδια καθώς προσδιορίζει την αποδόμηση του ρύπου της φορμαλδεΐδης σε αέρια φάση.

#### **3.1 Πειραματική διαδικασία**

Η εκπόνηση των πειραμάτων έλαβε χώρα σε ένα κλειστού τύπου θάλαμο. Η αρχή μέτρησης της φωτοκαταλυτικής ικανότητας του δομικού υλικού βασίζεται στην απώλεια του ρύπου κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης του δείγματος μέσω ειδικά τοποθετημένων λαμπτήρων UV .

Τα πειράματα έλαβαν χώρα σ' ένα κλειστό θάλαμο από γυαλί όγκου 5,5 λίτρων ο οποίος περιεχόταν σε κλειστό ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο από αλουμίνιο όγκου 125 λίτρων. Ο τελευταίος παρουσιάζεται εξοπλισμένος με οκτώ λαμπτήρες ακτινοβολίας UV καθώς και δύο ανεμιστήρες , για την όσο το δυνατόν ομαλότερη διατήρηση του θαλάμου σε σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος και την αποφυγή κάποιας ιδιαίτερης υπερθέρμανσης.



Η αρχική σκέψη περιελάμβανε το γυάλινο θάλαμο που χρησιμοποιήθηκε, να λειτουργεί σε δυναμική κατάσταση, δηλαδή κατά την διάρκεια των πειραμάτων να υπάρχει ροή αέρα και συνεχή ανατροφοδότηση ρύπου. Όμως, λόγω τεχνικών προβλημάτων, χρησιμοποιήσαμε διάλυμα φορμαλδεΐδης, δηλαδή φορμαλδεΐδη σε υγρή μορφή, αναμεμιγμένη με απιονισμένο νερό. Έτσι, ο πειραματικός θάλαμος λειτούργησε σε στατική κατάσταση δηλαδή χωρίς ροή αέρα.

Για τις διαδοχικές πειραματικές μετρήσεις της έρευνας, χρησιμοποιήθηκε ένας ειδικός ανιχνευτής αέριας φορμαλδεΐδης, και συγκεκριμένα, ο FP-30 της εταιρίας RIKEN KEIKI. Πρόκειται για έναν ιδιαίτερα ευαίσθητο φορητό ανιχνευτή αέριας φορμαλδεΐδης. Η ταχύτητα απορόφησης του δείγματος ελεγχόταν από ένα μικροεπεξεργαστή. Ο ανιχνευτής FP-30 είχε μία άμεση ένδειξη της τιμής μέτρησης σε μία οθόνη LCD, καθώς μπορεί να ανιχνεύσει την φορμαλδεΐδη στον αέριο περιβάλλοντα χώρο όταν βρίσκεται σε όριο συγκέντρωσης από 0,01 ppm έως 1 ppm.

Ως προς τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου ανιχνευτή γνωρίζουμε ότι έχει δύο εντολές. Η πρώτη, μεγαλύτερης διάρκειας μέτρησης, η οποία έχει συγκεκριμένη λειτουργία για 1800 δευτερόλεπτα ( 30 λεπτά ) αφορά μετρήσεις περιβάλλοντα αέρα με επίπεδα φορμαλδεΐδης από 0 έως 0,4 ppm με ακρίβεια σημαντικών ψηφίων 0,001. Ενώ η δεύτερη, μικρότερης διάρκειας μέτρησης, έχει συγκεκριμένη λειτουργία για 900 δευτερόλεπτα (15 λεπτά) και αφορά μετρήσεις περιβάλλοντα αέρα με επίπεδα φορμαλδεΐδης από 0 έως 1,0 ppm με ακρίβεια σημαντικών ψηφίων 0,01. Ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων, ο κατασκευαστής δίνει σφάλμα της τάξεως του +/- 10 %.

Ως προς τα χαρακτηριστικά του οργάνου, ο κατασκευαστής συνοψίζει τα βασικά στοιχεία του, στα εξής:

- Απλή λειτουργία .
- Ανιχνευτής ειδικά και μόνο για φορμαλδεΐδη .
- Ενσωματωμένη αντλία δειγματοληψίας .
- Αυτο-διάγνωση οργάνου .
- Χρησιμοποιεί φωτοηλεκτρική – φωτομετρική τεχνολογία για την ανίχνευση της ποσότητας της φορμαλδεΐδης μέσω των ειδικών φίλτρων του οργάνου .
- Άμεση ψηφιακή ανάγνωση .



- Δεν δημιουργούνται ψευδή στοιχεία για την φορμαλδεΐδη από την παρέμβαση άλλων αερίων στο χώρο .
- Λειτουργία με 4 αλκαλικές μπαταρίες AA .
- Αποθηκεύει μέχρι 99 μετρήσεις .
- Δεν χρειάζεται χρόνο προθέρμανσης για να λειτουργήσει .



Εικόνα 3.1 Ανιχνευτής φορμαλδεΐδης FP - 30 και βασικά μέρη του οργάνου.



Εικόνα 3.2 Ανιχνευτής φορμαλδεΐδης FP – 30 κατά την διάρκεια μέτρησης στο εργαστήριο του ΙΤΕ.

Σημειώνεται ότι η λειτουργία του οργάνου είναι εφικτή μόνο με τα ειδικά διαμορφωμένα φίλτρα φορμαλδεΐδης που προορίζονται για το συγκεκριμένο και μόνο όργανο . Τα παραπάνω φίλτρα πρέπει να διατηρούνται σε θερμοκρασίες μεταξύ 3 και 10 °C .



Εικόνα 3.3 Χρησιμοποιημένα φίλτρα ανιχνευτή φορμαλδεΐδης FP – 30 στο εργαστήριο του ΙΤΕ.



Εικόνα 3.4 Φίλτρα ανιχνευτή φορμαλδεΐδης FP-30 στο ψυγείο του εργαστηρίου του ΙΤΕ για την ασφαλή διατήρησή τους.

Όσον αφορά το διάλυμα φορμαλδεϋδης και απιονισμένου νερού, η παρασκευή του έγινε αφότου ο γυάλινος θάλαμος ήταν σωστά τοποθετημένος μέσα στον αλουμινένιο θάλαμο και όλα τα σωληνάκια ήταν σωστά συνδεδεμένα χωρίς να υπάρχει καμία διαρροή μεταξύ των θαλάμων και του ανιχνευτή φορμαλδεϋδης.

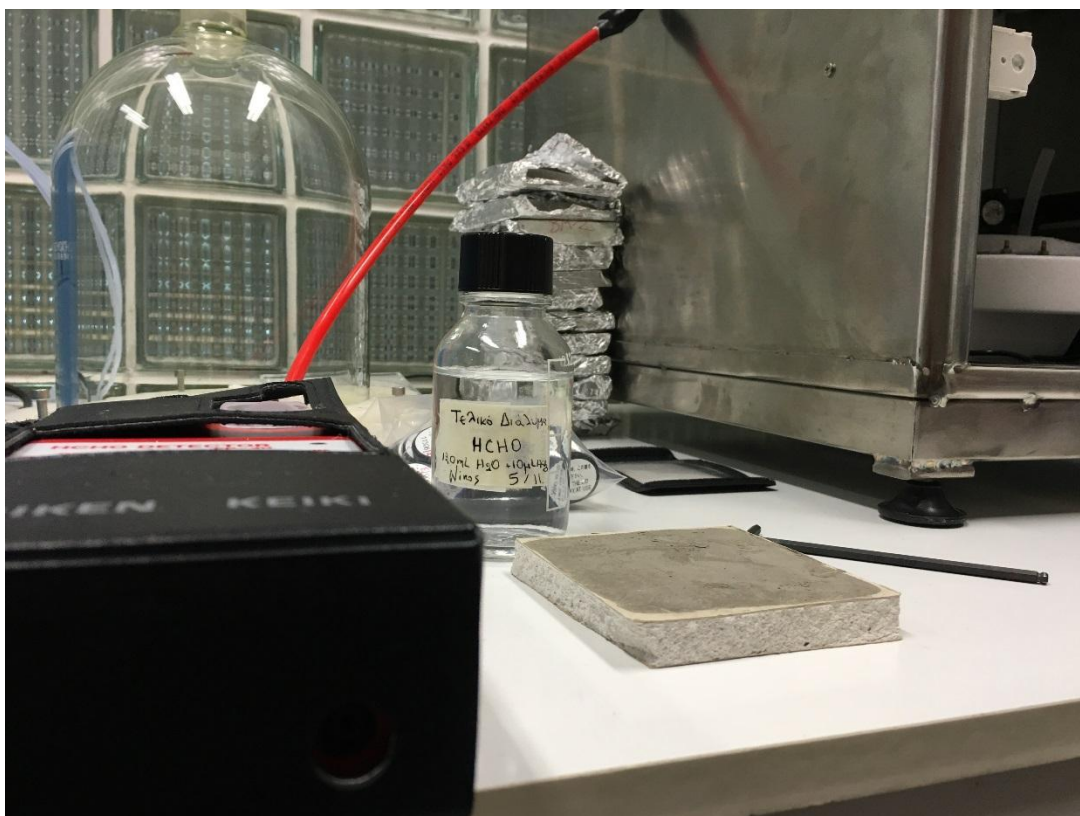
Για την παρασκευή του τελικού διαλύματος φορμαλδεϋδης, πραγματοποιήθηκαν αρκετές μετρήσεις διότι το όργανο όπως προαναφέρθηκε παραπάνω μετράει μέχρι 1 ppm. Ο βασικός όμως λόγος αφορούσε την άγνοια ως προς την αρχική ποσότητα, σε  $\mu\text{L}$ , υγρής φορμαλδεϋδης που χρειάζεται να διαλυθούν σε απιονισμένο νερό, ώστε το τελικό διάλυμα, έπειτα από την εξάτμιση μιας συγκεκριμένης ποσότητας μέσα στο θάλαμο, να έχει συγκέντρωση στον εσωτερικό αέρα μικρότερη από 1 ppm. Τέλος επιβάλλεται να γίνει αναφορά της επικινδυνότητας ως προς ερεθισμούς στα μάτια και την μύτη για τα άτομα του εργαστηρίου, καθώς αναφέρεται ότι η φορμαλδεϋδη είναι ιδιαίτερα τοξική για τον άνθρωπο αλλά και για το περιβάλλον.

Έτσι, έπειτα από διαδοχικές μετρήσεις ξεκινώντας από τα πιο αραιά διαλύματα, για την αποφυγή κάποιου δυσάρεστου συμβάντος, καταλήξαμε ότι το κατάλληλο διάλυμα ώστε μετά την εξάτμιση 10  $\mu\text{L}$  υγρού διαλύματος να μας αποδοθεί στο θάλαμο έως 1 ppm αέριας φορμαλδεϋδης, είναι το διάλυμα το οποίο περιέχει 10  $\mu\text{L}$  φορμαλδεϋδης 37 w/v % διαλυμένα σε 120 mL νερού. Η ποσότητα διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε για την κάθε μέτρηση επιλέχθηκε να είναι τα 10  $\mu\text{L}$ .

Για τον ακριβή προσδιορισμό τόσο μικρών υγρών ποσοτήτων χρησιμοποιήθηκε από το εργαστήριο του ΙΤΕ, μία ειδική μικροπιπέτα, η οποία έχει την ευχέρεια να διαλέγει με απόλυτη ακρίβεια τα  $\mu\text{L}$ . Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη μικροπιπέτα, χρησιμοποιείται ανάλογα με την προσωπική ρύθμιση του χειριστή στο πεδίο των  $\mu\text{L}$  για την διαλογή από 1  $\mu\text{L}$  μέχρι 100  $\mu\text{L}$  με απόλυτη ακρίβεια.

Έτσι, αξιοποιώντας το παραπάνω εργαστηριακό όργανο ως αρωγό στη διαδικασία, παρασκευάστηκε το κατάλληλο διάλυμα φορμαλδεϋδης και επιλέχθηκε η ποσότητα των 10  $\mu\text{L}$  διαλύματος για την πραγματοποίηση της έρευνας, η οποία διαδραματίστηκε με σταθερή ρύθμιση της μικροπιπέτας στα 10  $\mu\text{L}$  διαλύματος.





Εικόνα 3.5 Τελικό διάλυμα φορμαλδεΰδης στο εργαστήριο του ΙΤΕ .



Εικόνα 3.6 Μικροπιπέτα εργαστηρίου ΙΤΕ ρυθμισμένη στα 10  $\mu$ L .

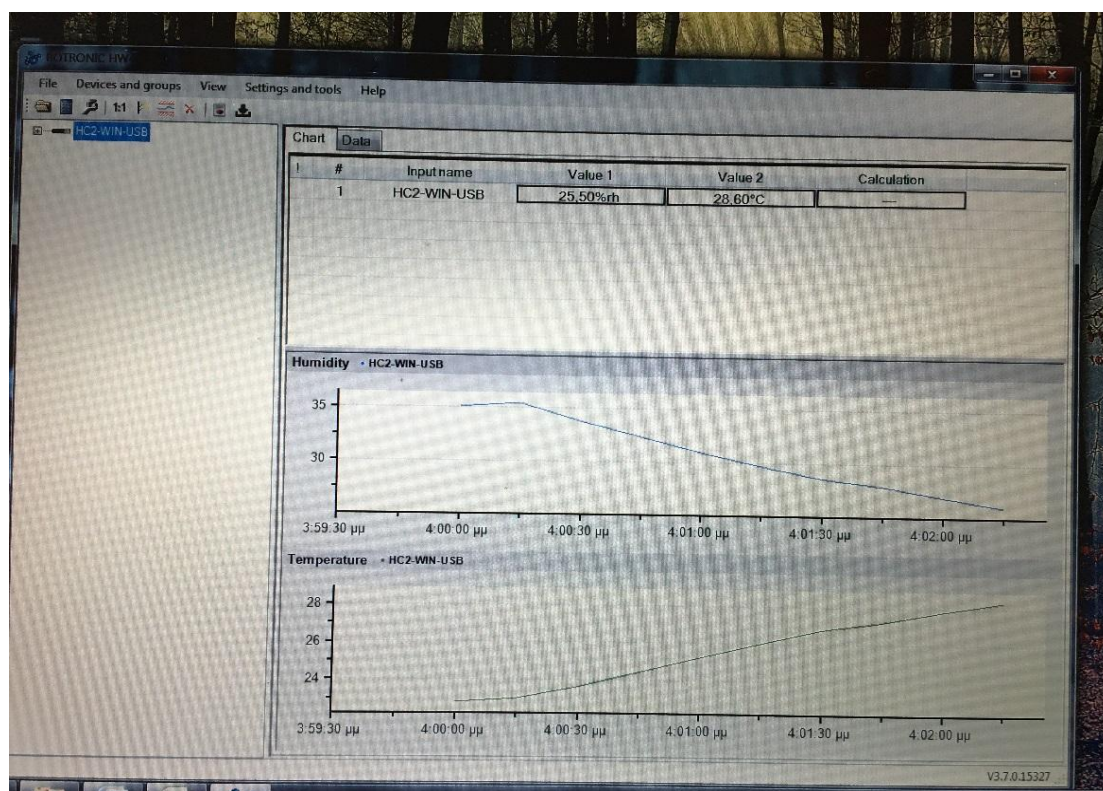
Έπειτα, εφόσον το κατάλληλο διάλυμα φορμαλδεΐδης παρασκευάστηκε και ο ειδικός θάλαμος είχε διαμορφωθεί κατάλληλα, έγιναν τα αρχικά πειράματα σε πραγματικό χρόνο μέτρησης. Η πρώτη μέτρηση ολοκληρώθηκε με επιτυχία, αφού πραγματοποιήθηκαν και επαναλήψεις για τυχόν σφάλματα, χωρίς δομικό υλικό αλλά και χωρίς ανοικτές λάμπες. Ουσιαστικά αυτή θεωρείται η τυφλή ή blank μέτρηση του πειράματος.

Για την ορθή πειραματική διαδικασία κατά την διάρκεια όλων των πειραμάτων η θερμοκρασία και η υγρασία του εργαστηριακού περιβάλλοντος ήταν σχεδόν σταθερές με την βοήθεια κλιματισμού. Επίσης, επαναλήψεις πραγματοποιήθηκαν στις μετρήσεις για τη θερμοκρασία και την υγρασία του πειραματικού θαλάμου, για την αποφυγή σφάλματος λόγω αυτών των δύο παραγόντων. Η παραπάνω μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια ενός εργαστηριακού ευαίσθητου και ακριβή οργάνου το οποίο αποδεικνύει σύμφωνα με τις μετρήσεις του την σχεδόν σταθερή θερμοκρασία και υγρασία του θαλάμου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης των πειραμάτων.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της υγρασίας και της θερμοκρασίας ονομάζεται HC2-WIN-USB. Πρόκειται για έναν εξαιρετικό ανιχνευτή USB ο οποίος καταγράφει μετρήσεις σχετικά με την υγρασία και τη θερμοκρασία. Ο ίδιος αποθηκεύει και παρουσιάζει κατευθείαν τα αποτελέσματα μέσω του αντίστοιχου λογισμικού του.



Εικόνα 3.7 Ανιχνευτής θερμοκρασίας και υγρασίας HC2-WIN-USB.



Εικόνα 3.8 Λογισμικό HC2-WIN-USB .

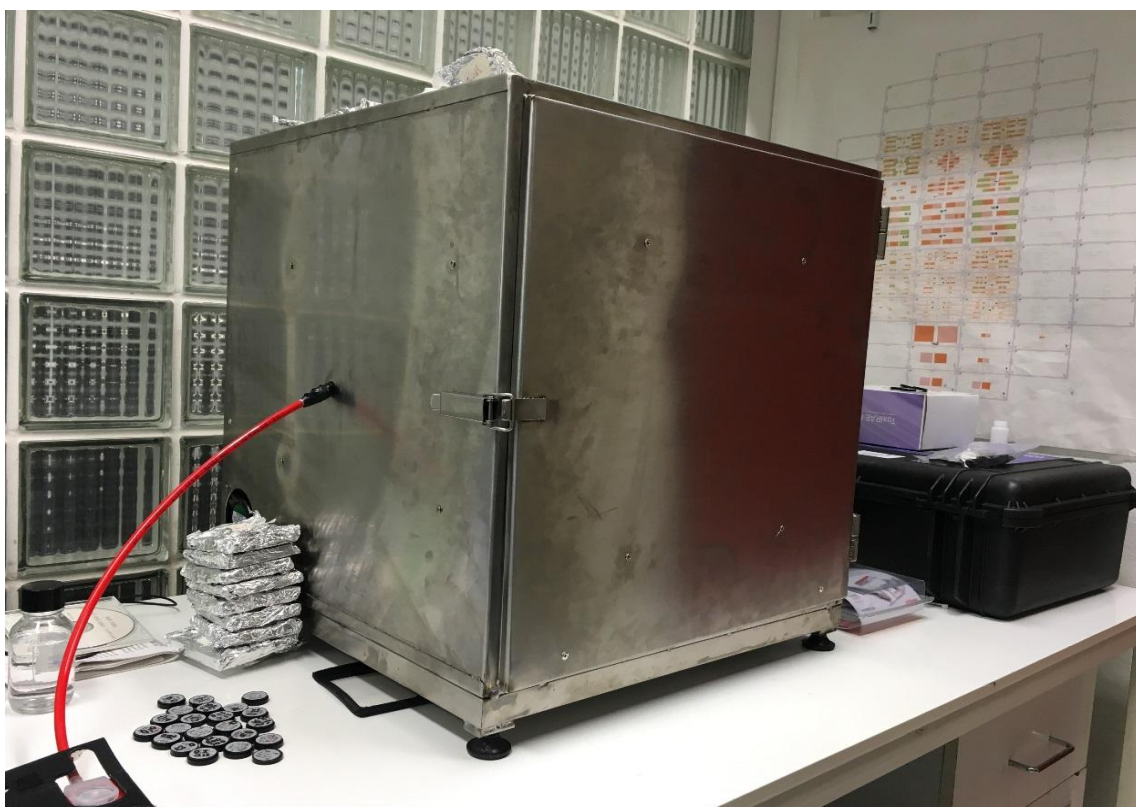
Οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν διότι όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο της έρευνας, οι παράγοντες της θερμοκρασίας και της υγρασίας επηρεάζουν άρδην τις περισσότερες φορές αρνητικά- την φωτοκαταλυτική δράση των δομικών υλικών .

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το εσωτερικό του θαλάμου, αυτός ήταν εξοπλισμένος με 10 λαμπτήρες ακτινοβολίας UV της εταιρίας PHILIPS, τύπου φθορίου T8 με ισχύς 15 Watt, έκαστος. Στο εσωτερικού του γυάλινου θαλάμου εγκαταστάθηκε ανεμιστήρας προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης ανάμειξη του ρύπου στο θάλαμο καθώς και η μέγιστη δυνατή επαφή ρύπου και επιφάνειας υλικού. Επίσης, διαμορφώθηκε κατάλληλα ο χώρος για την υποδοχή του εκάστοτε δομικού υλικού, την υποδοχή μιας κυψελίδας στην οποία θα αφήνεται το υγρό διάλυμα με την προοπτική να γίνει αέριος ρύπος φορμαλδεΐδης, καθώς και μία υποδοχή για το σωληνάκι το οποίο είναι συνδεδεμένο με τον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης. Η βάση του γυάλινου θαλάμου επιλέχθηκε, βάσει της σταθερότητας που προσδίδει στο πείραμα αλλά και λόγω της κατασκευαστικής του ευχέρειας, καθώς διευκόλυνε το άνοιγμα για το πέρασμα ως προς το σωληνάκι αλλά και των καλωδίων για το ανεμιστηράκι.

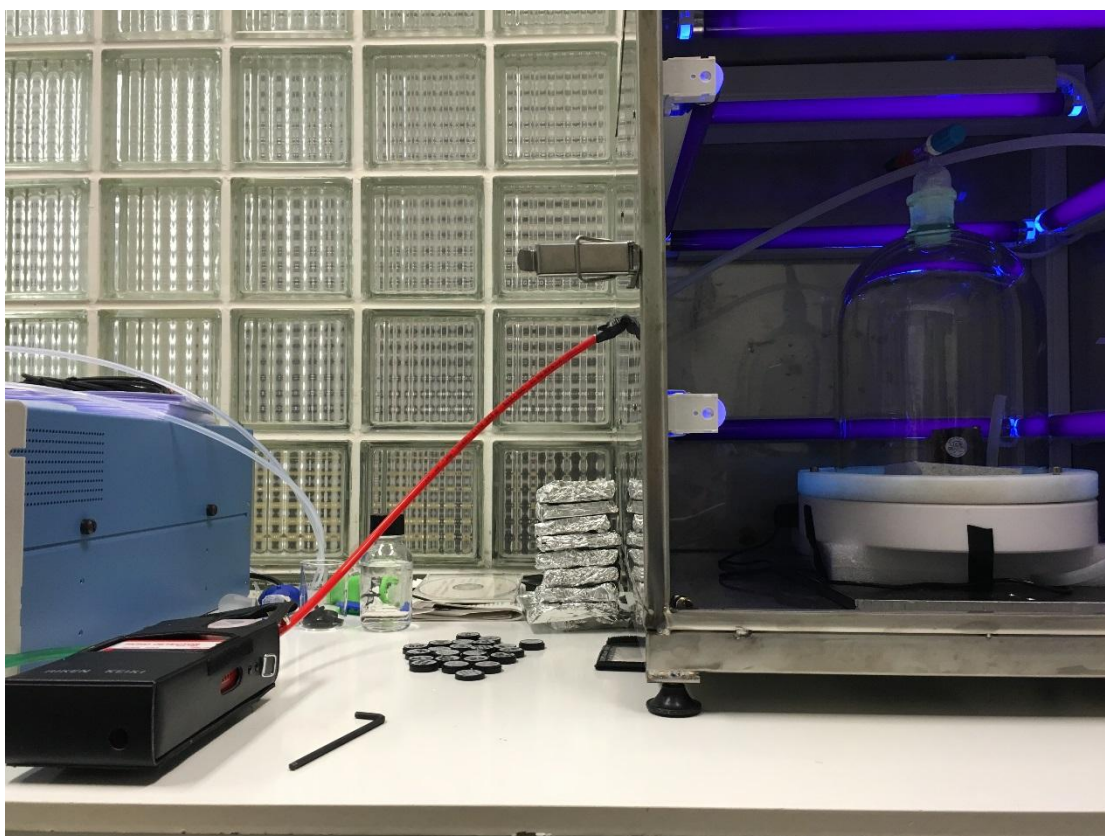




Εικόνα 3.9 Εσωτερικό γυάλινου θαλάμου.



Εικόνα 3.10 Κλειστός εξωτερικός αλουμινένιος θάλαμος συνδεδεμένος με τον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης.



Εικόνα 3.11 Πειραματική απεικόνιση θαλάμου κατά τη διάρκεια πραγματικής μέτρησης με ενεργοποιημένους τους UV λαμπτήρες και τον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης.

Ως προς την περαιτέρω ανάλυση του πειραματικού σκέλους, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν βάσει συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων και κάτω από συνθήκες εργαστηριακού περιβάλλοντος. Δηλαδή, κατά την διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης μέτρησης για ένα δομικό υλικό, διαδραματίζονταν περαιτέρω υπομετρήσεις σε συγκεκριμένα χρονικά διάστημα και κάτω από την UV ακτινοβολία η οποία ενεργοποιούταν όταν παίρναμε την πρώτη μέτρηση.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε δομικό υλικό και για κάθε ολοκληρωμένη μέτρηση της έρευνας, πραγματοποιείται η εξής πειραματική διαδικασία:

- Τοποθέτηση δομικού υλικού μέσα στον γυάλινο θάλαμο.
- Τοποθέτηση υγρού διαλύματος φορμαλδεΐδης μέσα στην ειδική κυψελίδα.
- Γρήγορο κλείσιμο και σφράγισμα γυάλινου θαλάμου και ενεργοποίηση για το εσωτερικό ανεμιστηράκι.
- Σφράγισμα του διαλύματος ώστε να μην παίρνει καθόλου αέρα , γνωρίζοντας ότι φορμαλδεΐδη είναι εξαιρετική πτητική.



- Αναμονή έως ότου το διάλυμα γίνει εξ ολοκλήρου αέριος ρύπος , με μέσο χρόνο τα 35 λεπτά . (το εσωτερικό ανεμιστηράκι βοηθάει στην γρήγορη εξάτμιση του ρύπου , καθώς δημιουργεί ροή αέρα)
- Ολοκλήρωση εξάτμισης διαλύματος.
- Έναρξη πρώτης μέτρησης για 15 λεπτά με σβηστούς λαμπτήρες.
- Δεχόμαστε σαν χρόνο μηδέν την στιγμή που εμφανίζεται η πρώτη μέτρηση συγκέντρωσης με κλειστούς λαμπτήρες UV στον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης και την συγκεκριμένη χρονική στιγμή ανοίγουν οι λαμπτήρες και οι εξωτερικοί ανεμιστήρες του αλουμινένιου θαλάμου.
- Η επόμενη μέτρηση λαμβάνει χρόνο στο δέκατο πέμπτο λεπτό της διαδικασίας του πειράματος και τελειώνει όταν το χρονόμετρο έχει ένδειξη 30 λεπτά .
- Όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν δεκαπεντάλεπτες μετρήσεις του ανιχνευτή με ενδιάμεσα μεταξύ τους διαλλείματα 15 λεπτών.
- Ουσιαστικά , μία ολοκληρωμένη μέτρηση , αφορά 5 υπομετρήσεις για το κάθε δομικό υλικό (μία κάθε 30 λεπτά) ξεκινώντας με την πρώτη για χρόνο ίσο με το μηδέν και τελειώνοντας την πέμπτη για χρόνο ίσο με 2 ώρες .
- Σημειώνεται ότι από την χρονική στιγμή μηδέν έως την χρονική στιγμή δύο ώρες, οι λαμπτήρες UV λειτουργούν .
- Τέλος , καταγράφοντας όλες τις μετρήσεις , ανοίγεται προσεκτικά ο θάλαμος , εφόσον έχει φορεθεί ο κατάλληλος εξοπλισμός από τα εργαστηριακά μέλη ( γάντια , μάσκα ). Ο γυάλινος θάλαμος καθαρίζεται εξ ολοκλήρου και με απόλυτη προσοχή ώστε να είναι έτοιμος προς χρήση για το επόμενο δομικό υλικό.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα.



Εικόνα 3.12 Ηλεκτρολογικός πίνακας ελέγχου αλουμινένιου εξωτερικού θαλάμου.



Εικόνα 3.13 Ολοκλήρωση πειραματικής διαδικασίας : χρησιμοποιημένα φίλτρα , δομικά υλικά , γυάλινος και αλουμινένιος θάλαμος με ξεκάθαρη συνδεσμολογία, ανιχνευτής φορμαλδεΰδης συνδεδεμένος με τον θάλαμο με το κόκκινο καλώδιο, ενώ το πράσινο καλώδιο συνδέεται με τον απαγωγό αερίων του εργαστηρίου.



Εικόνα 3.14 Εργαστηριακός εξοπλισμός ( μάσκα και γάντια ) για την αποφυγή τυχόν ατυχήματος .

Στην συνέχεια, παρατηρούνται τα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα. Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν επιστρωμένα πάνω σε κομμάτια γυψοσανίδας και είχαν βάση το τσιμέντο , την ασβεστοκονία και το τσιμεντόχρωμα.

Παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα όλα τα υπό μελέτη υλικά.

**Πίνακας 3.1 Υπό μελέτη δομικά υλικά εργαστηριακής έρευνας**

Κωδικός Δείγματος	Δομικό Υλικό	Διοξείδιο του Τιτανίου ( % vol )	Είδος Διοξειδίου του τιτανίου
<b>BM_3</b>	Ασβεστοκονία	2	TCM
<b>BM_9</b>	Ασβεστοκονία	2	P – 25
<b>BM_73</b>	Ασβεστοκονία	-	-
<b>BM_76</b>	-	100	TCM
<b>BM_51</b>	Τσιμέντο	2	TCM
<b>BM_57</b>	Τσιμέντο	2	P – 25
<b>BM_75</b>	Τσιμέντο	-	-
<b>BM_27</b>	Τσιμεντόχρωμα	2	TCM
<b>BM_33</b>	Τσιμεντόχρωμα	2	P – 25
<b>BM_74</b>	Τσιμεντόχρωμα	-	-
<b>BM_1</b>	Ασβεστοκονία	0,2	TCM
<b>BM_2</b>	Ασβεστοκονία	1	TCM
<b>BM_6</b>	Ασβεστοκονία	0,2	TCM



Όπως παρατηρείται επιλέχθηκαν κάποια υλικά τα οποία είτε έχουν 100 % στρώση νανοϋλικού, διοξειδίου του τιτανίου πάνω στην γυψοσανίδα, είτε δεν έχουν καμία επίστρωση νανοϋλικού και υπάρχει μόνο δομικό υλικό επιστρωμένο πάνω στην γυψοσανίδα.

Επισημάνεται ότι η αναφορά στο είδος του διοξειδίου του τιτανίου νοείται για δύο διαφορετικά είδη τιτανίας. Το TCM το οποίο παρασκευάστηκε στο εργαστήριο του ΙΤΕ, και το P-25 το οποίο θεωρείται μία από τις καλύτερες εμπορικές τιτανίες όσον αφορά τον τομέα της φωτοκαταλυτικής δράσης δομικών υλικών.

Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις όλων των πάνελ των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 8 cm x 10 cm πλάτος επί μήκος και πάχος 1 cm .



Εικόνα 3.15 Φωτογράφιση του φοιτητή Τριγώνη Νικόλαου , με την υποψήφια Διδάκτορα Δήμητρα Παπαδάκη κρατώντας δύο τυχαία πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της έρευνας.

### **3.2 Λειτουργία Θαλάμου - Συμπεριφορά Φορμαλδεΐδης - Αρχικές Συνθήκες**

Ο αέριος ρύπος, ο οποίος διοχετεύεται μέσα στον περιβαλλοντικό γυάλινο θάλαμο, είναι δυνατόν να απομακρυνθεί με τέσσερις μηχανισμούς:

- 1) Προσρόφηση από τα τοιχώματα του θαλάμου.
- 2) Φωτοδιάσπαση από την ακτινοβολία.
- 3) Προσρόφηση στην επιφάνεια του υλικού.
- 4) Φωτοκαταλυτική αποδόμηση από το διοξείδιο του τιτανίου που εμπεριέχει το υπό μελέτη υλικό.

Είναι φανερό ότι προκειμένου να υπολογιστεί το ποσοστό απομάκρυνσης του ρύπου λόγω φωτοκαταλυτικής επίδρασης του δομικού υλικού, δηλαδή βάση του μηχανισμού 4, πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι παράπλευρες απώλειες του ρύπου, δηλαδή οι μηχανισμοί 1,2,3.

Ουσιαστικά, με σκοπό παρατήρησης τον μηχανισμό 4, δηλαδή παρατήρησης της φωτοκαταλυτικής αποδόμησης από το διοξείδιο του τιτανίου που εμπεριέχει κάθε δομικό υλικό που επιλέχθηκε για την έρευνα, πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε πειραματικά τους πρώτους τρεις μηχανισμούς. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τους τρεις πρώτους μηχανισμούς αφορούσαν την συγκέντρωση φορμαλδεΐδης στο γυάλινο θάλαμο.

Για το πρώτο πείραμα σκοπός είναι ο προσδιορισμός του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τα τοιχώματα του θαλάμου. Για το λόγο αυτό διοχετεύεται στο θάλαμο υγρό διάλυμα φορμαλδεΐδης και ακολουθείται προσεκτικά η πειραματική διαδικασία, όπως καταγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για τα δομικά υλικά με εξαίρεση το μέρος που ενεργοποιείται η λειτουργία των UV λαμπτήρων. Μέσα στο γυάλινο θάλαμο δεν υπάρχει δομικό υλικό, ούτε ακτινοβολία, άρα η μόνη αιτία απομάκρυνσης του ρύπου είναι η απορρόφηση του από τα τοιχώματα του θαλάμου.

Για το δεύτερο πείραμα σκοπός είναι ο προσδιορισμός του ποσοστού φωτόλυσης του ρύπου από την επίδραση της ακτινοβολίας UV. Για το σκοπό αυτό διοχετεύεται στο θάλαμο υγρό διάλυμα φορμαλδεΐδης και ακολουθείται προσεκτικά η πειραματική διαδικασία όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για τα

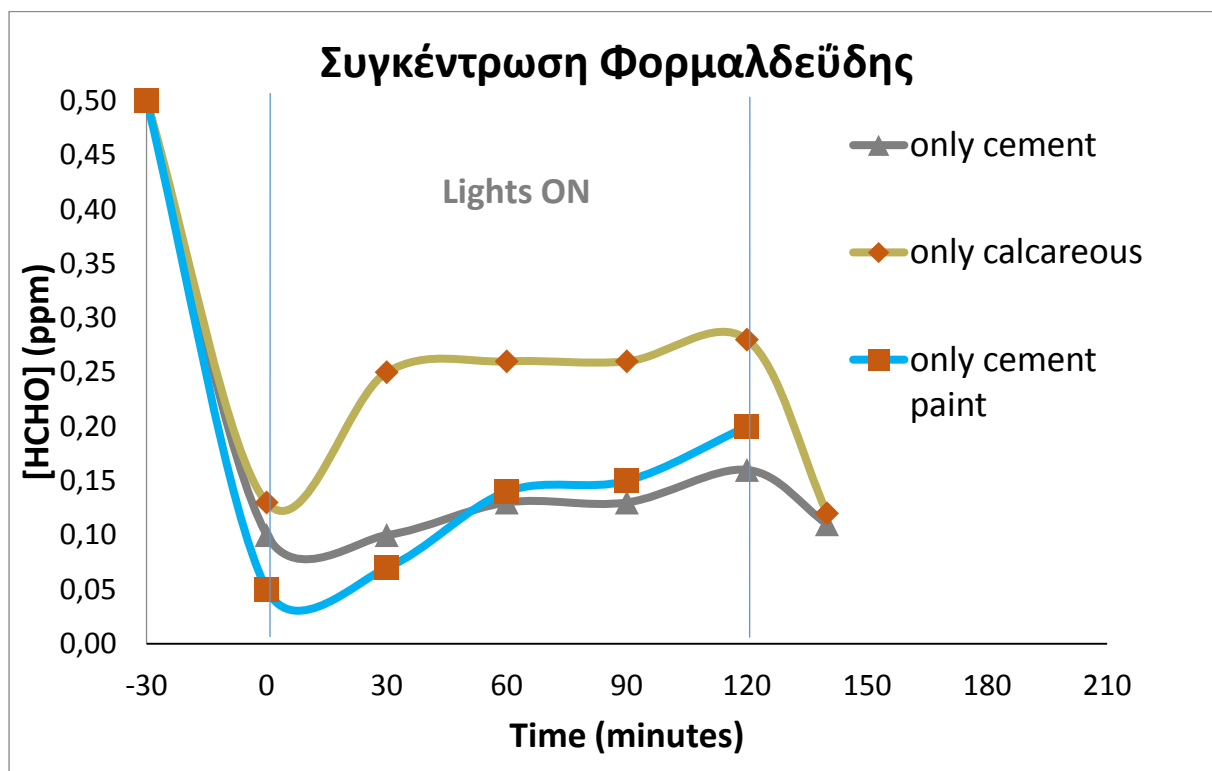
δομικά υλικά. Μέσα στο θάλαμο δεν υπάρχει δομικό υλικό, άρα οι αιτίες ελάττωσης της συγκέντρωσης του ρύπου είναι η απορρόφηση από τα τοιχώματα του θαλάμου καθώς και η απευθείας τυχόν φωτόλυση του από την επίδραση της ακτινοβολίας. Στο δεύτερο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, παρατηρείται συνδυασμός των μηχανισμών 1 και 2.

Για το τρίτο πείραμα σκοπός είναι ο προσδιορισμός του ποσοστού προσρόφησης του ρύπου στην επιφάνεια του προς μελέτη τυχαίου δομικού υλικού. Στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε δομικό υλικό ασβεστοκονίας χωρίς πρόσμιξη με διοξείδιο του τιτανίου. Για τον σκοπό αυτό διοχετεύεται στο θάλαμο υγρό διάλυμα φορμαλδεϋδης και ακολουθείται προσεκτικά η πειραματική διαδικασία όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για τα δομικά υλικά. Η προσρόφηση του αέριου ρύπου της φορμαλδεϋδης στα τοιχώματα του γυάλινου θαλάμου καθώς και στην επιφάνεια του δομικού υλικού αποτελούν αιτίες αλλαγής συγκέντρωσης του ρύπου κατά την διάρκεια του πειράματος. Στο τρίτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, παρατηρείται συνδυασμός των μηχανισμών 1, 2 και 3.

Έχοντας υπολογίσει τα πειράματα 1, 2 και 3, δηλαδή τους παράπλευρους μηχανισμούς αλλαγής συγκέντρωσης του ρύπου είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την τυχόν φωτοκαταλυτική αποδόμηση του ρύπου της φορμαλδεϋδης από τα προς μελέτη δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν υπό την επίδραση του διοξειδίου του τιτανίου.

Αναλυτικότερα, οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι αρχικές συνθήκες του εσωτερικού γυάλινου θαλάμου, καθώς και για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της φορμαλδεϋδης σε σχέση με την λειτουργία του θαλάμου. Παρακάτω απεικονίζεται το ποσοτικό διάγραμμα για τις αρχικές συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω ως προς την συγκέντρωση της φορμαλδεϋδης για τους μηχανισμούς 1, 2 και 3 από τις αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες.

**Διάγραμμα 3.1 Συγκέντρωση φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο για 3 τυχαία δομικά υλικά.**



Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 3.1 και 3.2 ο χρόνος ο οποίος λήγει το κάθε πείραμα είναι τα 140 λεπτά (2 ώρες και 20 λεπτά και όχι τα 120 (2 ώρες). Η συγκεκριμένη παραπάνω μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις με κλειστές λάμπες. Ουσιαστικά, πραγματοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις με τον τρόπο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.1 και μόλις πάρθηκε η τελευταία μέτρηση των 2 ωρών, οι λαμπτήρες απενεργοποιήθηκαν, έγινε μία παύση 5 λεπτών και αμέσως μία τελευταία μέτρηση χωρίς την παρουσία ακτινοβολίας UV. Έτσι, παρατηρείται ξεκάθαρα ότι ακριβώς μετά το σβήσιμο των λαμπτήρων υπάρχει μία σταθερή μείωση του ρύπου της φορμαλδεΐδης.

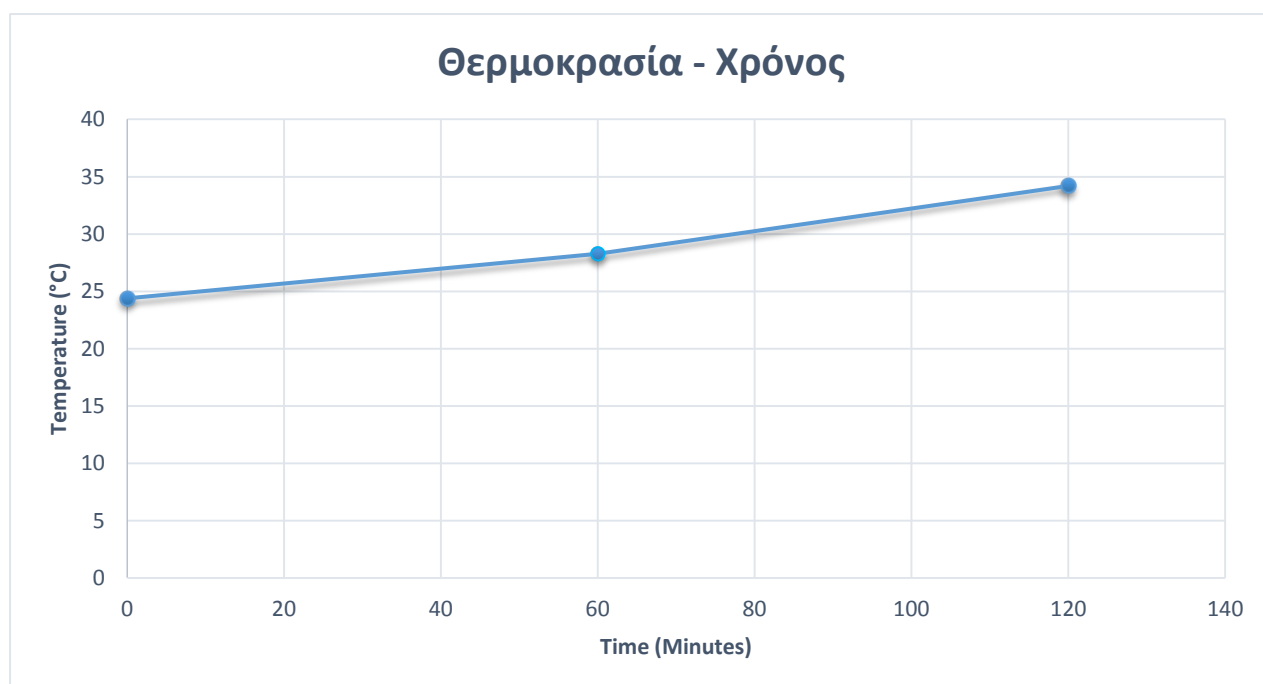
Η παραπάνω μείωση παρατηρείται διότι όπως προαναφέραμε η συγκέντρωση του ρύπου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν όμως απενεργοποιήθηκαν οι λαμπτήρες η θερμοκρασία του αλουμινίου αλλά και του γυάλινου θαλάμου σταδιακά άρχισε να μειώνεται με αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της αέριας συγκέντρωσης του ρύπου.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι το γεγονός πως στα διαγράμματα 3.1 και 3.2 με την προσθήκη οποιαδήποτε δομικού υλικού μέσα στο θάλαμο η συγκέντρωση της φορμαλδεΐδης αυξάνεται. Η συγκεκριμένη παρατήρηση έχει πολύ μεγάλη σημασία

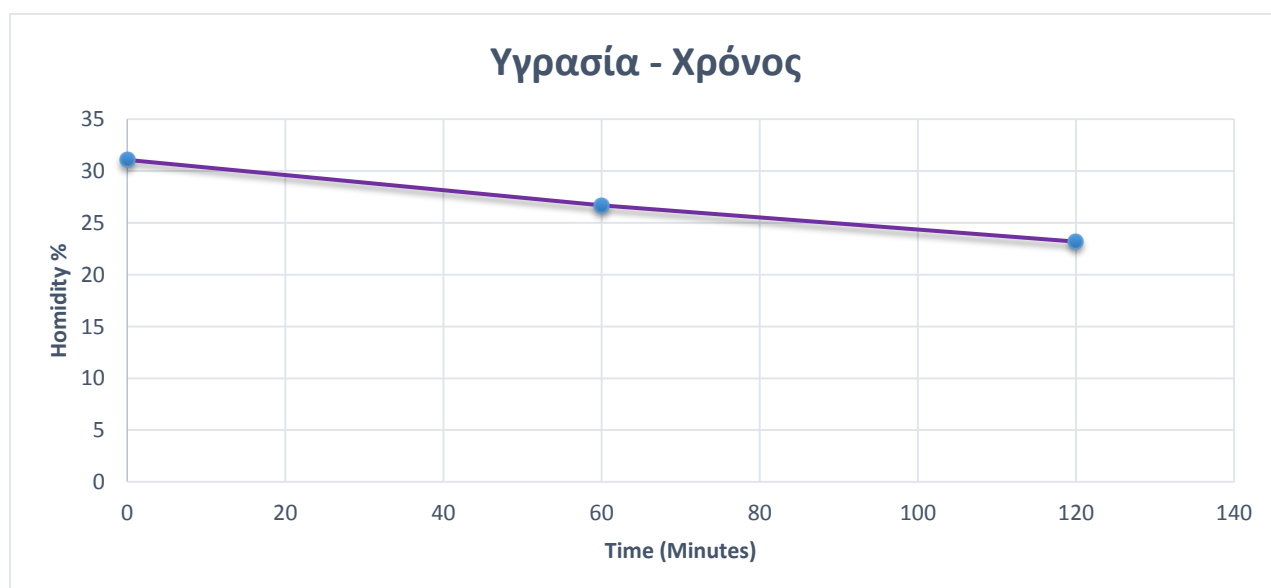
καθώς γίνεται αντιληπτό ότι τα δομικά υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα με σκοπό την φωτοκατάλυση του ρύπου, είναι φορείς και εκπέμπουν στον περιβάλλοντα εσωτερικό χώρο του πειράματος αέρια φορμαλδεΐδη.

Όσον αφορά άλλες παραμέτρους ως προς την λειτουργία του θαλάμου, παρουσιάζονται οι δύο πιο σημαντικές, η θερμοκρασία και η υγρασία. Έπειτα από αρκετές επαναληπτικές μετρήσεις παρουσιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα 3.3 θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο και 3.4 υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο του θαλάμου.

**Διάγραμμα 3.2 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο**



**Διάγραμμα 3.3 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την υγρασία**





Παρατηρείται ότι οι δύο παραπάνω διαγραμματικές απεικονίσεις έχουν αντίθετη κλίση. Αυτό συμβαίνει διότι στο διάγραμμα 3.3 η θερμοκρασία αυξάνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο μέσα στον θάλαμο διότι είναι ενεργοποιημένοι οι λαμπτήρες UV, οι οποίοι δημιουργούν μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του πειραματικού θαλάμου. Αντιθέτως, στο διάγραμμα 3.4 η υγρασία μειώνεται σταδιακά σε συνάρτηση με τον χρόνο μέσα στον θάλαμο. Η παραπάνω μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του θαλάμου αυξάνεται, ενώ παράλληλα δεν υπάρχει κάποιος άλλος παράγοντας που να επηρεάζει την υγρασία τόσο στο δωμάτιο του εργαστηρίου που εξελίσσεται το πείραμα όσο και στον πειραματικό θάλαμο.

### **3.3 Επιλογή μήτρας – Αποτελέσματα**

Ο συνδυασμός των τριών μηχανισμών που περιγράφηκαν παραπάνω, με την κατάλληλη επιλογή δομικού υλικού στο κατάλληλο είδος και ποσότητα διοξειδίου του τιτανίου, θεωρείται ικανός να αποδημήσει φωτοκαταλυτικά τον αέριο ρύπο της φορμαλδεΐδης, έχοντας μία άρτια φωτοκαταλυτική δραστηριότητα .

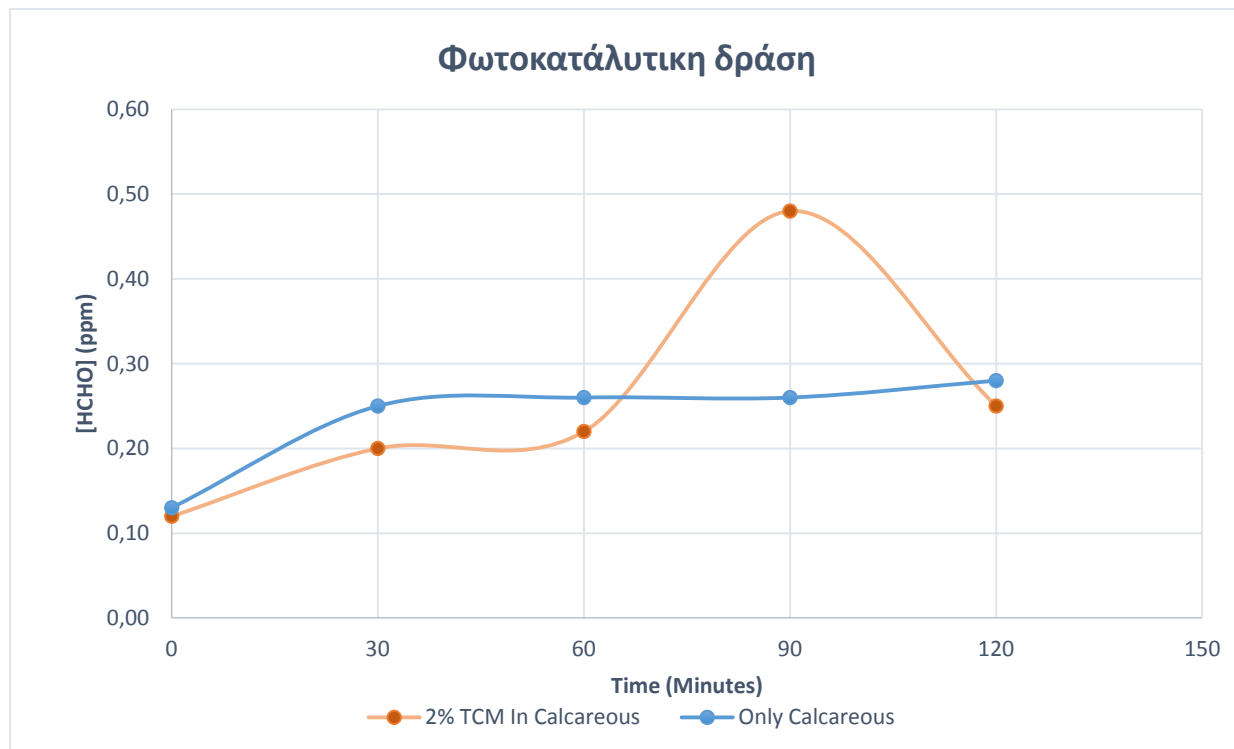
Έτσι , πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για τα δομικά υλικά που περιγράφονται στον Πίνακα 3.1, βάση της πειραματικής διαδικασίας που αναφέρεται παραπάνω. Πιο αναλυτικά, μελετήθηκαν 3 βασικά δομικά υλικά, η ασβεστοκονία, το τσιμέντο και το τσιμεντόχρωμα με 2 διαφορετικές τιτανίες σε διαφορετικές συγκεντρώσεις.

#### **3.3.1 Ασβεστοκονία**

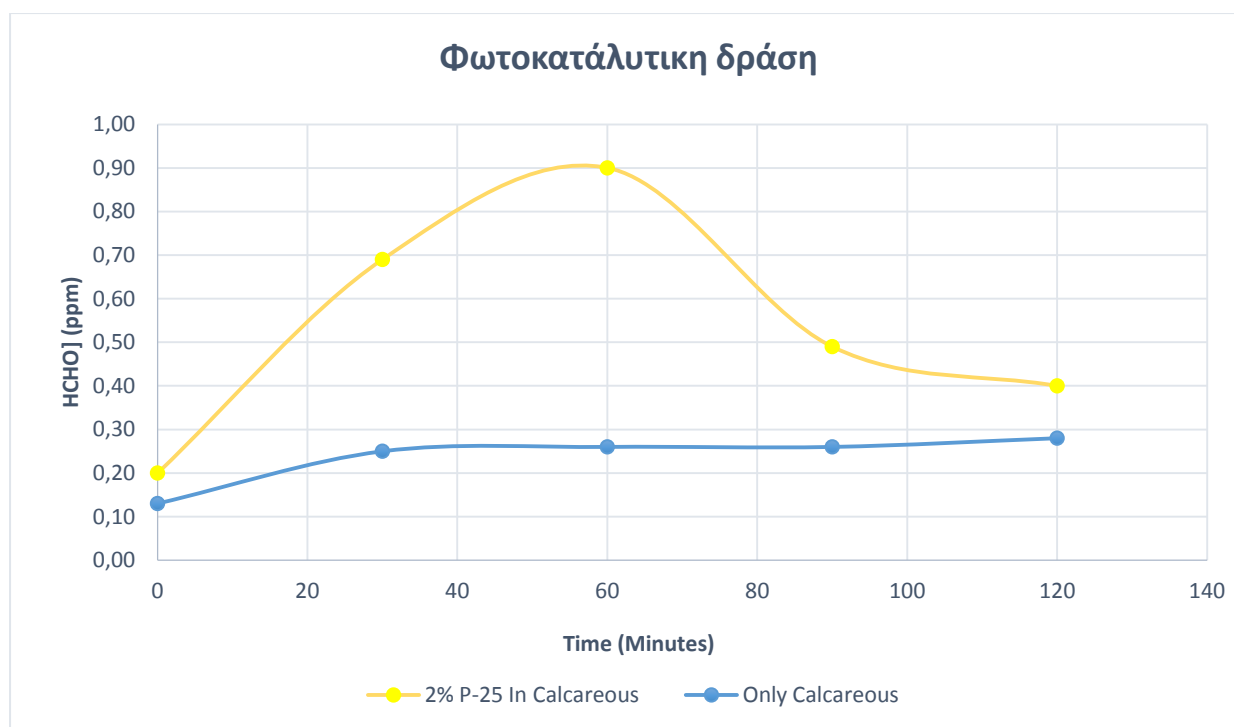
Η ασβεστοκονία είναι από τα παλαιότερα υλικά που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο ως συνδετικό υλικό . Η απόδοση των ασβεστοκονιαμάτων στην νανοδομή, βασίζεται στα κολλοειδή χαρακτηριστικά του ασβέστη και στην διαδικασία ενανθράκωσης του, με την οποία σκληραίνει το ασβεστοκονίασμα. Όπως αναφέρθηκε, η ασβεστοκονία είναι ένα από τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα. Τα αποτελέσματα τα οποία διεξήχθησαν, περιγράφονται παρακάτω με γραφικές ποσοτικές απεικονίσεις εκ των οποίων παράγονται αρκετά ενδιαφέροντα

συμπεράσματα, προς την τυχόν δράση της ασβεστοκονίας ως φωτοκαταλυτικό δομικό υλικό.

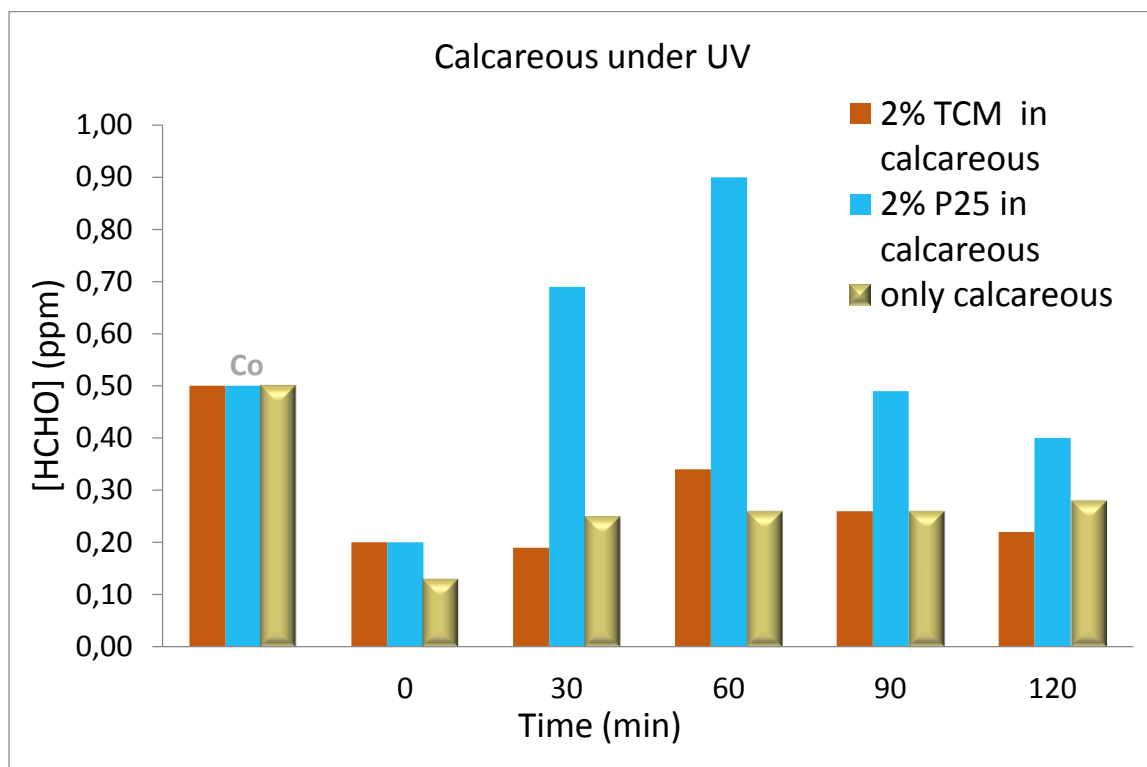
**Διάγραμμα 3.4 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% TCM ασβεστοκονία σε σχέση με ασβεστοκονία χωρίς τιτανία .**



**Διάγραμμα 3.5 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% P-25 ασβεστοκονία σε σχέση με ασβεστοκονία χωρίς τιτανία .**



**Διάγραμμα 3.6 Σύγκριση συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τις τρεις περιπτώσεις ασβεστοκονίας .**



Η απεικόνιση των παραπάνω διαγραμμάτων 3.5, 3.6 και 3.7, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του Microsoft Excel , βάση των μετρήσεων που αναγράφηκαν στον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης , κατά την διεξαγωγή της έρευνας στο εργαστήριο του ΙΤΕ. Οι μετρήσεις αναγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.2:

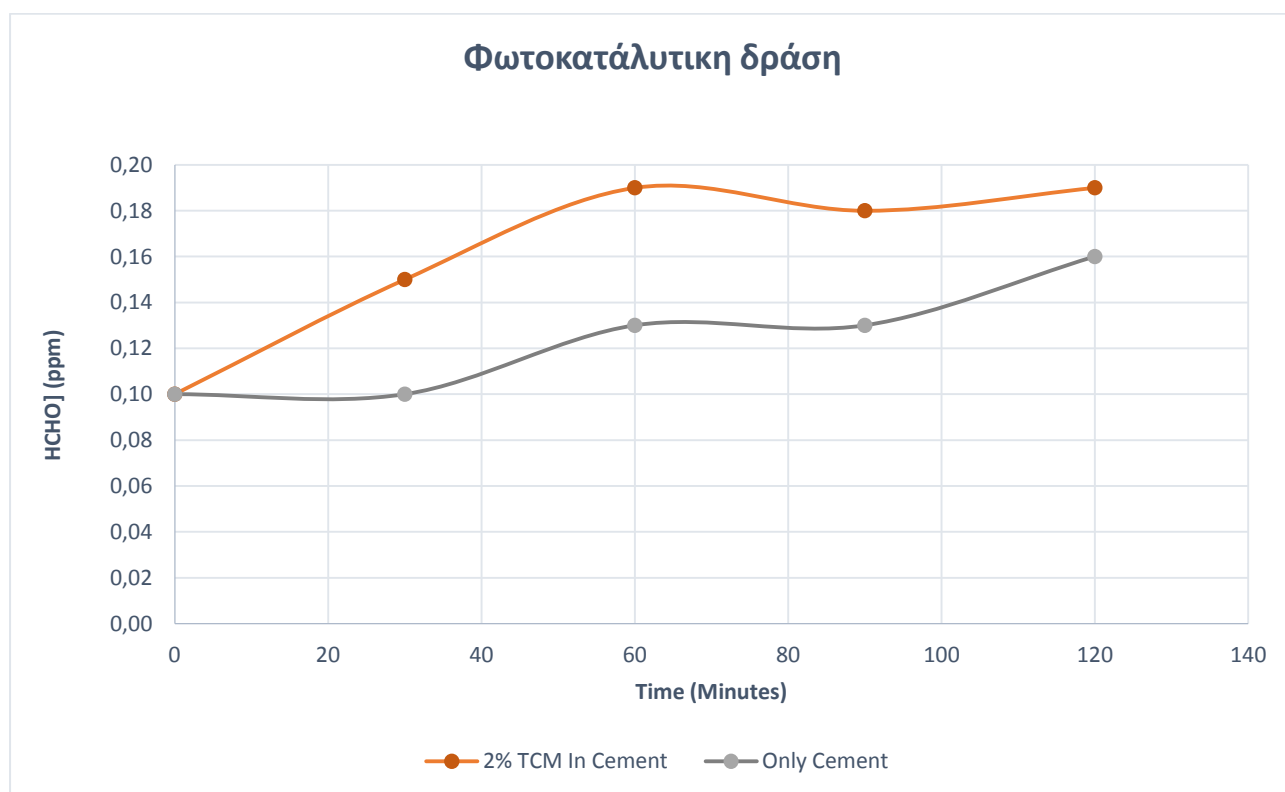
**Πίνακας 3.2 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης για την ασβεστοκονία .**

Χρόνος ( λεπτά )	Μόνο Ασβεστοκονία (ppm)	TCM 2% σε Ασβεστοκονία (ppm)	P-25 2% σε Ασβεστοκονία (ppm)
0	0,13	0,12	0,20
30	0,25	0,20	0,69
60	0,26	0,28	0,90
90	0,26	0,38	0,49
120	0,28	0,25	0,40

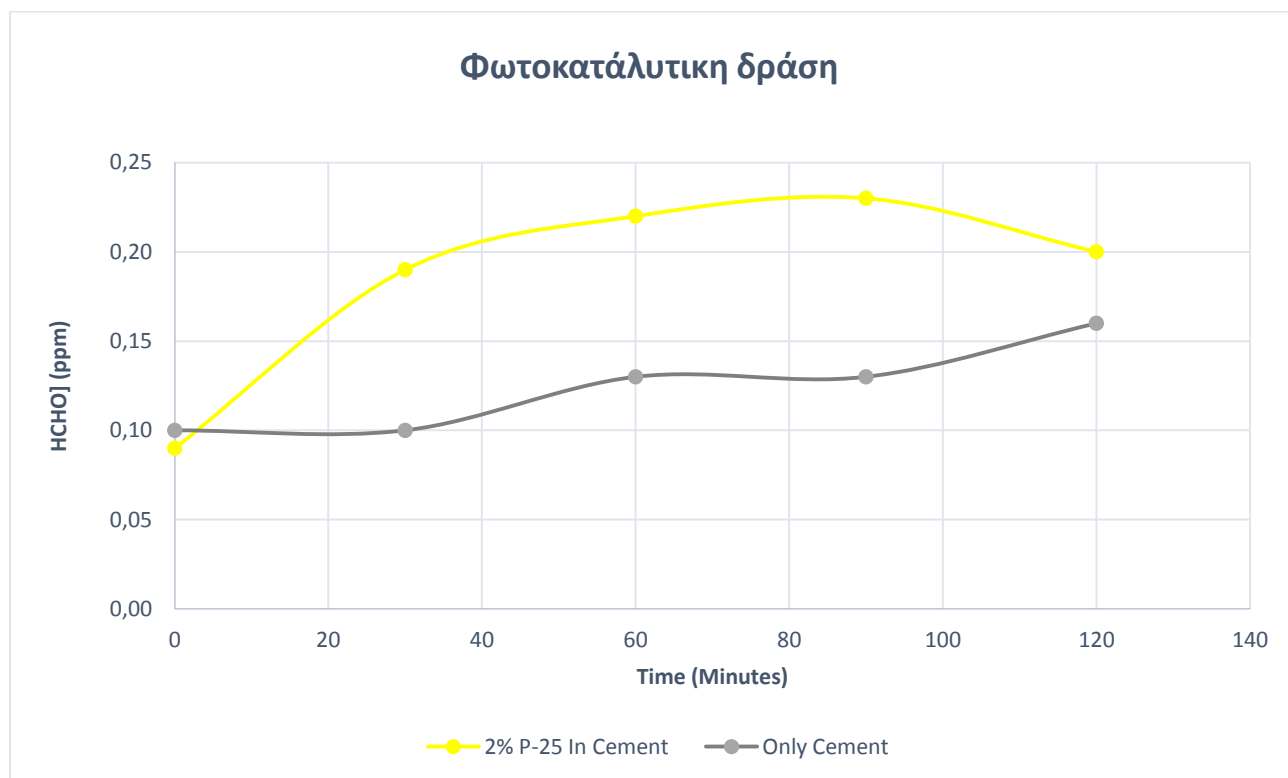
### 3.3.2 Τσιμεντούχο κονίασμα

Το τσιμέντο αποτελεί ένα υδραυλικό συνδετικό υλικό. Η χημική αντίδραση του τσιμέντου με το νερό, δηλαδή η ενυδάτωση της σκόνης του τσιμέντου, παράγει προϊόντα που έχουν χαρακτηριστικά πήξης και ξήρανσης. Όσον αφορά το τσιμέντο ως φωτοκαταλυτικό δομικό υλικό, πειραματικές αλλά και πιλοτικές φωτοκαταλυτικές εφαρμογές διεξήγαγαν ελπιδοφόρα αποτελέσματα για αρκετούς αέριους και υγρούς ρύπους. Τέλος, το τσιμέντο και το σκυρόδεμα, αποτελούν το πιο σύνηθες δομικό υλικό ως προς τις φωτοκαταλυτικές του εφαρμογές παγκοσμίως. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά σε γραφικές ποσοτικές απεικονίσεις, ως προς την πιθανή φωτοκαταλυτική δράση του τσιμέντου απέναντι στον αέριο ρύπο της φορμαλδεΐδης.

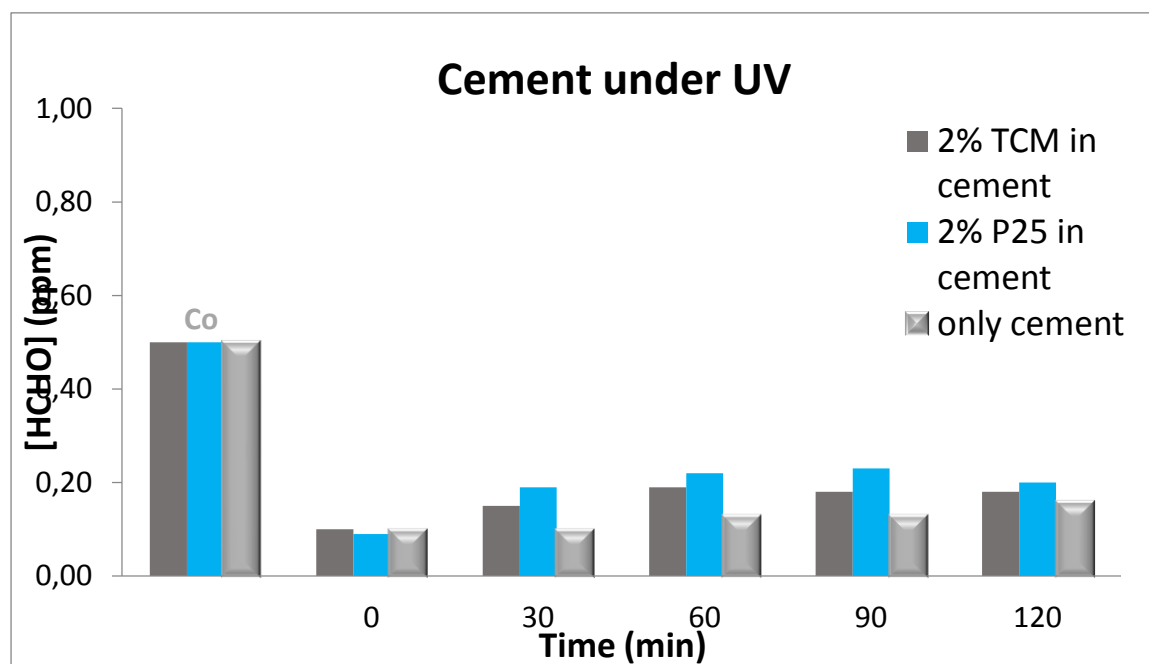
**Διάγραμμα 3.7 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% TCM τσιμέντο σε σχέση με τσιμέντο χωρίς τιτανία .**



**Διάγραμμα 3.8 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο , μεταξύ 2% P-25 τσιμέντο σε σχέση με τσιμέντο χωρίς τιτανία .**



**Διάγραμμα 3.9 Σύγκριση συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τις τρεις περιπτώσεις τσιμέντου .**



Η απεικόνιση των παραπάνω διαγραμμάτων 3.8, 3.9 και 3.10, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του Microsoft Excel, βάση των μετρήσεων που

καταγράφηκαν στον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης , κατά την διεξαγωγή της έρευνας στο εργαστήριο του ΙΤΕ. Οι μετρήσεις αναγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3:

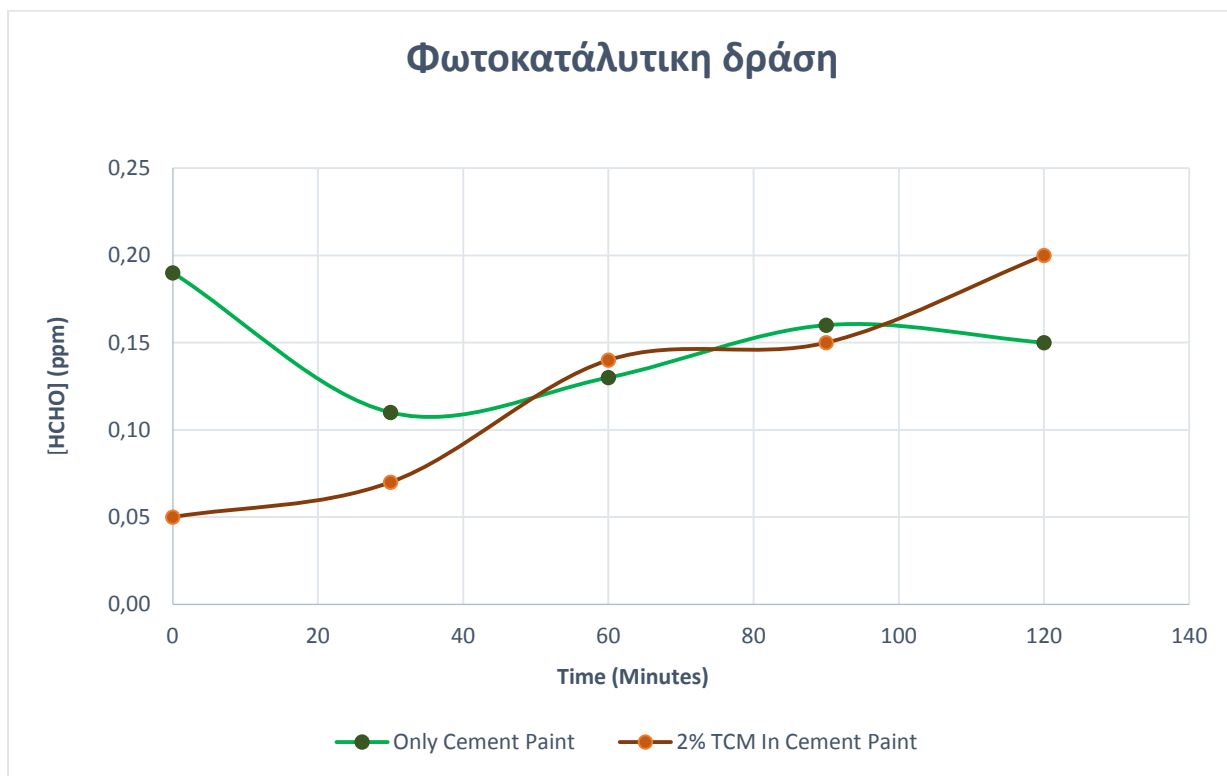
**Πίνακας 3.3 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης για το τσιμέντο.**

<b>Χρόνος ( λεπτά )</b>	<b>Μόνο Τσιμέντο (ppm)</b>	<b>TCM 2% σε Τσιμέντο (ppm)</b>	<b>P-25 2% σε Τσιμέντο (ppm)</b>
0	0,10	0,10	0,09
30	0,10	0,15	0,19
60	0,13	0,19	0,22
90	0,13	0,18	0,23
120	0,16	0,19	0,20

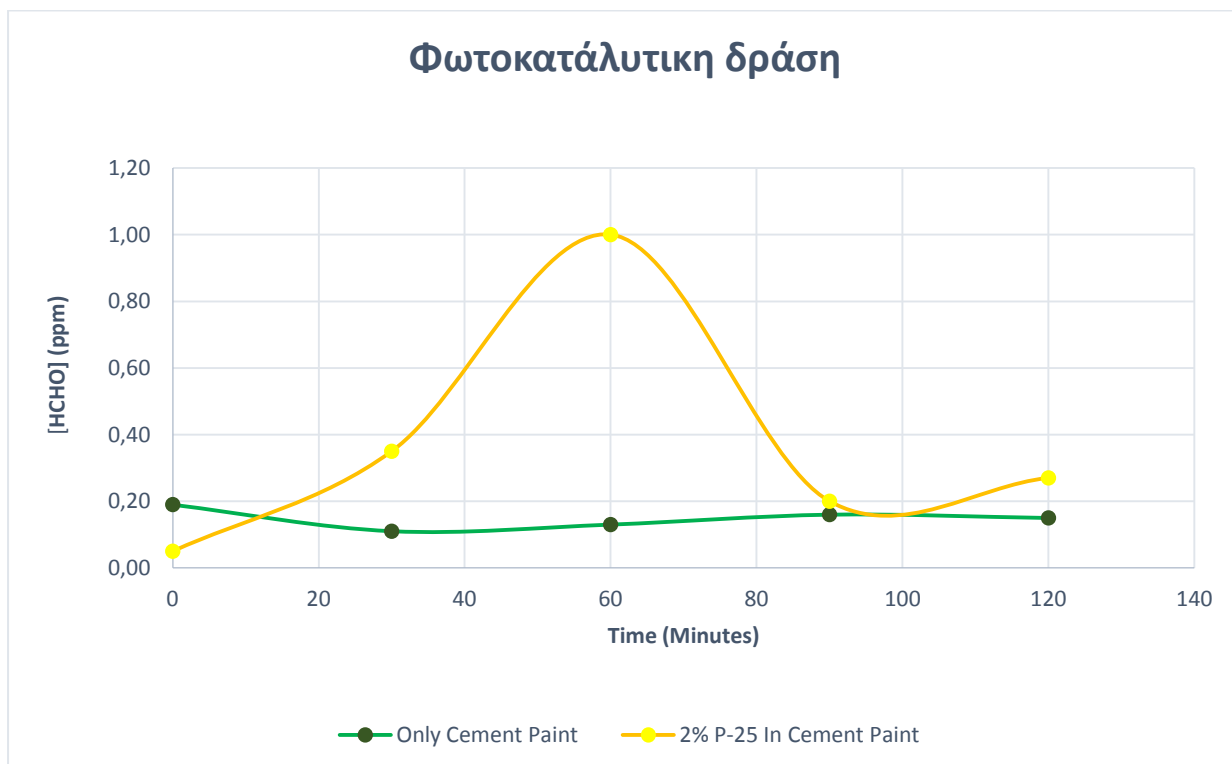
### **3.3.3 Τσιμεντόχρωμα**

Το τσιμεντόχρωμα αποτελεί ένα όχι και τόσο γνωστό δομικό υλικό. Είναι ένα δομικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια κατά κύριο λόγο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και έχει αρκετά παρόμοια χαρακτηριστικά με το τσιμεντούχο κονίασμα. Για την ιδιότητά του τσιμεντοχρώματος ως φωτοκαταλυτικό δομικό υλικό, δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής δεδομένα , με εξαίρεση κάποιων πειραματικών ερευνών χωρίς ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα σε ποσοτικές απεικονίσεις, ως προς την πιθανή φωτοκαταλυτική δράση για το τσιμεντόχρωμα απέναντι στον αέριο ρύπο της φορμαλδεΐδης.

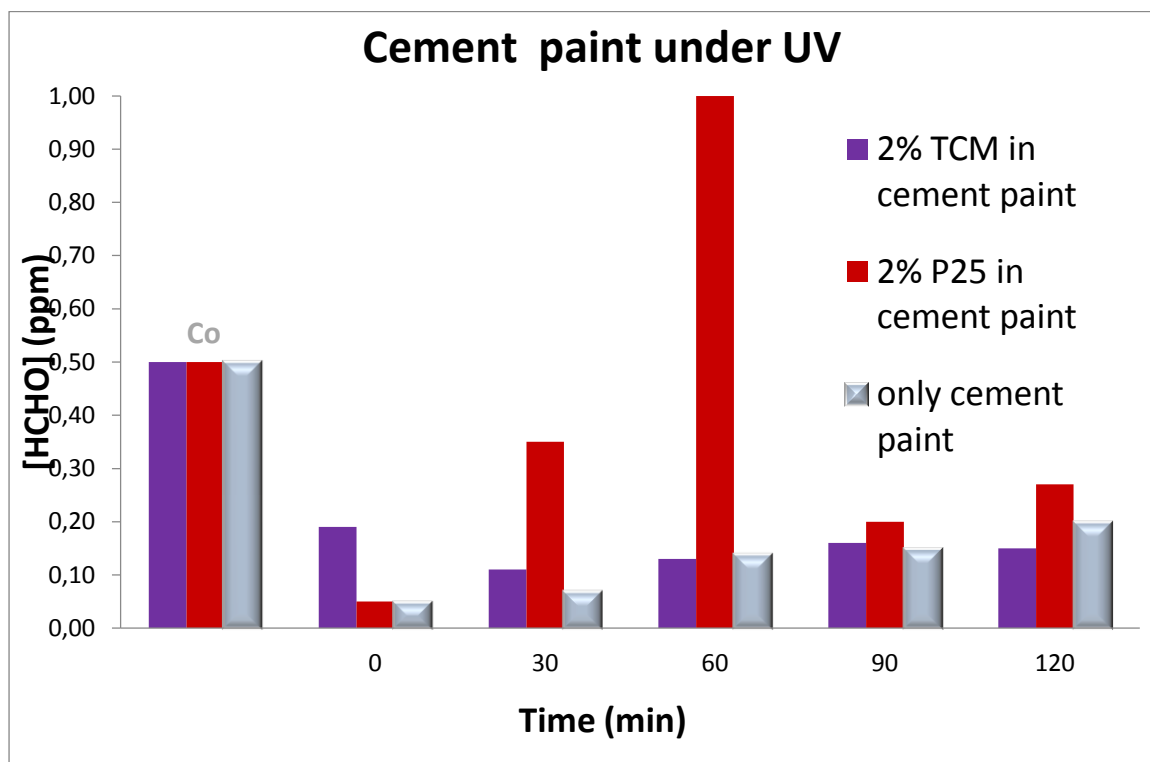
**Διάγραμμα 3.10 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο, μεταξύ 2% TCM τσιμεντόχρωμα σε σχέση με τσιμεντόχρωμα χωρίς τιτανία.**



**Διάγραμμα 3.11 Συγκέντρωση Φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με το χρόνο, μεταξύ 2% P-25 τσιμεντόχρωμα σε σχέση με τσιμεντόχρωμα χωρίς τιτανία.**



**Διάγραμμα 3.12 Σύγκριση συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τις τρεις περιπτώσεις τσιμεντοχρώματος .**



Η απεικόνιση των παραπάνω διαγραμμάτων 3.11, 3.12 και 3.13, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του Microsoft Excel, βάση των μετρήσεων που καταγράφηκαν στον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης, κατά την διεξαγωγή της έρευνας στο εργαστήριο του ΙΤΕ. Οι μετρήσεις αναγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.4:

**Πίνακας 3.4 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης για το τσιμεντόχρωμα.**

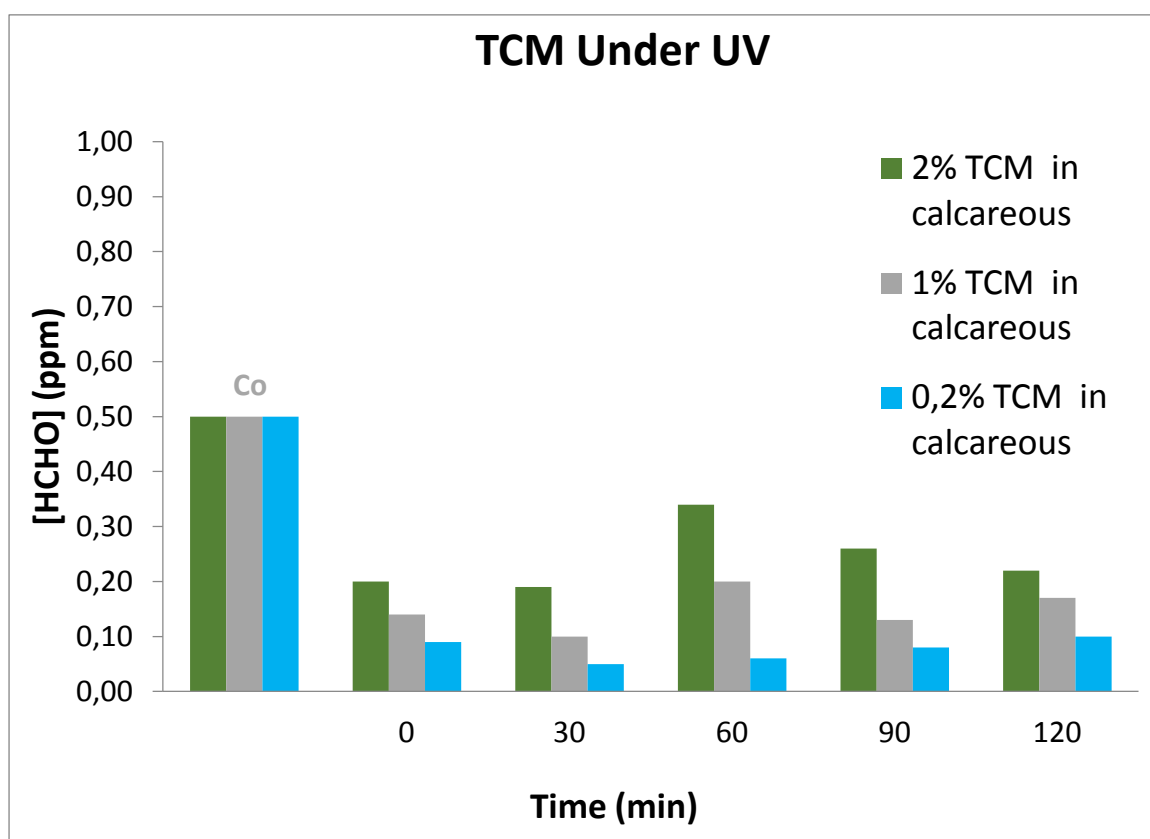
Χρόνος ( λεπτά )	Μόνο Τσιμεντόχρωμα (ppm)	TCM 2% σε Τσιμεντόχρωμα (ppm)	P-25 2% σε Τσιμεντόχρωμα (ppm)
0	0,19	0,05	0,05
30	0,11	0,07	0,35
60	0,13	0,14	1,00
90	0,16	0,15	0,20
120	0,15	0,20	0,27



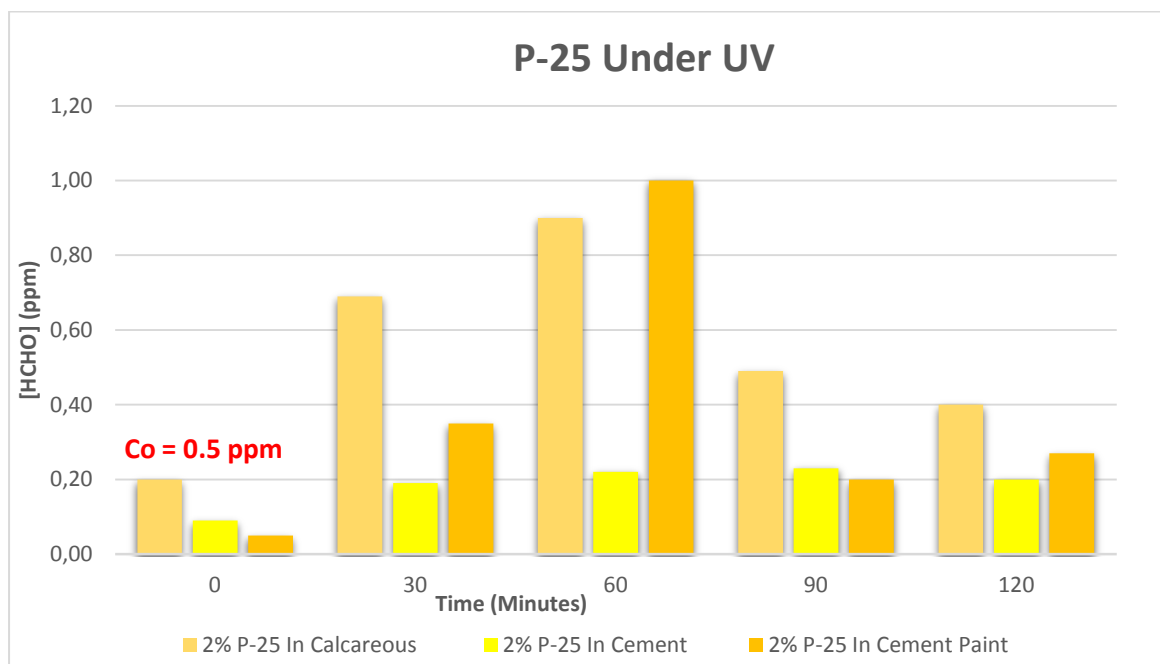
### 3.3.4 Συγκριτικά αποτελέσματα διοξειδίου του τιτανίου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ποσοτικά διαγράμματα σε γραφικές απεικονίσεις συγκριτικά για κάθε ένα από τα είδη τιτανίας που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά, απεικονίζεται το εργαστηριακό διοξείδιο του τιτανίου TCM με συγκέντρωση τιτανίας 2% για κάθε δομικό υλικό και στην συνέχεια το εμπορικό P-25, αντίστοιχα με συγκέντρωση τιτανίας 2%.

**Διάγραμμα 3.13 Σύγκριση εμπλουτισμένων δομικών υλικών με διοξείδιο του τιτανίου TCM 2 %.**



**Διάγραμμα 3.14 Σύγκριση εμπλουτισμένων δομικών υλικών με διοξείδιο του τιτανίου P-25 2 %.**

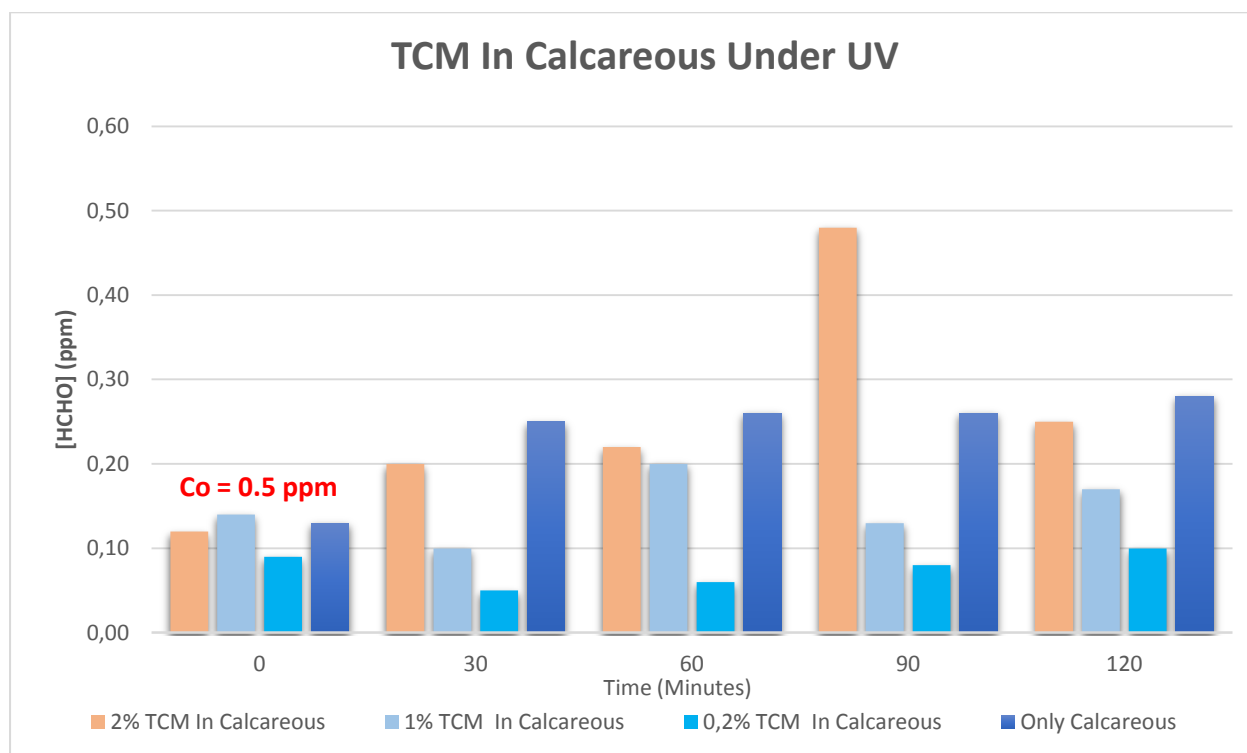


Οι μετρήσεις για τα διαγράμματα 3.14 και 3.15 έχουν αναφερθεί παραπάνω αναλυτικά στους Πίνακες 3.2 , 3.3. και 3,4 για κάθε δομικό υλικό αντίστοιχα.

### 3.3.5 Αλλαγή συγκέντρωσης διοξειδίου του τιτανίου

Σημαντική σύγκριση παρουσιάζεται στην παρακάτω ποσοτική απεικόνιση, όπου φαίνεται η αλλαγή της συγκέντρωσης του εργαστηριακού TCM διοξειδίου του τιτανίου με βάση την ασβεστοκονία.

**Διάγραμμα 3.15 Αλλαγή συγκέντρωσης τιτανίας TCM στην ασβεστοκονία.**



Η απεικόνιση του διαγράμματος 3.16, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του Microsoft Excel, βάση των μετρήσεων που καταγράφηκαν στον ανιχνευτή φορμαλδεΐδης, κατά την διεξαγωγή της έρευνας στο εργαστήριο του ΙΤΕ. Οι μετρήσεις αναγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.5:

**Πίνακας 3.5 Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης φορμαλδεΐδης για την ασβεστοκονία με διαφορετικές συγκεντρώσεις τιτανίας TCM.**

Χρόνος (λεπτά )	Μόνο Ασβεστοκονία (ppm)	TCM 2% σε Ασβεστοκονία (ppm)	TCM 1% σε Ασβεστοκονία (ppm)	TCM 0.2% σε Ασβεστοκονία (ppm)
0	0,13	0,12	0,14	0,09
30	0,25	0,20	0,10	0,05
60	0,26	0,22	0,20	0,06
90	0,26	0,48	0,13	0,08
120	0,28	0,25	0,17	0,10

## ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Προκειμένου να αποτυπωθεί μία σοβαρή εικόνα για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και την αποφυγή ακούσιου σφάλματος, τα πειράματα για όλα τα δομικά υλικά που αναφέρονται παραπάνω επαναλήφθηκαν τουλάχιστον δύο φορές κατά την διάρκεια της έρευνας. Βέβαια, τα αποτελέσματα παρουσίαζαν σχεδόν μηδαμινές αποκλίσεις, οι οποίες χρεώθηκαν σε κάποιο είδος ανθρώπινου εργαστηριακού σφάλματος. Οι τελικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της μεθοδολογίας της έρευνας και τον καθορισμό των αποτελεσμάτων είναι οι πρώτες μετρήσεις που έλαβαν μέρος για το κάθε δομικό υλικό.

Ως προς τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων της έρευνας, μία αρκετά σημαντική παρατήρηση, αποτελεί η αρχική συγκέντρωση αέριας φορμαλδεΐδης στο εσωτερικό του θαλάμου χωρίς δομικό υλικό, κατ' επανάληψη μετρήσεων, είναι ίση με  $C_0 = 0,5$  ppm. Ο λόγος που κανένα υλικό σε κανένα από τα διαγράμματα δεν ξεκινάει με την παραπάνω συγκέντρωση είναι η προσροφητική ικανότητα των δομικών υλικών. Παρατηρείται επίσης διαφορετική προσρόφηση ανά δομικό υλικό και ανά υλικό ίδιας κατηγορίας με διαφορετική συγκέντρωση τιτανίας.

Η γενική ιδέα αποτελείται από δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος σχετίζεται με το κομμάτι της προσρόφησης του αέριου ρύπου της φορμαλδεΐδης, όπου ανάλογα με το πορώδες του εκάστοτε υπό μελέτη δομικού υλικού φτάνουμε σ' ένα σημείο των μετρήσεων όπου η συγκέντρωση αρχίζει να αυξάνεται. Έτσι, οδηγούμαστε στο δεύτερο σκέλος το οποίο εξετάζει τη διαδικασία της εκρόφησης του ρύπου. Με μία προσεκτική μελέτη των περισσότερων διαγραμμάτων, εντοπίζεται ένα σημείο από το οποίο κι έπειτα υπάρχει μία αύξηση του ρύπου μέσα στον θάλαμο. Θεωρείται δηλαδή ότι πραγματοποιείται διαδικασία προσρόφησης και εκρόφησης του ρύπου από τα υπό μελέτη δομικά υλικά εφόσον, κανένα δομικό υλικό δεν ξεκινάει από την αρχική συγκέντρωση  $C_0 = 0,5$  ppm καθώς και στην συνέχεια παρατηρείται αύξηση του ρύπου στο θάλαμο.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω βασική ιδέα, συμπεραίνουμε ότι από την χρονική στιγμή που παρατηρείται πλήρης εκρόφηση του αέριου ρύπου της φορμαλδεΐδης για κάθε δομικό υλικό, υπάρχει πιθανότητα φωτοκατάλυσης. Με άλλα λόγια, η μείωση αυτή του ρύπου έπειτα από την πλήρη εκρόφηση του, αποτελεί την

τυχόν φωτοκατάλυση της αέριας φορμαλδεΐδης .Πιο συγκεκριμένα για κάθε δομικό υλικό:

Αναφορικά με την ασβεστοκονία, δεχθήκαμε τα καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με πιθανή φωτοκατάλυση της φορμαλδεΐδης. Ουσιαστικά, η ασβεστοκονία καταλήγουμε ότι λειτουργεί ως ο πιθανότερα πιο αποτελεσματικός φωτοκαταλύτης και για τις δύο τιτανίες , TCM και P-25 για συγκέντρωση τιτανίας 2 % . Βέβαια, συγκριτικά μεταξύ των 2, TCM και P-25, καλύτερη θεωρείται η εργαστηριακή τιτανία, διότι ενώ και οι δύο έχουν σχεδόν παρόμοια αποτελέσματα προσρόφησης και εκρόφησης, το εμπορικό P-25 εμφανίζει μεγαλύτερη εκπομπή ρύπου κατά την πλήρη εκρόφηση, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στο διαγράμματα 3.5 και 3.6. Ωστόσο, όσον αφορά τις διαφορετικές συγκεντρώσεις τιτανίας για το TCM και την ασβεστοκονία, δεν παρατηρείται κάποιου είδους πιθανούς φωτοκατάλυσης στο διάγραμμα 3.16. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο διαφορετικό πορώδες που δημιουργείται πάνω στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού.

Μελετώντας το τσιμέντο, σε αντίθεση με τις περισσότερες πειραματικές έρευνες παγκοσμίως, η αυξητική πορεία της συγκέντρωσης της φορμαλδεΐδης στο θάλαμο συνεχιζόταν μέχρι τέλους. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει οποιαδήποτε πιθανή φωτοκατάλυση. Η μόνη διακύμανση μείωσης παρατηρείται στο διαγράμμα 3.9 το οποίο αφορά στο τσιμέντο εμπλουτισμένο με τιτανία P-25 συγκέντρωσης 2%. Παρ' όλα αυτά, έπειτα από επανάληψη της μέτρησης και την πραγματοποίηση περαιτέρω χρονικά μετρήσεων ,δηλαδή μετά των δύο ωρών, αποκρίθηκαν τυχόν σκέψεις για πιθανή φωτοκατάλυση , λόγω εκ νέου αύξησης της συγκέντρωσης. Συμπερασματικά, για το τσιμέντο με τις παραπάνω εμπλουτισμένες τιτανίες, παρατηρήθηκε μεγάλη προσροφητικότητα με πολύ μικρή εκρόφηση, συγκρίνοντας το βέβαια με την ασβεστοκονία η οποία έδωσε σημαντικά αποτελέσματα .

Όσον αφορά το τσιμεντόχρωμα, αυτό είτε παρουσίασε παρόμοια αποτελέσματα με το τσιμέντο στην περίπτωση με την εργαστηριακή τιτανία TCM, είτε παρουσίασε πολύ μεγάλη εκπομπή ρύπου για την περίπτωση με την εμπορική τιτανία P-25. Η δεύτερη περίπτωση κρίθηκε πιο ενδιαφέρουσα καθώς μετά την αρκετά απότομη άνοδο της συγκέντρωσης της φορμαλδεΐδης, παρατηρήθηκε μία αρκετά ελπιδοφόρα μείωση, η οποία όμως όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.12 δεν δίνει κάποιο σοβαρό αποτέλεσμα διότι ακολουθεί μία περαιτέρω αύξηση του ρύπου . Όπως και για το τσιμέντο, για το τσιμεντόχρωμα παρατηρήθηκε μεγάλη προσροφητικότητα. Σύμφωνα με τα διαγράμματα 3.11 και 3.12, δεν παρατηρείται

κάποια τυχόν φωτοκαταλυτική δραστηριότητα για τα υπό εξέταση δομικά υλικά με τσιμεντόχρωμα.

Γενικότερα, αναφορικά με την προσρόφηση και εκρόφηση αέριων ρύπων στα δομικά υλικά, έρευνες των τελευταίων ετών , έχουν συμπεράνει ότι πρόκειται για ένα λογικό μηχανισμό αντίδρασης των υλικών εμπλουτισμένων με τιτανία, προοριζόμενα για φωτοκατάλυση, τόσο σε εργαστηριακή κλίμακα όσο και σε διάφορες πιλοτικές εφαρμογές. [ Jian Li et al. , 2016 ]

Ωστόσο, η προσρόφηση και η εκρόφηση δεν είναι οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή αντίδραση του δομικού υλικού εμπλουτισμένο με διοξειδίου του τιτανίου, καθώς η διείσδυση του φωτός αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο τόσο για την ταχύτητα της αντίδρασης, όσο και για την ζητούμενη πραγματοποίηση πιθανής φωτοκατάλυσης του ρύπου. [Lan Wang et al , . 2016 ]

Βέβαια , το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκε πιθανή φωτοκαταλυτική δράση για το τσιμέντο και το τσιμεντόχρωμα μπορεί να οφείλεται στον αέριο ρύπο της φορμαλδεΐδης, διότι αποδεδειγμένα, δεν έχουν όλα τα φωτοκαταλυτικά υλικά την ίδια φωτοκαταλυτική δράση σε όλους τους ρύπους. Αντιθέτως, ένα φωτοκαταλυτικό υλικό το οποίο αποδομεί ένα μεγάλο ποσοστό αέριων ρύπων, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην μπορεί να φωτοκαταλύσει ένα συγκεκριμένο ρύπο. [A . Strini et al., 2005 ]

Ακόμη, κάνοντας λόγο για την διείσδυση του φωτός στην επιφάνεια του δομικού υλικού, σημαντικό πρόβλημα αποτελεί το πορώδες του νανοϋλικού, καθώς για να υπάρχει μία τυχόν φωτοκαταλυτική δράση μέσω του δομικού υλικού δεν πρέπει να σφραγίζονται οι πόροι του από τους κόκκους του δομικού υλικού. Αυτό σημαίνει ότι αν οι πόροι του διοξειδίου του τιτανίου είναι για παράδειγμα ίσοι με την διάμετρο των κόκκων του δομικού υλικού, είναι πιθανόν να καλυφθούν και γι' αυτό το λόγο να μην υπάρξει φωτοκαταλυτική δράση. Πρακτικά, σε αυτήν την περίπτωση όχι μόνο δεν λειτουργεί η διαδικασία της φωτοκατάλυσης αλλά πιθανότατα αυξάνεται και ο ρύπος, κάτι που παρατηρήθηκε για το υλικό BM 33, με τσιμεντόχρωμα και P-25 2% τιτανία .

Ακόμα, εκτός από το μέγεθος του πορώδες , η αύξηση της συγκέντρωσης της τιτανίας από ένα σημείο και μετά οδηγεί σε μειωμένη διείσδυση του φωτός μέσα στο δομικό υλικό, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. [Xekoukoulotakis P. Nikolaos , et al. , 2010 ] Γι' αυτό το λόγο δεν επιλέχθηκαν δομικά υλικά τα οποία ήταν εμπλουτισμένα με συγκέντρωση τιτανίας μεγαλύτερη από 2%.

Βέβαια, τα αποτελέσματα του διαγράμματος 3.16, για συγκεντρώσεις μικρότερες από 2% για την ασβεστοκονία και για τις δύο εξεταζόμενες τιτανίες δεν παρουσίασαν δείγμα φωτοκατάλυσης. Αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωση 2% κρίνεται ως μία αξιόλογη επιλογή και για τις δύο τιτανίες εφόσον παρουσιάστηκαν δείγματα πιθανής φωτοκαταλυτικής δράσης για την ασβεστοκονία.

Αξιόλογη παρατήρηση ακόμα αποτελεί η μη φωτοκαταλυτική δραστηριότητα του αρκετά εμπορικού νανοϋλικού P-25. Γνωρίζοντας ότι θεωρείται αρκετά φωτοενεργό νανοϋλικό, χάρη στην αργή επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής καθώς και την μεγάλη επιφάνεια του, δεν παρατηρούντε τα ανάλογα αποτελέσματα. [Tsoukleris D.S et al., 2007 ] Βέβαια, αυτό δικαιολογείται από την άποψη ότι, η εμπορική τιτανία P-25 δεν έχει δημιουργηθεί ούτε για το συγκεκριμένο πείραμα για τα υπό μελέτη δομικά υλικά , αλλά ούτε για να αποδομεί φωτοκαταλυτικά συγκεκριμένα τον ρύπο της φορμλδεϋδης.

Γνωρίζουμε επίσης ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός επιφάνεια του νανοϋλικού, στην περίπτωση μας της τιτανίας, τόσο μεγαλύτερη φωτοκαταλυτική δράση θα έχει. Πάνω στην ενεργό επιφάνεια του νανοϋλικού υπάρχει το ενεργειακό χάσμα που μας ενδιαφέρει ώστε να πραγματοποιηθεί η φωτοκατάλυση. [ Tsoukleris D.S et al. , 2007 ] Γι' αυτό το λόγο η έρευνα έλαβε μέρος σε συνθήκες UV ακτινοβολίας, καθώς η πραγματοποίηση του πειράματος θεωρείται δύσκολη στο ορατό φως. Ουσιαστικά, κάτω από συνθήκες ακτινοβολίας UV, εκλύεται μεγαλύτερη ενέργεια σε σύγκριση με το ορατό φως, πράγμα που σημαίνει ότι ενεργοποιείται ευκολότερα το ενεργειακό χάσμα των νανοϋλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Σημειώνεται ότι, υλικά όπως το BM3, με ασβεστοκονία εμπλουτισμένη με εργαστηριακή τιτανία TCM 2%, αποτελούν αποδεδειγμένα καλά φωτοκαταλυτικά υλικά στο εργαστήριο του ΙΤΕ ακόμα και στο ορατό φως.

Αναφερόμενοι σε τυχόν περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, μεθοδολογικές αλλαγές του πειράματος και προτάσεις για μελλοντική εργασία πάνω στα αποτελέσματα, η μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε αυτή την εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί προς τις εξής κατευθύνσεις:

- Η διαδικασία του πειράματος θα μπορούσε να αναλυθεί στον διπλάσιο χρόνο πειραμάτων με πιο ακριβείς μετρήσεις του ανιχνευτή FP-30, δηλαδή μετρήσεις ανά μισή ώρα για ολοκληρωμένο πειραματικό χρόνο τις τέσσερις ώρες.

- Περαιτέρω μεθοδολογικός υπολογισμός, ο οποίος αφορά την φωτοκαταλυτική δραστηριότητα του υπό εξέταση υλικού. Δηλαδή, η ακριβής ποσοστιαία φωτοκαταλυτική αποδόμηση του ρύπου της φορμαλδεΐδης κατά την διεξαγωγή του πειράματος καθώς και ο ρυθμός φωτοαποδόμησης, ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο ελαττώνεται ο ρύπος κατά τη διάρκεια του πειράματος.
- Επανάληψη του πειράματος με διαφορετικές τιτανίες, ή τις ίδιες πιο ενισχυμένες. Η παραπάνω ενίσχυση αφορά μέταλλα όπως ο σίδηρος ( Fe), ο χαλκός ( Cu) και ο άργυρος (Ag) στο διοξείδιο του τιτανίου.
- Επανάληψη του πειράματος ως προς την φωτοκαταλυτική ικανότητα των συγκεκριμένων εμπλουτισμένων δομικών υλικών για την αποδόμηση διαφορετικού ρύπου. Βέβαια για την αποδόμηση συγκεκριμένων ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου χρειάζεται και αλλαγή λειτουργίας του θαλάμου, διότι πρόκειται για πολύ επικίνδυνα αέρια.
- Η επαναληπτική διαδικασία του πειράματος σε ορατό φως.
- Ανάλυση του πειράματος με απευθείας αέριο ρύπο φορμαλδεΐδης σε δυναμική κατάσταση με σωστά ρυθμιζόμενους μετρητές ροής αέρα για την επίτευξη της επιθυμητής αρχικής συγκέντρωσης αέριας φορμαλδεΐδης στον πειραματικό περιβάλλοντα χώρο.
- Επανάληψη του πειράματος με διαφορετικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες θερμοκρασίας και υγρασίας για αποτελέσματα που μπορεί να φανούν χρήσιμα στις διαφορετικές εποχές του χρόνου ως προς κάποια τυχόν πιλοτική εφαρμογή.
- Επανάληψη του πειράματος με διαφορετικές συγκεντρώσεις τιτανίας P-25 για περαιτέρω σύγκριση, παρόμοια δηλαδή διαδικασία με το TCM και την ασβεστοκονία.
- Η αξιοποίηση των σημαντικών αποτελεσμάτων, δηλαδή της ασβεστοκονίας και ιδιαίτερα με τον εμπλουτισμό της από την εργαστηριακή τιτανία, για τυχόν περαιτέρω χρησιμοποίηση της, για πιλοτικές εφαρμογές.
- Η αξιοποίηση όλων των αποτελεσμάτων και η επανάληψη του πειράματος στα υπό εξέταση υλικά για την διαπίστωση των ακριβή μηχανισμών δράσης της οποιαδήποτε αποδόμησης καθώς και των παραπροϊόντων που μπορεί να σχηματίζονται από της χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στο θάλαμο. Τέτοια στοιχεία είναι απαραίτητα για την μελλοντική χρήση της



έρευνας καθώς μπορεί ένα υλικό να έχει μεγάλη φωτοκαταλυτική αντίδραση σε πλήθος ρύπων, όμως να δημιουργεί παραπροϊόντα τα οποία ρυπαίνουν εκ νέου το περιβάλλον.

- Η επανάληψη της διαδικασίας του πειράματος με την μείωση ή την αύξηση της επιφάνειας του πάνελ του εκάστοτε υπό εξέταση δείγματος. Για παράδειγμα μπορεί να εξεταστεί αν μία μείωση της επιφάνειας του υλικού είναι ικανή να επιφέρει ισχυρή επίδραση στο ρυθμό φωτοαποδόμησης, λόγω μείωσης των ενεργών θέσεων στις οποίες λαμβάνει χώρα η φωτοαποδόμηση της φορμαλδεΐδης στην επιφάνεια του καταλύτη.

Τέλος, η επίτευξη πιλοτικών φωτοκαταλυτικών εφαρμογών σε ορατό φως ή/και φως μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, με την χρήση δομικών υλικών εμπλουτισμένα με διοξείδιο του τιτανίου, εξακολουθεί να αποτελεί μία σχετικά νέα επιστημονική περιοχή, η οποία χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, σε επίπεδο ερευνών, παρόμοιων και μη με την παρούσα εργασία, πριν την οποιαδήποτε εφαρμογή της .

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα ερευνητική εργασία μελετήθηκε η ιδιότητα του διοξειδίου του τιτανίου να αποδομεί φωτοκαταλυτικά τον αέριο ρύπο της φορμαλδεΐδης παρουσία ακτινοβολίας UV και οι εφαρμογές αυτού στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα εσωτερικών χώρων.

Εκμεταλλευόμενοι αυτήν τις ιδιότητες του , υλικά δόμησης και πιο συγκεκριμένα η ασβεστοκονία , το τσιμεντούχο κονίασμα και το τσιμεντόχρωμα επεξεργασμένα ήδη με διοξείδιο του τιτανίου εργαστηριακό και του εμπορίου, μελετήθηκαν ως προς τον βαθμό επίδρασης τους για την απομάκρυνση της αέριας φορμαλδεΐδης σε εργαστηριακή κλίμακα.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη, συνοψίζονται στα εξής:

- Υπάρχει αύξηση του ρύπου μέσα στο θάλαμο από την στιγμή που θα ενεργοποιηθούν οι λαμπτήρες, λόγω της σταδιακής αύξησης της

θερμοκρασίας. Άρα, παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης της φορμαλδεΐδης, με την αύξηση της θερμοκρασίας .

- Παρατηρείται αύξηση στα επίπεδα της συγκέντρωσης της φορμαλδεΐδης από την στιγμή την οποία θα τοποθετηθεί δομικό υλικό μέσα στο θάλαμο . Αυτό σημαίνει ότι τα δομικά υλικά είναι φορείς ρύπων και συγκεκριμένα στην περίπτωση μας, του ρύπου της φορμαλδεΐδης.
- Η εμπορική τιτανία P-25 εμφανίζει μεγαλύτερη εκπομπή ρύπου αέριας φορμαλδεΐδης από την εργαστηριακή τιτανία TCM.
- Εμφανίστηκε μηδαμινή φωτοκαταλυτική δραστηριότητα για τα περισσότερα υπό εξέταση δείγματα. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω της ισχυρής φυσικής προσρόφησης του ρύπου στην επιφάνεια των υλικών.
- Υλικά με την ίδια ακριβώς σύσταση, αλλά χωρίς να είναι εμπλουτισμένα με διοξείδιο του τιτανίου δεν επηρεάζουν την συγκέντρωση της φορμαλδεΐδης, δρουν απλά ως μέσο φυσικής προσρόφησης του ρύπου στην επιφάνεια τους χωρίς να υφίσταται φωτοχημική αντίδραση.
- Παρατηρείται ότι έπειτα από την διαδικασία της προσρόφησης του ρύπου στα υλικά, επέρχεται η διαδικασία της εκρόφησης. Έτσι , θεωρητικά από την στιγμή της πλήρης εκρόφησης μπορεί να ειπωθεί ότι με την μείωση του ρύπου υπάρχει πιθανή φωτοκαταλυτική δράση.
- Έγινε φανερό ότι όταν τα δομικά υλικά θερμανθούν εκροφούν ουσίες και στην περίπτωση μας αέριο ρύπο της φορμαλδεΐδης .
- Ουσιαστικά συμπεραίνεται, βάση της υψηλής προσρόφησης και εκρόφησης της φορμαλδεΐδης από τα υπό εξέταση δομικά υλικά, πόσο ευαίσθητα είναι τα υλικά σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες καθώς και στους ρύπους.
- Επιπλέον , καταλήγουμε ότι ενώ η εμπορική τιτανία P-25 θεωρείται από τις καλύτερες ευρείας κυκλοφορίας, δεν είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί καταλλήλως σε όλες τις έρευνες που αφορούν την φωτοκαταλυτική δραστηριότητα δομικών υλικών .

Τα φωτοκαταλυτικά δομικά υλικά, ανοίγουν δρόμους στις κατασκευές με πολλαπλά οφέλη , όπως η υψηλή ποιότητα, το καθαρό περιβάλλον και η υγιεινή διαβίωση. Παρόλα αυτά, η επίτευξη πιλοτικών φωτοκαταλυτικών εφαρμογών σε ορατό φως ή/και φως μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, με την χρήση δομικών υλικών εμπλουτισμένα με διοξείδιο του τιτανίου, εξακολουθεί να αποτελεί μία σχετικά νέα

επιστημονική περιοχή, η οποία χρήζει απαραίτητες περισσότερες έρευνες, πριν την οποιαδήποτε εφαρμογή της.

Πιο συγκεκριμένα, από την πληθώρα των βιβλιογραφικών δεδομένων συμπεραίνουμε ότι όσον αφορά το θέμα της φωτοκατάλυσης των δομικών υλικών έχουν διερευνηθεί ήδη πολλά πεδία ενώ παράλληλα έχει αποκτηθεί μεγάλη γνώση του αντικειμένου . Βέβαια, αναγκαίο καλό χρήζει ο σωστός συνδιασμός των ερευνών ώστε να βελτιωθεί στο έπακρο η φωτοκαταλυτική δράση. Αυτό σημαίνει ότι η ογκώδης έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής στον τομέα της φωτοκατάλυσης, όπως η κατασκευή διαφορετικών φωτοκαταλυτών διοξειδίου του τιτανίου και η εξέταση της μορφολογίας, της δομής και των φυσικοχημικών του ιδιοτήτων, ενώ παράλληλα άλλοι ερευνητές έχουν εστιάσει στην φωτοχημεία του μηχανισμού αντίδρασης και την σημασία της επιφάνειας του καταλύτη, πρέπει να συνδιαστούν σωστά ώστε να απαντηθούν πολλά ακόμα ερευνητικά ερωτήματα.

Συμπερασματικά, ο βασικός στόχος των μελλοντικών εργασιών και εφαρμογών είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος φωτοκαταλύτη που να μπορεί να υποβαθμίσει και να αποδομήσει ρύπους με την χρήση ορατής και ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι η αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας , η οποία αποτελεί μία άφθονη, ασφαλή και καθαρή μορφή ενέργειας, θα είναι σε θέση να αντιμετωπίζει προβλήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης. Έως τότε, ο δρόμος είναι μεγάλος και απαιτεί πολύ δουλειά, διαθέτει όμως καλές βάσεις και άρτιες προοπτικές.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Ao C.H., S.C. Lee. ,Mak C.L. , Chan L.Y. , 2003 “ Photodegradation of volatile organic compounds (VOCs) and NO for indoor air purification using  $\text{TiO}_2$  : promotion versus inhibition effect of NO” , Applied Catalysis B : Enviromental , 42 , 171-177 ,Elsevier Inc .
- Ao C.H. , S.C. Lee, Zou S.C , Mak C. L . , 2004 “ Inhibition effect of  $\text{SO}_2$  on  $\text{NO}_x$  and VOCs during the photodegradation of synchronous indoor air pollutants at parts per billion (ppbv) level by  $\text{TiO}_2$ ” , Applied Catalysis B : Enviromental , 49 , 187-193 ,Elsevier Inc.

- Ao C.H. , S.C. Lee , 2004 “ Photodegradation of formaldehyde by photocatalyst  $\text{TiO}_2$ : effects on the presences of NO ,  $\text{SO}_2$  and VOCs , Applied Catalysis B : Environmental, 54 , 1-68 ,Elsevier Inc.
- A.P Jones ,1999 , “ Indoor air quality and health” , Atmospheric Environment , 33, 4535-4564 , Elsevier Inc.
- Auvinen Joonas , Wirtanen Leif , 2008 , “The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality ” , Atmospheric Environment , 42 , 4101-4112 , Elsevier Inc.
- Ballari M.M. , Hunger M. , Husken , G. , Brouwers H.J.H. , 2010 , “ Modelling and experimental study of the NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation employing concrete pavement with titanium dioxide ” , Catalysis Today , 151 , 71-76 , Elsevier Inc.
- Bertrand Ruot , Arnaud Plassais , Francois Olive , Laurent Guillot , Laurent Bonafous, 2009 ,  $\text{TiO}_2$  – containing cement pasted and mortars : Measurements of the photocatalytic efficiency using a rhodamine B-based colourimetric test” , Solar Energy , 83 , 1794 – 1801 , Elsevier Inc .
- Binas V.D. , Sambani K. , Maggos T. , Katsanaki A. , Kiriakidis G. , 2012 , “ Synthesis and photocatalytic activity of Mn-doped  $\text{TiO}_2$  nanostructured powdres under UV and visible light ” , Applied Catalysis B : Environmental . 113-114 , 79-86 , Elsevier Inc .
- Carrie A. Redlich , Judy Spacer , Mark R. Cullen ,1997 “Sick-Building syndrome” , The Lancet , 349 , 1013-1016 ,Elsevier Inc.
- Cloteaux A. , Gerardin F. , Thomas D. , Midoux N . Andrea J. C. , 2014 “ Fixed bed photocatalytic reactor for formaldehyde degradation : Experimental and modeling study” , Chemical Engineering Journal , 249 , 121-129 ,Elsevier Inc.
- Chen Jun , Chi-sun Poon , 2009 , “ Photocatalytic construction and building materials : From Fundamentals to applications ” , Building and Environment , 44 ,1899-1906 ,Elsevier Inc.
- Chen Jun, Chi-Sun Poon , 2009 , “ Photocatalytic activity of titaniym dioxide modified concrete materials – Influence of ulilizing recycled glass cullets as aggregates ” , Journal of Environmental Management , 90 , 3436-3442 , Elsevier Inc.

- Demmestere Kristof , Jo Dewuld , Bravo De Witte , Anne Beeldens , Herman Van Langenhove , 2006 , “ Heterogeneous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with  $\text{TiO}_2$ ” , Building and Environment , 43 , 406-414 ,Elsevier Inc.
- Friedlingstein P. , Houghton R.A. , Marland G. , Hackler J. , Boden T.A. , Conway T.J. , Canadell J.G. Raupach M.R. , Ciais P. , Le Quere C. , 2010 , διάφοροι φορείς , [www.nature.com/ngeo/journal/v3/n12/full/ngeo1022.html](http://www.nature.com/ngeo/journal/v3/n12/full/ngeo1022.html) , [12 / 2016 ]
- Fujishima Akira , Tana N. Rao , Donald A. Tryk , 2000 , “ Titanium Dioxide Photocatalysis” , Journal of Photochemistry and Photobiology C : Photochemistry Reviews , 1 , 1-21 , Elsevier Inc.
- Fujishima Akira , Hashimoto K. , Watanabe T. , 1999 , “  $\text{TiO}_2$  Photocatalysis”,Fundamentals and Applications , BKC Inc .
- Fujishima Akira , Zhang Xintong , Donald A. Tryk , 2008 , “  $\text{TiO}_2$  photocatalysis and related surface phenomena ” , Surface Science Reports , 63, 515-582 , Elsevier Inc.
- Hanus J. Monica , Andrew T. Harris , 2013 , “ Nanotechnology innovations for the construction industry” , Progress in Materials Science , 58 , 1056-1102 , Elsevier Inc.
- Herman J. , Piacentini , Ziemke J. , Celarier E. Larko D . , 1995 , διάφοροι φορείς , <http://www.agu.org/journals/jb/> , [ 12 / 2016 ] .
- Hodgson Ernest , 2004 “ A Textbook Of Modern Toxicology” , 3<sup>rd</sup> Edition , A John Wiley & Sons , INC. Publication .
- Ichiura H. , Kitaoka T. , Tanaka H. , 2003 , “ Removal of indoor pollutants under UV irradiation by a composite  $\text{TiO}_2$ -Zeolite sheet prepared using a papermaking technique” , Chemosphere-Environmental Technology, 50 , 79-83, Elsevier Inc .
- Jian Li, Shine Sun , Chenxi Qian , Le He , Kenneth K Chen , Tuqiao Zhanh , Zhonglin Chen , Miaomiao Ye , 2016 , “The Role of adsorption in photocatalytic degradation of ibuprofen under visible light irradiation by BioBr microspheres” , Chemical Engineering Journal , 297 , 139-147 , Elsevier Inc.
- Katsiotis M. , 2011 , “Photocatalytic auto-cleaned building materials” , Catalysis Today , 2 , 93-98 , Elsevier Inc.
- Ki-Hyun Kim , Shamin Ara Jahan , Jong-Tae Lee , 2011 , “Exposure to Formaldehyde and Its Potentials Human Health Hazards” , Journal of

Environmental Science and Health , Part C , 29 , 277-299 , Published by Taylor and Francis Group .

- Kolarik Barbara , Wargocki Pawel m Skorek-Osikowska Anna , Wisthaler Armin, 2010 , “ The effect of a photocatalytic air purifier on indoor air quality quantified using different measuring methods ” , Building and Environment , 45, 1434-1440 , Elsevier Inc.
- Lan Wang , Xu Wang , Jian Yin , Yunqing Zhu , Chuanyi Wang , 2016 , “Silica induced oxygen vacancies in supported mixed-phase TiO<sub>2</sub> for photocatalytic degradation of phenol under visible light irradiation” , Catalysis Communications , 87 , 98-101 , Elsevier Inc.
- Maggos Th.(a) , Bartzis JG , Laikou M. , Gobin C. , 2007 “ Photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>-containing paint: a real scale study” , Journal of Hazardous Materials , 146 , 668-673 , Elsevier Inc.
- Maggos Th. (b),Leva P. , Bartzis J.G. , Vassilakos Ch. Kotzias D . , 2007, “Gas Phase photocatalytic oxidation of VOC using TiO<sub>2</sub>-containing paint : Influence of NO and relative humidity” , 101 , 9 , Elsevier Inc.
- Maggos Th. (c) , Plasais A. , Bartzis J.G . Vasilakos Ch . , Moussiopoulos N. , Bonafous L. , 2007 , “ Photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub> in a pilot street canyon configuration using TiO<sub>2</sub>-mortar panels ” , Environmental Monitoring and Assessment , 136 , 35-44 , Elsevier Inc.
- Mahsa Heidari Dolatabadi , 2013 , “ Properties and Performance of Photocatalytic Concrete ” , Master of Applied Science .
- Mendes A. , Teixeira J.P. , 2014 , “Sick Building Syndrome” , Encyclopedia of Toxicology (Third Edition) , 4 , 256-260 , Elsevier Inc.
- Mills A. , Le Hunte Stephen , 1997 m “ An overview of semiconductor photocatalysis ” , Journal of Photochemistry and Photobiology , 108 , 1-35 , Elsevier Inc.
- Parlalidis Theologos , Tsavé Pinelopi , 2009 , Ministry of National Education and Religious / National Strategic Reference Framework (NSRF) , <https://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/3956/1192.pdf> [ 11 / 2016 ] .
- Per Ivar Ling , Goran Lofroth , Joellen Lewtas , 1987 , “Mutagenic determination of passive smoking ” , Toxicology Letters , 35 , 147-151 , Elsevier Inc.

- Philp B. Richard , 2001 , “Ecosystem and Human Health-Toxicology and Enviromental Hazards” , Lewis Publishers .
- Rotton J. , White S.M. , 1996 , “ Air pollution , the sick building synthrome , and social behavior” , Enviroment International , 22 , 53-60 , Elsevier Inc.
- Salin J.T. , Salkinoja-Salonen , Salin P.J. , Nelo k . , Holma T. , Ohtonen P. , Syrjala , H. , 2016 , “ Building-related symtoms are linked to the in vitro toxicity of indoor fust and airborne microbial propagules in schools : A cross-sectional study ” , Envirionmental Research , 154 , 234-239 , Elsevier Inc.
- Sanchez Florence , Sobolev Konstantin , 2010 , “Nanotechnology in concrete- A Review ” , Construction and Building Materials , 24 , 2060-2071 , Elsevier Inc.
- Santamouris M. , , 2006 , “ Enviromental Design Of Urban Building : An Intergrated Approach” , Published by Taylor and Francis Group .
- Shihui Shen , Burton Maria , Jobson Bertram , HaselBach Liv , 2012 , “ Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greender urban road environment ” , Construction and Building Materials , 35 , 874-883 , Elsevier Inc.
- Shiraishi Fumihide , Daisuke Ohkubo , Toyoda Kentaro , Yamaguchi Shunsuke, 2005 , “ Decomposition of gaseous formaldehyde in a photocatalytic reactor with a parallel array of light sources : 1. Fundamental experiment for reactor design ” , Chemical Engineering Journal , 114 , 153-159 , Elsevier Inc.
- Shiraishi Fumihide , Nomura Takeshi , Yamaguchi Shunsuke , Ohbuchi Yusuke, 2007 , “ Rabid removal of trave HCHO from indoor air by an air purifier consisting of a continuous concentrator and photocatalytic reactor and its computer simulation ” , Chemical Engineering Journal , 127 . 157-165 , Elsevier Inc.
- Strini A. , Caccese S. , L. Schiavi . , 2005 , “ Measurement of benzene , toluene, ethylbenzene and o-xylene gas phase photodegradation by titanium dioxide dispered in cementitious materials using a mixed flow reactor ” , , Applied Catalysis B : Envirionmental , 61 , 90-97 , Elsevier Inc.
- Tsirigotaki E. , 2011 , “ The Titanium dioxide  $TiO_2$  as photocatalyst and its application to construction materials” .

- Tsoukleris D.S. , Maggos Th. , Vassilakos C. , Falaras P. , 2007 , “ Photocatalytic degradation of volatile organics on TiO<sub>2</sub> emmbedded glass spherules ” , Catalysis Today , 129 , 96-101, Elsevier Inc.
- Vallero A. Daniel , 2003 , “ Enineering the Risks of Hazardous Wastes” , Elsevier Inc .
- Wan-Je Jo , Jang-Yeul Sohn , 2009 , “ The effect of environmental and structural factors on indoor air quality of apartments in Korea ” , Building and Enviroment , 44 , 1794-1802 , Elsevier Inc.
- Wayne G. Landis , Yu Ming-Ho , 2003 , “ Enviromental Toxicology- Impacts of Chemicals Upon Ecological Systems” , Lewis Publishers .
- Xekoukoulotakis P. Nikolaos , Xinidis Nikolaos , Maria Chroni , Dionissios Mantzavinos , Danae Venieri , Evroula Hapeshi , Sespo Fatta-Kassinos , 2010, “UV-A/ TiO<sub>2</sub>”photocatalytic decomposition of erythromycin in water : Factors affecting mineralization and antibiotic activity” , Catalysis Today , 151 , 29-33, Elsevier Inc.
- Yu Ming-Ho , Humio Tsunoda , Masashi Tsunoda , 2011 , “Enviromental Toxicology-Biological and Health Effects Of Pollutants” , Published by Taylor and Francis Group .
- Yu Gong , Yijie Wei , Jinghui Cheng , Tianyao Jiang , Ling Chen , Bin Xu , 2016, “Health risk assessment and personal exposure to Votalite Organic Compounds ( VOCs) in metro Carriages-A case study in Shanghai, China ” , Science of The Total Environment , 574 , 1432-1438 , Elsevier Inc.
- Zhang Kai , Shuhang Ren , Yucui Hou , Weize Wu , 2016 , “ Efficient absorption of SO<sub>2</sub> with low-partial pressures by environmentally benign fuctional deep eutectic solvents ” , Journal of Hazardous Materials , 324 , 457-463 , Elsevier Inc.
- Zhao Yu , Jung-Hoon Sohn , Jonathan R. Warner , 2003 , “ Autoregulation in the Biosynthesis of Ribosomes” , Molecular and Cellular Biology , 23 , 699-707 , American Society For Microbiology .