



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟ
ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ**

Χρυσάνθη Μακρή

Μηχανικός Περιβάλλοντος

Εξεταστική επιτροπή:

Ευάγγελος Γιδαράκος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Νικόλαος Ξεκουκουλωτάκης, Επίκουρος Καθηγητής

Ιωάννης Γεντεκάκης, Καθηγητής

Χανιά, 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τελευταίες δεκαετίες χαρακτηρίζονται από μια ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη, η οποία έχει οδηγήσει στην συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση προϊόντων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΗΗΕ). Συνεπώς, η παραγωγή πληθώρας νέων προϊόντων αυτού του τομέα, με ιδιαιτέρως πολύπλοκη δομή και σύσταση, κρίθηκε αναγκαία για την εξυπηρέτηση της αγοράς. Το αποτέλεσμα όμως της αυξημένης κατανάλωσης προϊόντων ΗΗΕ είναι η σημαντική άνοδος του ρεύματος αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), η οποία δημιουργεί την ανάγκη για ανάδειξη νέων τεχνικών και μεθόδων διαχείρισης αυτού.

Τα ΑΗΗΕ αποτελούνται από μεγάλη ποικιλία υλικών, ενώ αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το 20% του βάρους τους απαρτίζεται από πλαστικά μέρη. Το πλαστικό, ως απόβλητο δύναται να αποτελέσει σημαντικό περιβαλλοντικό κίνδυνο, καθώς είναι μη βιοδιασπώμενο. Μάλιστα, πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ η χρήση πλαστικού σε όλους τους τομείς έχει διευκολύνει την καθημερινή ζωή, πρόσφατα έχει δημιουργήσει παγκόσμια ανησυχία στην επιστημονική κοινότητα, καθώς πλαστικά και μικροπλαστικά ανιχνεύονται όχι μόνο στην επιφάνεια και τον βυθό των θαλασσών, αλλά ακόμα και στο αλάτι που καταναλώνουμε.

Μέχρι σήμερα, τόσο σε ερευνητικό, όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο έχουν μελετηθεί εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης του πλαστικού, μεταξύ των οποίων η μηχανική ανακύκλωση, η θερμική και ενεργειακή αξιοποίησή του, καθώς και η επαναχρησιμοποίησή του στον κατασκευαστικό τομέα. Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου διαχείρισης εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, τις ανάγκες χρήσης των αντίστοιχων τελικών προϊόντων, καθώς και από οικονομικούς παράγοντες.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τσιμεντοκονιάματος με μερική αντικατάσταση των αδρανών με πλαστικό, το οποίο προήλθε από απόβλητα οθονών ηλεκτρονικών υπολογιστών. Χρησιμοποιήθηκε δείγμα από δεκατέσσερις οθόνες, των οποίων τα πλαστικά περιβλήματα χαρακτηρίστηκαν ως προς τη σύστασή τους (στοιχειακή ανάλυση, θερμογόνος δύναμη, ολική χώνευση, φασματοσκοπία υπέρυθρου). Για την σύνθεση του τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκε πλαστικό από πολυμερές ακρυλονιτρίλιο – βουταδιένιο – στυρόλιο (ABS), καθώς απαντάται συχνότερα στα ΗΗΕ, σε ποσοστό περίπου 30%. Τα ποσοστά

αντικατάστασης των αδρανών ήταν 2.5, 5, 7.5, 10 και 12.5% αντίστοιχα, ενώ διατηρήθηκε σταθερός λόγος νερού προς τσιμέντο σε όλες τις δοκιμές. Στην συνέχεια εξετάστηκαν βασικές ιδιότητες των κονιαμάτων, οι οποίες περιλαμβάνουν τη θλιπτική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, την πυκνότητα, το πορώδες και την υδατοαπορροφητικότητα.

Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά για όλες τις αναλογίες αντικατάστασης, και ιδιαίτερα για τα δοκίμια με 7.5 και 10% πλαστικό ως αντικαταστάτη των αδρανών. Στα συγκεκριμένα ποσοστά παρατηρήθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής, κατά 15.4 και 7.8%, αντίστοιχα, ενώ το μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε και στις δυο περιπτώσεις κατά 18.1 και 23.8%, αντίστοιχα. Επίσης, η διακύμανση των μετρούμενων φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων (πυκνότητα, πορώδες, υδατοαπορροφητικότητα) συνάδει με τα αποτελέσματα της αντοχής και της ελαστικότητάς τους, υποδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε θλίψη, αλλά χαμηλότερη ολκιμότητα από το τσιμεντοκονίαμα αναφοράς. Ως εκ τούτου, η χρήση των πλαστικών στον κατασκευαστικό τομέα, ως αντικαταστάτες αδρανών, δύναται να αποτελέσει μια ικανοποιητική μέθοδο επαναχρησιμοποίησης των πλαστικών ΑΗΗΕ, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της ορθής διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων.

ABSTRACT

Over the last few decades the rapid technological development that has emerged has led to the ever-increasing demand for electrical and electronic equipment (EEE). Consequently, the production of new products in this sector, with a particularly complex structure and composition, was deemed necessary to serve the market. However, the result of the increased consumption of EEE products is a significant increase in waste of electrical and electronic equipment (WEEE), which creates the need for new techniques and methods of management.

WEEE consists of a wide variety of materials, while it is remarkable that 20% of their weight consists of plastic parts. Plastic, as waste, can be a significant environmental hazard because it is not biodegradable. In fact, while the use of plastic in all areas has facilitated everyday life, it has recently created a global concern in the scientific community, as plastics and microplastics are detected not only on the surface and bottom of the seas, but also on the salt we consume.

To date, alternative ways of managing plastic wastes have been studied in both research and industrial level, which includes mechanical recycling, thermal and energy recovery, as well as its re-use in the construction sector. The selection of each method mainly depends on the wastes' characteristics, the need for use of the respective end products, as well as economic factors.

In the present study, the physical and mechanical properties of cement mortars were studied by partially replacing the aggregates with plastic, derived from computer screens' waste. Samples from fourteen screens were used, the plastic shells of which were characterized in terms of their composition (elemental analysis, calorific value, total digestion, infrared spectroscopy). Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) polymer was used to synthesize the cement mortar, as it is the most commonly found plastic in EEE, at a ratio around 30%. The replacement rates of aggregates were 2.5, 5, 7.5, 10 and 12.5%, while maintaining a constant water to cement ratio in all tests. Basic properties of mortars were also examined, which include compressive strength, modulus of elasticity, density, porosity and water absorption.

The results obtained were quite encouraging for all replacement ratios, especially for the 7.5 and 10% plastic replacement of the specimens. These percentages showed an increase in the compressive strength by 15.4 and 7.8%, respectively, while the elastic

modulus decreased in both cases by 18.1 and 23.8%, respectively. Also, the variance of the other measured physical properties of the specimens (density, porosity, water absorption) is consistent with the results of their strength and elasticity, thus indicating greater strength but lower ductility than the reference cement specimen. Hence, the use of plastics in the construction sector as substitutes for aggregates may be a satisfactory method of reusing plastics from WEEE, contributing to the reinforcement of the right management of hazardous waste.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας της παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με στήριξαν και συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και κυρίως κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο έρευνας και η συνεχής καθοδήγησή του συνέβαλαν στην ορθή περάτωση της προκείμενης διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Ξεκουκουλωτάκη και τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Γεντεκάκη, που ως μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής αφιέρωσαν χρόνο στη μελέτη και αξιολόγηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στα μέλη του Εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών & Επικινδύνων Αποβλήτων, της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την εξαιρετική συνεργασία και στήριξη που μου έδειξαν. Συγκεκριμένα, στις υποψήφιες διδάκτορες Βασιλική Σαββιλωτίδου, Αθανασία Κουσαίτη και Κατερίνα Βαλουμά, που βρίσκονταν συνεχώς δίπλα μου και με τις συμβουλές τους με βοήθησαν να φέρω εις πέρας την παρούσα διατριβή.

Επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη, από το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων και την Maria-Liliana Saru, από το Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών, για την άψογη συνεργασία και συνεισφορά τους στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στους φίλους μου που είναι πάντα στο πλευρό μου και με την ψυχολογική τους στήριξη με βοηθάνε να προχωράω μπροστά.

Τέλος, πάνω από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που βρίσκονται πάντα δίπλα μου με τις συμβουλές τους και την αμέριστη στήριξή τους σε όλες μου τις αποφάσεις, βοηθώντας με να αντιμετωπίζω κάθε δυσκολία με αισιοδοξία και χαμόγελο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	4
2.1. Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)	4
2.2. Πλαστικά στα ΑΗΗΕ	7
2.3. LCD οθόνες και πλαστικά.....	12
2.4. Τρόποι διαχείρισης πλαστικού	14
2.5. Χρήση πλαστικού σε τσιμεντοκονιάματα/σκυρόδεμα.....	16
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	21
3.1. Στόχος πειραματικής διαδικασίας	21
3.2. Μεθοδολογία.....	22
3.3. Χαρακτηρισμός σύστασης πλαστικών	25
3.3.1. Θερμογόνος δύναμη.....	25
3.3.2. Στοιχειακή ανάλυση.....	26
3.3.3. Χώνευση – Ανάλυση δειγμάτων	28
3.3.4. Φασματοσκοπία υπερύθρου (IR)	31
3.4. ΧΡΗΣΗ πλαστικού σε τσιμεντοκονιάματα.....	33
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	37
4.1. Χαρακτηρισμός της σύστασης των πλαστικών αποβλήτων	37
4.1.1. Θερμογόνος δύναμη.....	37
4.1.2. Στοιχειακή ανάλυση.....	38
4.1.3. Χώνευση – Ανάλυση δειγμάτων	40
4.1.4. Φασματοσκοπία υπερύθρου (IR)	42
4.2. Εφαρμογή πλαστικού σε κονιάματα	45
Θλιπτική αντοχή	47
Μέτρο ελαστικότητας.....	50
Πορώδες, πυκνότητα, υδατοαπορροφητικότητα	50
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	55
Προτάσεις μελλοντικής έρευνας	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Ενδεικτικό ρεύμα αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.....	4
Εικόνα 2: Ποσοστιαία σύσταση των ΑΗΗΕ (Ma et.al., 2016).....	7
Εικόνα 3: Κατανομή πλαστικών στους διάφορους τομείς χρήσης του (Plastics Europe, 2017).	8
Εικόνα 4: Ποσοστιαία κατανομή πλαστικών στον ΗΗΕ (Yang et.al., 2013).....	10
Εικόνα 5: Μοριακή δομή ABS (omnexus.specialchem.com).....	11
Εικόνα 6: Διάταξη στρωμάτων οθόνης LCD (Amato et.al., 2017).	12
Εικόνα 7: Σύσταση οθόνης LCD (Vanegas et.al., 2017). (PWB: Printed Wiring Board, SSB: Small Signal Board, T-CON: Timing Controller, PPO: PolyPhenylene Oxide, PMMA: Poly Methyl MethAcrylate, FR(P): Phosphorous Flame Retardants, FR(Br): Brominated Flame Retardants).....	13
Εικόνα 8: Σύσταση τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος.....	17
Εικόνα 9: Δείγματα πλαστικών από οθόνες LCD που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.....	22
Εικόνα 10: Τεμαχισμός πλαστικών δειγμάτων.....	23
Εικόνα 11: Δείγματα προς ξήρανση.	23
Εικόνα 12: Θερμιδόμετρο AC-350 της LECO, Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων.	25
Εικόνα 13: Τυπική διάταξη θερμιδομέτρου.....	26
Εικόνα 14: α)Στοιχειακός αναλυτής EuroVector, β)Ειδικός υποδοχέας δειγμάτων, γ)Κάψες κασσίτερου.	27
Εικόνα 15: Διαδικασία λειτουργίας στοιχειακού αναλυτή.....	28
Εικόνα 16: α)Ειδικά δοχεία (vessels), β) Vessels τοποθετημένα στη σωστή σειρά μέσα στον εργαστηριακό φούρνο, γ)Ειδικός εργαστηριακός φούρνος MARS 6 Microwave Reactor System CEM, δ)Διηθημένα δείγματα μετά την ολοκλήρωση της χώνευσης.	29
Εικόνα 17: Διάταξη οργάνου ICP – MS.....	30
Εικόνα 18: Βασικοί τύποι δονήσεων τάσης και κάμψης των μοριακών δομών (Κουή κ.α., 2015).....	32
Εικόνα 19: Αναπαράσταση της λειτουργίας φασματοφωτόμετρου FTIR (Κουή κ.α., 2015).33	
Εικόνα 20: α)Ασβεστολιθική άμμος, β)Τσιμέντο CEM II/A-m 42.5N, γ)Πλαστικό ABS, δ)Νερό.	34
Εικόνα 21: Μήτρα τετραγωνικών δοκιμών διαστάσεων 5×5×5 cm.....	35
Εικόνα 22: : Εργαστηριακός αναδευτήρας.....	35
Εικόνα 23: α)Πρέσα τύπου MTS – 815, β) Δοκίμια μετά την θλίψη.....	36
Εικόνα 24: Δοχείο για την μέτρηση του πορώδους, της πυκνότητας και της υδατοαπορροφητικότητας.....	36

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ποσότητες ΗΗΕ που διοχετεύθηκαν στην αγορά της Ελλάδας, συλλέχθηκαν, επεξεργάστηκαν και ανακτήθηκαν, επαναχρησιμοποιήθηκαν ή ανακυκλώθηκαν για τα έτη 2005 – 2015 (Eurostat, 2018)	5
Διάγραμμα 2: Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη. Με πορτοκαλί αναφέρονται οι διεργασίες χαρακτηρισμού των πλαστικών δειγμάτων.....	24
Διάγραμμα 3: Συγκέντρωση μετάλλων στα υπό εξέταση πλαστικά δείγματα.	41
Διάγραμμα 4: Εύρος συγκεντρώσεων μετάλλων στα εξεταζόμενα δείγματα, για συγκεντρώσεις έως 50 mg/kg. (Mg: μαγνήσιο, Si: πυρίτιο, Ti: τιτάνιο, Fe: σίδηρος, Zn: ψευδάργυρος, Sn: κασσίτερος Sb: αντιμόνιο, Al: αργίλιο).....	41
Διάγραμμα 5: Εύρος συγκεντρώσεων μετάλλων στα εξεταζόμενα δείγματα, για συγκεντρώσεις έως 1.20 mg/kg. (V: βανάδιο, Cr: χρώμιο, Cu: χαλκός, Pb: μόλυβδος, Sn: κασσίτερος)	42
Διάγραμμα 6: Φάσμα απορροφήσεων για τα ABS πλαστικά δείγματα. (LCD_2, LCD_4, LCD_5, LCD_9, LCD_10, LCD_11).....	43
Διάγραμμα 7: Φάσμα απορροφήσεων για τα ABS/PC+HIPS πλαστικά δείγματα. (LCD_3, LCD_6, LCD_12, LCD_13).....	44
Διάγραμμα 8: Φάσμα απορροφήσεων για το ABS/HIPS δείγμα. (LCD_14).....	44
Διάγραμμα 9: Φάσμα απορροφήσεων για τα ABS/PC πλαστικά δείγματα. (LCD_1, LCD_7, LCD_8).....	45
Διάγραμμα 10: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου και πλαστικών αποβλήτων.	46
Διάγραμμα 11: Θλιπτική αντοχή δοκιμίων για τις αναλογίες αντικατάστασης, σε 7 και 28 ημέρες.	48
Διάγραμμα 12: Αποτελέσματα πορώδους για τα δείγματα των 28 ημερών ωρίμανσης.	52
Διάγραμμα 13: Αποτελέσματα υδατοαπορροφητικότητας των δειγμάτων στις 28 ημέρες ωρίμανσης.	52
Διάγραμμα 14: Αποτελέσματα πυκνότητας των δειγμάτων, για 28 ημέρες ωρίμανσης.	53

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Συνολική παραγωγή ΑΗΗΕ ανά ήπειρο (Kumar et.al., 2017).	5
Πίνακας 2: Κατηγορίες πλαστικού που χρησιμοποιούνται στον ΗΗΕ(Yang et.al., 2013; Ma et.al., 2016).....	9
Πίνακας 3: Ονομασία και κατηγορία πλαστικού των εξεταζόμενων δειγμάτων.	23
Πίνακας 4: Ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.	35
Πίνακας 5: Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης.....	37
Πίνακας 6: Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης των δειγμάτων.	38
Πίνακας 7: Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης παλαιότερων ερευνών.	39
Πίνακας 8: Συγκεντρώσεις ασβεστίου στα εξεταζόμενα πλαστικά δείγματα.	42
Πίνακας 9: Χημική σύσταση τσιμέντου CEM II/A-m 42.5 N (Τάσσοι Χ., κ.α., 2018).	46
Πίνακας 10: Τιμές θλιπτικής αντοχής δοκιμίων για τις εξεταζόμενες αναλογίες αντικατάστασης, στις 7 και 28 ημέρες ωρίμανσης.....	48
Πίνακας 11: Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας των εξεταζόμενων δειγμάτων για 7 και 28 ημέρες ωρίμανσης.	50

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχεία ανάπτυξη στην επιστήμη των υλικών, τις παραγωγικές διαδικασίες και τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα έχουν δημιουργήσει μια καινούργια παγκόσμια αγορά, με βασικό της γνώρισμα την εύκολη διάδοση της τεχνολογίας στους καταναλωτές. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει σημειωθεί τεράστια πρόοδος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της τεχνολογίας πληροφοριών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της παραγωγής αυτού του είδους καταναλωτικών αγαθών. Η πρόκληση που δημιουργείται όμως από αυτό το φαινόμενο αφορά την ορθή διαχείριση αυτού του καινούργιου ρεύματος αποβλήτων, με τεχνικές οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον.

Η σημαντικότητα των ΑΗΗΕ έγκειται στην πολυπλοκότητα της σύστασής τους και την υψηλή ποσότητα παραγωγής τους, η οποία εκτιμάται πως θα ξεπεράσει τους 50 εκατομμύρια τόνους έως τα τέλη του 2018 (*Kumar et.al., 2017; Parajuly et.al., 2017*). Η σύνθεση των ΑΗΗΕ περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία υλικών, μερικά από τα οποία είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, ενώ άλλα δύναται να ανακτηθούν ή να ανακυκλωθούν, ώστε να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα ως πρώτες ύλες. Το σίδερο είναι το κυρίαρχο υλικό, καθώς καταλαμβάνει περίπου το 50% της σύστασης των ΑΗΗΕ, ενώ ακολουθούν τα πλαστικά με ή χωρίς επιβραδυντικά φλόγας, ο χαλκός, το γυαλί και το αλουμίνιο (*Ma et.al., 2016*).

Τα πλαστικά αποτελούν ένα ρεύμα αποβλήτων που μελετάται ιδιαίτερα, καθώς η ορθή διαχείρισή τους κρίνεται επιτακτική για την αποφυγή ρύπανσης του περιβάλλοντος. Στα ΑΗΗΕ, το κλάσμα των πλαστικών καταλαμβάνει περίπου το 20% της συνολικής σύστασής τους, ενώ αποτελείται από πολλά διαφορετικά είδη πολυμερών, τα οποία κατά κύριο λόγο εντάσσονται στην κατηγορία των θερμοπλαστικών. Το πλεονέκτημα των θερμοπλαστικών υλικών είναι πως η διαδικασία σχηματισμού τους είναι αντιστρεπτή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μία φορές (*Kutz, 2015*).

Η διαχείριση του πλαστικού κλάσματος ΑΗΗΕ έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους ερευνητές, καθώς δεν αποτελεί μια εύκολη διαδικασία και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Η δυσκολία της έγκειται στην ύπαρξη περισσότερων από 15 τύπων πολυμερών στο

ίδιο ρεύμα αποβλήτων, αλλά και στην παρουσία επιβραδυντών φλόγας, οι οποίοι δύναται να απελευθερώσουν επικίνδυνα για την υγεία αερία (*Taurino et.al., 2010*). Οι διεργασίες ανακύκλωσης που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν την μηχανική ανακύκλωση, την ενεργειακή αξιοποίηση και την χημική τροποποίηση των πλαστικών, καθώς και την χρήση τους ως πληρωτικά υλικά στον κατασκευαστικό τομέα (*Saikia & de Brito, 2012*). Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γίνεται κατά κύριο λόγο βάσει των χαρακτηριστικών των αποβλήτων.

Η χρήση πλαστικού στον κατασκευαστικό τομέα είναι μια μέθοδος επαναχρησιμοποίησης που συμβάλει σημαντικά στην μείωση των απορριπτόμενων αποβλήτων. Η χημική σταθερότητα των θερμοπλαστικών σε αλκαλικά διαλύματα, τα οποία προσομοιώνουν το περιβάλλον του σκυροδέματος, αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους που η έρευνα σε αυτόν τον τομέα έχει εξελιχθεί (*Manjunath, 2016*). Πιο συγκεκριμένα, τα πλαστικά χρησιμοποιούνται ως αντικαταστάτες των αδρανών στην κατασκευή σκυροδέματος και κονιαμάτων, και εξετάζεται ο βαθμός που επηρεάζουν τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών. Από τις μελέτες που έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα, φαίνεται πως μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεισφέροντας στην αύξηση των αντοχών αλλά και στην ενίσχυση των ιδιοτήτων των δοκιμών (*Gu & Ozbakkaloglu, 2016*).

Έτσι, η παρούσα εργασία ασχολείται με την μελέτη της χρήσης πλαστικών αποβλήτων από απόβλητες οθόνες LCD, ως αδρανή στην παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων. Αρχικά, συλλέχθηκαν δείγματα που περιείχαν διάφορες προσμίξεις πολυμερών, όπως ABS (Ακρυλονιτρίλιο – Βουταδιένιο – Στυρόλιο), PC (Πολυανθρακικό) και HIPS (Πολυστυρένιο υψηλής αντοχής). Έπειτα προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες των πλαστικών δειγμάτων, όπως η θερμογόνος δύναμη, η στοιχειακή τους ανάλυση, η περιεκτικότητά τους σε μέταλλα και η διερεύνηση της δομής των οργανικών ενώσεων που εμπεριέχουν. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε η χρήση του ABS, το οποίο εμφανίζεται συχνότερα στα ΑΗΗΕ με ποσοστό μεγαλύτερο του 30%, για να αντικαταστήσει μερικώς τα αδρανή υλικά (άμμος) του κονιάματος, και εξετάστηκαν οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες αυτού (θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, πορώδες, πυκνότητα, υδατοαπορροφητικότητα).

Συνοπτικά, στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται αναφορά στις ποσότητες πλαστικών αποβλήτων που παράγονται σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο,

τα είδη και τις κατηγορίες που συναντώνται σε αυτό το ρεύμα, καθώς και τις τεχνικές διαχείρισης που χρησιμοποιούνται για την ανακύκλωσή τους. Έπειτα, στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή και η ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας που μελετήθηκε, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα αυτής. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και προτείνονται ζητήματα για μελλοντική μελέτη πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ (ΑΗΗΕ)

Οι τελευταίες δύο δεκαετίες χαρακτηρίζονται από μια ταχεία τεχνολογική και οικονομική ανάπτυξη παγκοσμίως, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χρήσης και της πολυπλοκότητας του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΗΗΕ). Σημαντική συνέπεια αυτής, είναι η ποσότητα των αποβλήτων που προκύπτουν μετά το πέρας της ζωής των προϊόντων αυτών, η οποία τείνει να αυξάνεται περίπου 3 – 5% ετησίως (Eurostat; <https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/weee>).

Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) αποτελούνται συνήθως από μονάδες ηλεκτρονικών υπολογιστών, τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα, ψυγεία, πλυντήρια και πολλά ακόμη προϊόντα, αναγκαία πλέον σε καθημερινή βάση. Μερικά από αυτά φαίνονται στην Εικόνα 1. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός πως αποτελούν το ταχύτερα αναπτυσσόμενο ρεύμα αποβλήτων της Ευρώπης, με ποσότητες που προβλέπεται να φτάσουν τα 12 εκατομμύρια τόνους το έτος 2020 (Eurostat). Το ίδιο υψηλή είναι η παραγωγή των ΑΗΗΕ και σε παγκόσμια κλίμακα, με ρυθμούς τριπλάσιους από οποιοδήποτε άλλο ρεύμα αποβλήτων και ποσότητες που εκτιμάται πως θα φθάσουν περίπου τους 50 εκατομμύρια τόνους μέχρι το τέλος του 2018, σημειώνοντας έτσι αύξηση κατά 50% συγκριτικά με τις παραγόμενες ποσότητες του έτους 2010 (Kumar et.al., 2017; Parajuly et.al., 2017). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ποσότητες αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού ανά ήπειρο.



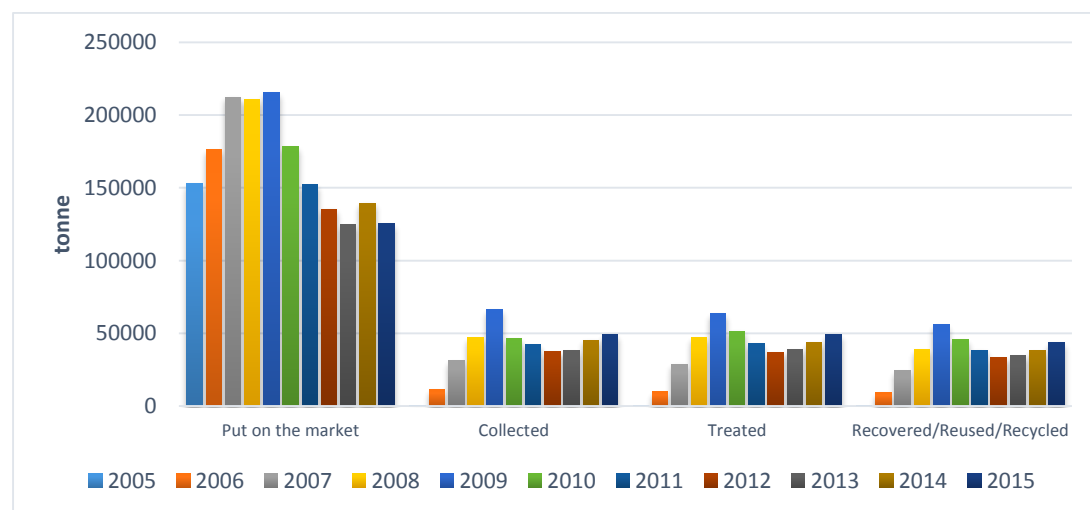
Εικόνα 1: Ενδεικτικό ρεύμα αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Στην Ελλάδα τα ΑΗΗΕ έχουν προσδιοριστεί από την νομοθεσία ως ρεύμα αποβλήτων προτεραιότητας, λόγω της επικινδυνότητάς τους, της ταχείας αύξησης του όγκου τους και των σημαντικών επιπτώσεων που προκαλούν στο περιβάλλον. Η ετήσια παραγωγή τους σε εθνικό επίπεδο εκτιμάται στους 170.000 τόνους, αποτελώντας έτσι περίπου το 4% των παραγόμενων αστικών αποβλήτων, ενώ έχει υπολογιστεί πως το 56% του συνόλου της παραγωγής είναι οικιακά ΑΗΗΕ και το υπόλοιπο 44% είναι εμπορικά. (Ελληνική Εταιρία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, ΕΕΔΣΑ; <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=63>).

Πίνακας 1: Συνολική παραγωγή ΑΗΗΕ ανά ήπειρο (Kumar et.al., 2017).

Ήπειρος	Ποσότητα (εκατομμύρια τόνοι)
Αφρική	1.9
Αμερική	11.7
Ασία	16.0
Ευρώπη	11.6
Αυστραλία	0.6

Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat οι ποσότητες ΗΗΕ που διοχετεύθηκαν στην αγορά της Ελλάδας, συλλέχθηκαν, επεξεργάστηκαν και ανακτήθηκαν, επαναχρησιμοποιήθηκαν ή ανακυκλώθηκαν για τα έτη 2005 – 2015 παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1: Ποσότητες ΗΗΕ που διοχετεύθηκαν στην αγορά της Ελλάδας, συλλέχθηκαν, επεξεργάστηκαν και ανακτήθηκαν, επαναχρησιμοποιήθηκαν ή ανακυκλώθηκαν για τα έτη 2005 – 2015 (Eurostat, 2018; http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselee&lang=en).

Στο διάστημα 2005 έως 2009 παρατηρείται μια ετήσια αύξηση στην ποσότητα των ΗΗΕ που κυκλοφόρησαν στην αγορά κατά 62.262 τόνους, με μέγιστο τους 215.320 τόνους, ενώ τα μετέπειτα χρόνια η ποσότητα αυτή μειώνεται και φθάνει τους 125.136 τόνους το 2015. Η συλλογή των συσκευών ανέρχεται περίπου στο 40%, ενώ η επεξεργασία τους ως απόβλητα πλέον με πιστοποιημένες μεθόδους πραγματοποιείται για το σύνολο σχεδόν των συλλεχθέντων ποσοτήτων.

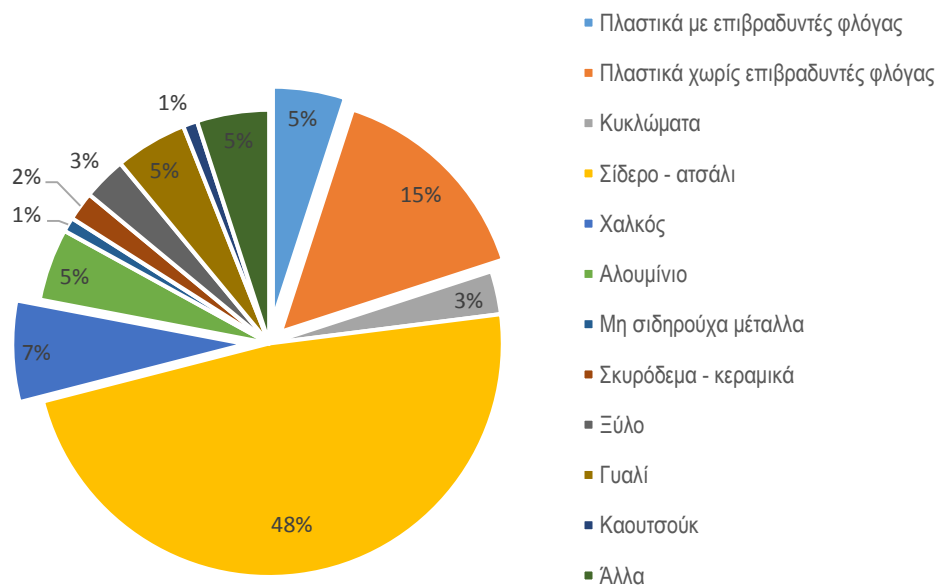
Όπως είναι γνωστό, υφίσταται μεγάλη πληθώρα προϊόντων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο εμπόριο που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών. Μετά το πέρας της χρήσης τους τα προϊόντα αυτά αποτελούν απόβλητα, τα οποία χρήζουν ορθής διαχείρισης. Για την διευκόλυνση της διαχείρισής τους τα είδη του ΗΗΕ κατατάσσονται, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/96/EC στις παρακάτω 10 διακριτές κατηγορίες προϊόντων, με βάση την πηγή προέλευσής τους:

1. Μεγάλες οικιακές συσκευές
2. Μικρές οικιακές συσκευές
3. Εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών
4. Καταναλωτικά είδη
5. Φωτιστικά είδη
6. Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εργαλεία (εξαιρουμένων των μεγάλης κλίμακας σταθερών βιομηχανικών εργαλείων)
7. Παιχνίδια και εξοπλισμός ψυχαγωγίας και αθλητισμού
8. Ιατροτεχνολογικά προϊόντα (εξαιρουμένων των εμφυτεύσιμων και μολυσμένων)
9. Όργανα παρακολούθησης και ελέγχου
10. Συσκευές αυτόματης διανομής

Οι παραπάνω κατηγορίες χωρίζονται σε 97 περαιτέρω υποκατηγορίες, όπως προβλέπει το Προεδρικό Διάταγμα 117/2004, καλύπτοντας έτσι σχεδόν όλο το φάσμα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.

Τα ΑΗΗΕ αποτελούν ένα σύνθετο μείγμα υλικών και εξαρτημάτων, μερικά από τα οποία είναι τοξικά και επικίνδυνα και μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά περιβαλλοντικά και υγειονομικά προβλήματα. Παράλληλα όμως, υπάρχουν και άλλα συστατικά, όπως μέταλλα και πλαστικά, τα οποία είναι χρήσιμα ή πολύτιμα και δύναται

να ανακτηθούν και να ανακυκλωθούν ώστε να εξοικονομηθούν σημαντικές ποσότητες πρώτων υλών και ενέργειας. Η ποσοστιαία σύσταση του ρεύματος ΑΗΗΕ αποτελείται κατά κύριο λόγο από σίδηρο και ατσάλι, καθώς τα υλικά αυτά καλύπτουν το μισό περίπου του ολικού βάρους των αποβλήτων, ενώ ακολουθούν τα πλαστικά, τα οποία ανιχνεύονται σε ποσοστό περίπου 20% (Damal *et.al.*, 2015). Άλλα υλικά που συναντώνται στα ΑΗΗΕ είναι το γυαλί, το αλουμίνιο, ο χαλκός και πολλά ακόμη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Ποσοστιαία σύσταση των ΑΗΗΕ (Ma *et.al.*, 2016).

2.2. ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΤΑ ΑΗΗΕ

Το πλαστικό ορίζεται ως ένα πετροχημικό προϊόν, ένα τεχνητό υλικό μακρομοριακής δομής, από το οποίο μπορούν να ανακτηθούν οι πρώτες ύλες δημιουργίας του, υπό τις κατάλληλες συνθήκες (Ma *et.al.*, 2016). Αποτελεί ένα υλικό χαμηλού κόστους, με εύκολη μεταποίηση και ανθεκτικότητα, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πληθώρας προϊόντων, με ποσότητες που αγγίζουν τους 335 εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως και τους 60 εκατομμύρια τόνους σε ευρωπαϊκό επίπεδο (Plastics Europe, 2017).

Η χρήση του πλαστικού συναντάται σε πολλούς τομείς, όπως στις συσκευασίες, στην γεωργία, στις κατασκευές και στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή του πλαστικού στις προαναφερθείσες δραστηριότητες, με τις συσκευασίες να αποτελούν τον βασικό τομέα χρήσης του με ποσοστό κοντά στο 40%, ακολουθούμενο από τις κατασκευές, την αυτοκινητοβιομηχανία και τον ΗΗΕ (6.2%).



Εικόνα 3: Κατανομή πλαστικών στους διάφορους τομείς χρήσης του (Plastics Europe, 2017).

Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού απαρτίζονται κατά 20% από πλαστικά, από τα οποία το 5% είναι σε συνδυασμό με επιβραδυντικά φλόγας (Εικόνα 2). Τα είδη του πλαστικού που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ΗΗΕ ανήκουν κατά κύριο λόγο στην κατηγορία των θερμοπλαστικών και επιλέγονται βάσει των χαρακτηριστικών τους αλλά και των επιθυμητών προς παραγωγή προϊόντων. Τα θερμοπλαστικά είναι υλικά που όταν θερμαίνονται διατηρούν μια ρευστή κατάσταση και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν στα διάφορα επιθυμητά προϊόντα, ενώ με την ψύξη τους σκληραίνουν και διατηρούν το σχήμα τους. Το πλεονέκτημα των θερμοπλαστικών είναι πως η παραπάνω διεργασία σχηματισμού τους είναι αντιστρεπτή και μπορούν να θερμανθούν κατ' επανάληψη, επιτρέποντας έτσι την χρήση τους για περισσότερες από μία φορές (Kutz, 2015; Plastics Europe, 2017).

Στον Πίνακα 2 παρατίθενται οι κατηγορίες των πλαστικών που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την κατασκευή ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού και συνεπώς

συναντώνται και στα απόβλητα αυτού, ενώ στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η ποσοστιαία συνδρομή τους στα απόβλητα του ΗΗΕ.

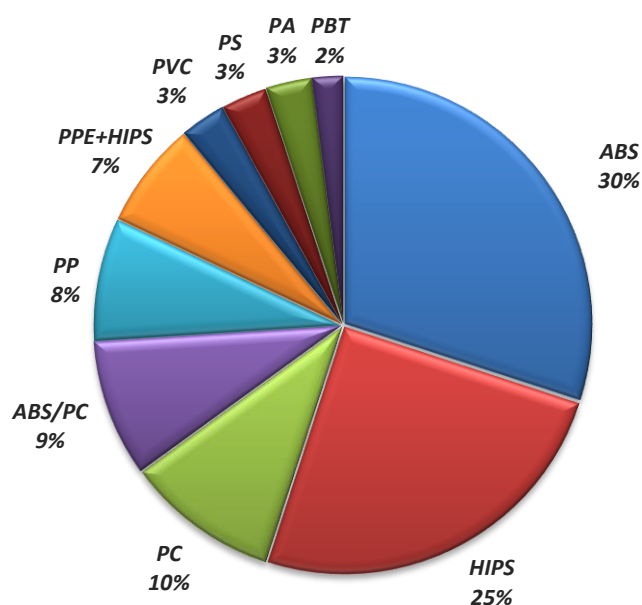
Πίνακας 2: Κατηγορίες πλαστικού που χρησιμοποιούνται στον ΗΗΕ (Yang et.al., 2013; Ma et.al., 2016).

ΕΙΔΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ
ΑΚΡΥΛΟΝΙΤΡΙΛΙΟ – ΒΟΥΤΑΔΙΕΝΙΟ – ΣΤΥΡΟΛΙΟ (ACRYLONITRILE – BUTADIENE – STYRENE)	ABS
ΠΟΛΥΣΤΥΡΕΝΙΟ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (HIGH - IMPACT POLYSTYRENE)	HIPS
ΠΟΛΥΑΝΘΡΑΚΙΚΟ (POLYCARBONATE)	PC
ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (POLYPROPYLENE)	PP
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟ (POLY – ETHYLENE)	PE
ΧΛΩΡΙΟΥΧΟ ΠΟΛΥΒΙΝΥΛΙΟ (POLYVINYL CHLORIDE)	PVC
ΠΟΛΥΣΤΥΡΕΝΙΟ (POLYSTYRENE)	PS
ΠΟΛΥΑΜΙΔΙΑ (POLYAMIDE)	PA
ΤΕΡΕΦΘΑΛΟΠΟΛΥΒΟΥΤΥΛΕΝΙΟ (POLYBUTYLENETEREPHTHALATE)	PBT
ΣΤΥΡΟΛΙΟ – ΑΚΡΥΛΟΝΙΤΡΙΛΙΟ (STYRENE – ACRYLONITRILE)	SAN
ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ (POLYURETHANE)	PU
ΠΟΛΥΦΑΙΝΥΛΕΝΙΟ (POLYPHENYLENE)	PPE

Παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει πως τα πιο συνήθη πλαστικά που χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, και πιο συγκεκριμένα στους Η/Υ, τις οθόνες και τα είδη γραφείου, είναι τα ABS, ABS/PC και HIPS (Yang et.al., 2013; Tansel, 2017). Αυτό παρατηρείται και στην κατανομή της Εικόνας 4, όπου φαίνεται πως το ρεύμα των ΑΗΗΕ απαρτίζεται κυρίως από ABS και HIPS (55%), ενώ σε χαμηλότερα ποσοστά συναντώνται και οι υπόλοιπες κατηγορίες πλαστικού. Οι συγκεκριμένες κατηγορίες πολυμερών επιλέγονται ως επί το πλείστο λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που προσδίδουν στα καταναλωτικά προϊόντα, όπως καλή αντοχή, ακαμψία και ευελιξία στην επεξεργασία τους.

Όλες οι κατηγορίες πλαστικών βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα καταναλωτικών προϊόντων, όπως είδη οικιακής χρήσης, παιχνίδια, ιατρικά είδη, εξαρτήματα αυτοκινήτων, καλώδια, βύσματα, πρίζες, συσκευασίες τροφίμων, εξοπλισμό γραφείου και πολλά ακόμη. Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού χρησιμοποιούνται τα παρακάτω:

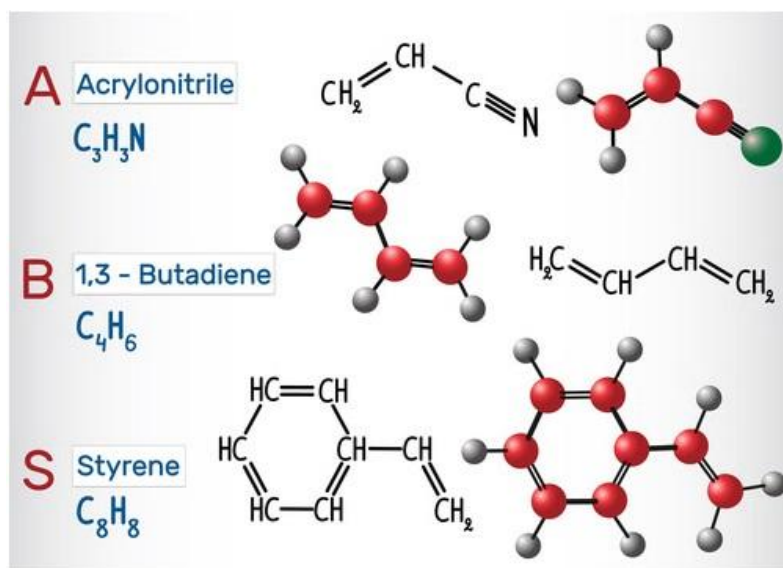
- *Καταναλωτικά ηλεκτρονικά συμπεριλαμβανομένων των τηλεοράσεων:* HIPS και ABS.
- *Συσκευές πληροφορικής:* ABS, HIPS, ABS / PC και PPO / PS.
- *Μεγάλες ηλεκτρικές συσκευές:* PP, PUR, ABS, PS και HIPS.
- *Μικρές ηλεκτρικές συσκευές:* PP, HIPS και ABS.
- *Ψυγείο:* ABS και HIPS, PUR, PP και PVC.



Εικόνα 4: Ποσοστιαία κατανομή πλαστικών στον ΗΗΕ (Yang et.al., 2013).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω δεδομένα, το ABS είναι παρόν στα περισσότερα καταναλωτικά προϊόντα, γεγονός που οφείλεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ως πολυμερή. Το ABS χαρακτηρίζεται ως υλικό δύο φάσεων, το οποίο αποτελείται από σωματίδια βουταδιενίου και ένα πλέγμα στυρενίου – ακρυλονιτριλίου (SAN) (Εικόνα 5). Το ακρυλονιτρίλιο συνεισφέρει στην θερμική και χημική του αντίσταση, το βουταδιένιο συμβάλλει στην σκληρότητά του και το στυρένιο στην υψηλή αντοχή και την εύκολη επεξεργασία του. Έτσι, συνολικά αποτελεί ένα από τα πιο ευέλικτα

θερμοπλαστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πληθώρας ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών προϊόντων. (Arroyo & Olabisi, 1997)



Εικόνα 5: Μοριακή δομή ABS (omnexus.specialchem.com).

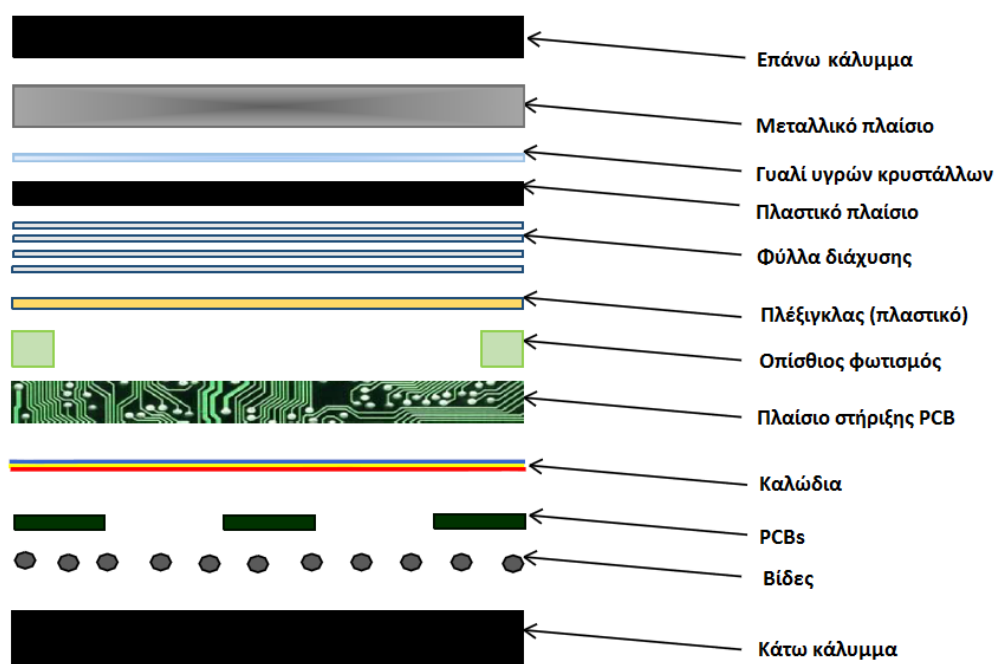
Σε πολλές περιπτώσεις, το ABS δεν χρησιμοποιείται μόνο του, αλλά σε συνδυασμό με άλλα πολυμερή. Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος συνδυασμός, που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία, είναι με το PC, καθώς το μίγμα ABS/PC παρέχει ενισχυμένα χαρακτηριστικά, συνδυάζοντας τις πιο επιθυμητές ιδιότητες των δύο πολυμερών. Η προσθήκη του ABS ενισχύει την ανθεκτικότητα του PC, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, διατηρώντας παράλληλα την υψηλή αντοχή και ακαμψία του. Επιπλέον, το μίγμα ABS/PC προσφέρει εξαιρετική σταθερότητα έναντι σε ακτινοβολία UV, όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, καλύτερη θερμική αντίσταση και ευκολότερη δυνατότητα επεξεργασίας (Kutz, 2015; Li *et.al.*, 2017). Για περαιτέρω βελτίωση των ιδιοτήτων του μίγματος συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται κάποια πρόσθετα υλικά, όπως επιβραδυντικά φλόγας, ίνες γυαλιού, ορυκτά πληρωτικά κ.α.

Το δεύτερο πιο διαδεδομένο σε χρήση πλαστικό για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό αποτελεί το υψηλής αντοχής πολυστυρένιο, HIPS. Όπως το ABS έτσι και το HIPS είναι ένα μίγμα υλικών, στο οποίο σωματίδια πολυβουταδιενίου (PB) βρίσκονται διασκορπισμένα σε πλέγμα πολυστυρενίου (PS), προσδίδοντας με αυτόν τον τρόπο πολύ καλή αντοχή στο υλικό. Επιπλέον πλεονεκτήματα του HIPS είναι το χαμηλό κόστος και η ευκολία στην επεξεργασία του, τα οποία όμως πολλές φορές επισκιάζονται από την υψηλή ευφλεκτότητά του, που περιορίζει την χρήση του σε τομείς όπως ο κατασκευαστικός (Wang *et.al.*, 2018).

2.3. LCD ΟΘΟΝΕΣ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΑ

Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display, LCD) αποτελούν ένα συγκεκριμένο είδος ΗΗΕ, που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής από την στιγμή που θα ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του και αυτόματα χαρακτηριστεί ως απόβλητο. Η σημαντικότητα αυτών των αποβλήτων γίνεται αντιληπτή, εάν αναλογιστεί κανείς πως 17 εκατομμύρια Η/Υ απορρίπτονται ετησίως, λαμβάνοντας υπόψη και τη μικρή διάρκεια ζωής τους, η οποία υπολογίζεται στα 3 – 8 χρόνια περίπου (Amato et.al., 2017).

Κάθε οθόνη LCD αποτελείται από πληθώρα υλικών, όπως πλαστικά, μέταλλα, καλώδια, πλακέτες κυκλωμάτων κ.α., πολλά από τα οποία ενέχουν κινδύνους για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Έτσι, είναι επιτακτική η σωστή διαχείριση του κάθε ρεύματος αποβλήτων που προκύπτει από μια οθόνη LCD, καθώς και η ανάκτηση/ανακύκλωση πολύτιμων υλικών, για την εξοικονόμηση πρώτων υλών (Ryan et.al., 2011). Η Εικόνα 6 παρουσιάζει την στρωματική διάταξη των υλικών που αποτελείται μια οθόνη LCD.

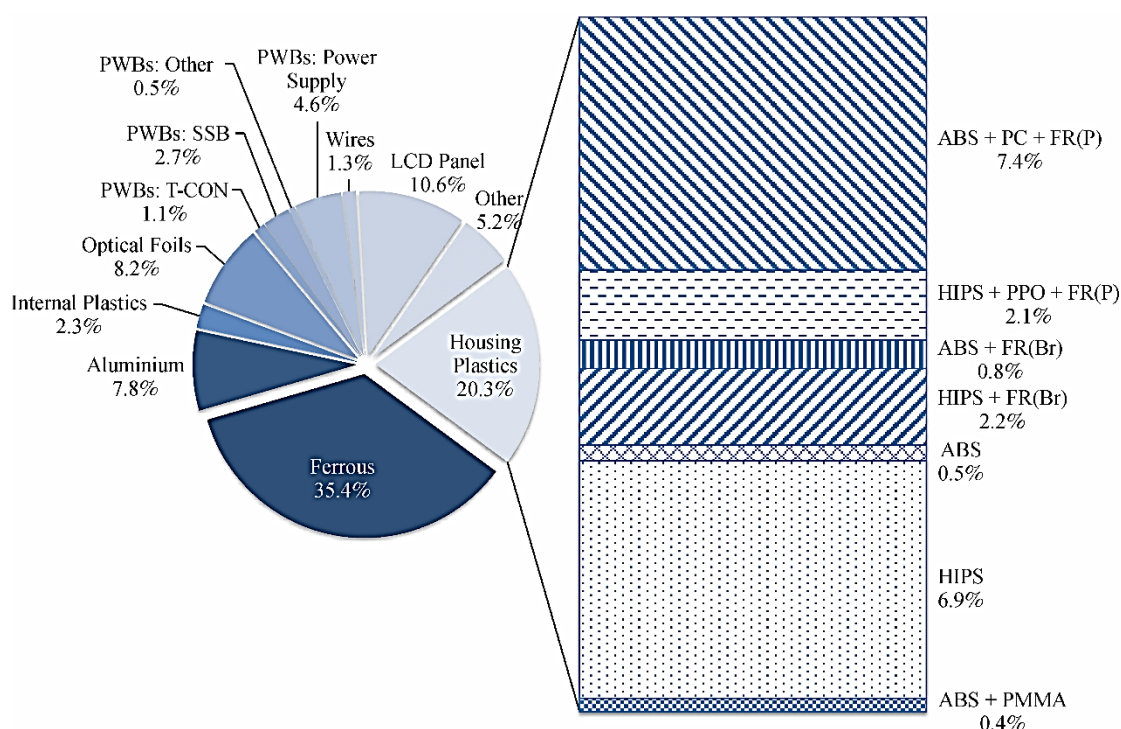


Εικόνα 6: Διάταξη στρωμάτων οθόνης LCD (Amato et.al., 2017).

Η σύσταση μιας οθόνης LCD είναι αρκετά πολύπλοκη, με πολλά διαφορετικά υλικά, σε διάφορες συγκεντρώσεις. Πιο συγκεκριμένα, το 48% περίπου της σύστασής της αποτελείται από μέταλλα, το 25% από πλαστικά, ενώ σε μικρότερα ποσοστά

ανιχνεύεται γυαλί, πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCBs), λαμπτήρες και καλώδια (Amato et.al., 2017).

Μια τυπική οθόνη LCD αποτελείται λοιπόν, από πολλά στρώματα μεταξύ δύο φύλλων γυαλιού ή πλαστικού, που σχηματίζουν το μπροστινό και οπίσθιο μέρος της οθόνης. Τα υλικά αυτά πρέπει να επιλεγθούν με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε αφενός το γυαλί να μην αλλάξει την ευθυγράμμιση του ηλεκτρικού πεδίου και των υγρών κρυστάλλων, και αφετέρου το πλαστικό να μην αντιδράσει χημικά με τις περιεχόμενες ουσίες των υγρών κρυστάλλων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το γυαλί, όμως για οθόνες με μέγεθος μικρότερο από 30 in είναι εφικτή και η χρήση του πλαστικού. Το πλεονέκτημα της χρήσης πολυμερών για την επικάλυψη των υποστρωμάτων ηλεκτροδίου είναι ότι επιτρέπουν στους υγρούς κρυστάλλους να ευθυγραμμιστούν σωστά με την επιφάνεια γυαλιού. Το πιο δημοφιλές πολυμερές που χρησιμοποιείται είναι τα πολυαμίδια (PA), τα οποία δεν δημιουργούν κανένα πρόβλημα υγρασίας και παρέχουν αξιόπιστη επικάλυψη. (Ardente & Mathieux, 2014)



Εικόνα 7: Σύσταση οθόνης LCD (Vanegas et.al., 2017). (PWB: Printed Wiring Board, SSB: Small Signal Board, T-CON: Timing Controller, PPO: PolyPhenylene Oxide, PMMA: Poly Methyl MethAcrylate, FR(P): Phosphorous Flame Retardants, FR(Br): Brominated Flame Retardants)

Παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη ποσότητα πλαστικού συναντάται κυρίως στο μπροστινό και οπίσθιο κάλυμμα της οθόνης, για τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις κατηγορίες πλαστικών, το ABS, το PC και το HIPS, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.

Σημαντική είναι και η προσθήκη επιβραδυντών φλόγας στα συγκεκριμένα πολυμερή, καθώς περικλείουν ηλεκτρικά συστήματα, γεγονός όμως που δυσχεραίνει έως έναν βαθμό την ανακύκλωσή τους.

2.4. ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ

Σημαντικό κομμάτι της έρευνας των πλαστικών αποτελεί η διαχείρισή τους, μετά το πέρας της χρήσης τους, πλέον ως απόβλητα. Η ανακύκλωση των πλαστικών αποβλήτων δεν είναι μια εύκολη διαδικασία και η ορθή περάτωσή της αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Δυο είναι τα κύρια εμπόδια στην διεργασία της ανακύκλωσης πλαστικών: Πρώτον, το γεγονός ότι το κλάσμα πλαστικών αποβλήτων αποτελείται από περισσότερους από 15 διαφορετικούς τύπους πολυμερών, και δεύτερον, ότι ένα μεγάλο μέρος τους περιέχει βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας (BFR), συμπεριλαμβανομένων των πολυβρωμιωμένων διφαινυλίων (PBB) και πολυβρωμοδιφαινυλίων αιθέρα (PBDE). Οπότε, η επιλογή της κατάλληλης διεργασίας ανακύκλωσης έγκειται στον σωστό χαρακτηρισμό των αποβλήτων, ώστε να αποφευχθεί τυχόν ρύπανση του περιβάλλοντος (*Taurino et.al., 2010*).

Μέχρι σήμερα, οι διεργασίες ανακύκλωσης πλαστικών αποβλήτων που χρησιμοποιούνται είναι:

- i. Μηχανική ανακύκλωση
- ii. Ενεργειακή ανάκτηση
- iii. Χημική τροποποίηση
- iv. Χρήση ως πληρωτικά υλικά

Η υγειονομική ταφή είναι μια μέθοδος που δεν προτείνεται για τον σκοπό της ανακύκλωσης πλαστικών, παρότι έχει αναφερθεί σε αρκετές μελέτες, καθώς οι επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον είναι καταστροφικές. Η ιδιαιτέρως αργή αποικοδόμηση του πλαστικού, καθώς και η περιεκτικότητά του σε τοξικά στοιχεία και ενώσεις, που δύναται να απελευθερωθούν, είναι οι λόγοι για τους οποίους η τεχνική αυτή δεν ενδείκνυται (*Saikia & de Brito, 2012*).

Η *μηχανική ανακύκλωση* αποτελεί μια διαδικασία που χρησιμοποιείται ευρέως στη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων και στόχο της έχει την παραγωγή νέων παρόμοιων προϊόντων, χωρίς κάποια αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Ιδιαιτερότητα της διεργασίας αποτελεί η ομοιογένεια που απαιτείται από το ρεύμα αποβλήτων, δηλαδή η κατάταξή

τους στην ίδια κατηγορία πολυμερών. Επίσης, σημαντικός παράγοντας είναι και η εξέταση της ύπαρξης βρωμιούχων επιβραδυντών φλόγας, προς αποφυγή της απελευθέρωσης διοξινών κατά τα στάδια της επεξεργασίας (Taurino *et.al.*, 2010). Η διαδικασία συνήθως ξεκινά με τον τεμαχισμό των αποβλήτων, συνεχίζει με τον διαχωρισμό και την κονιορτοποίησή τους, την απομάκρυνση της κόλλας με πλύσιμο και την αποθήκευσή τους (Singh, *et.al.*, 2017). Έτσι, παράγεται ένα νέο πλαστικό προϊόν, με αποδόσεις παρόμοιες με το αρχικό.

Καθώς τα πλαστικά είναι προϊόντα πετροχημικής προελεύσεως, η θερμιδική τους αξία είναι αρκετά υψηλή και η ενεργειακή ανάκτηση μέσω της επεξεργασίας τους αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή ώστε να ολοκληρωθεί ο κύκλος ζωής τους. Η μέθοδος που προτιμάται για τον σκοπό αυτό είναι συνήθως η καύση. Αν και με την εφαρμογή της σε πλαστικά απόβλητα παράγονται επιβλαβή αέρια, όπως πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOCs), τοξικά μέταλλα, πολυκυκλικοί οργανικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) και διοξίνες, υπάρχουν τεχνολογίες που επιτρέπουν την κατακράτηση των ρύπων αυτών, αποτρέποντας έτσι την διαφυγή τους στο περιβάλλον (Singh, *et.al.*, 2017).

Μια ακόμη οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος επεξεργασίας των πλαστικών είναι η χημική τροποποίησή τους σε καύσιμα και χημικές πρώτες ύλες. Αυτού του είδους η ανακύκλωση χρησιμοποιείται κυρίως για τα ετερογενή πλαστικά, καθώς οι διεργασίες διαχωρισμού τους δεν είναι ιδιαίτερα εύκολες και οικονομικές. Το γεγονός πως τα πλαστικά περιέχουν χαμηλές ποσότητες οξυγόνου, αλλά έχουν υψηλό περιεχόμενο σε υδρογονάνθρακες, οδηγεί σε υψηλές αποδόσεις της μεθόδου αυτής. Οι πιο γνωστές διεργασίες χημικής τροποποίησης των πλαστικών αποβλήτων είναι η αεριοποίηση, η πυρόλυση και η υδρογονοπυρόλυση (Ragaert *et.al.*, 2017). Από αυτές, η μέθοδος που έχει μελετηθεί και χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η πυρόλυση, η οποία πραγματοποιείται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, θερμοκρασίας 500 °C, και παράγει τρία κλάσματα, το υγρό, το αέριο και το στερεό, τα οποία είναι πολύτιμα για βιομηχανίες, ιδιαίτερα για διυλιστήρια (Sharuddin *et.al.*, 2016). Η ποιότητα των παραγόμενων αυτών προϊόντων μπορεί να καθοριστεί έως κάποιο βαθμό από τις παραμέτρους της πυρόλυσης, όπως τη θερμοκρασία, τη σύνθεση και τη μακροδομή του πολυμερούς, το χρόνο παραμονής του αερίου και το αέριο ρευστοποίησης. Σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας της διεργασίας είναι η παρουσία βρωμιωμένων ενώσεων, οι οποίες χρειάζεται να απομακρυνθούν πριν ή κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης (Yang

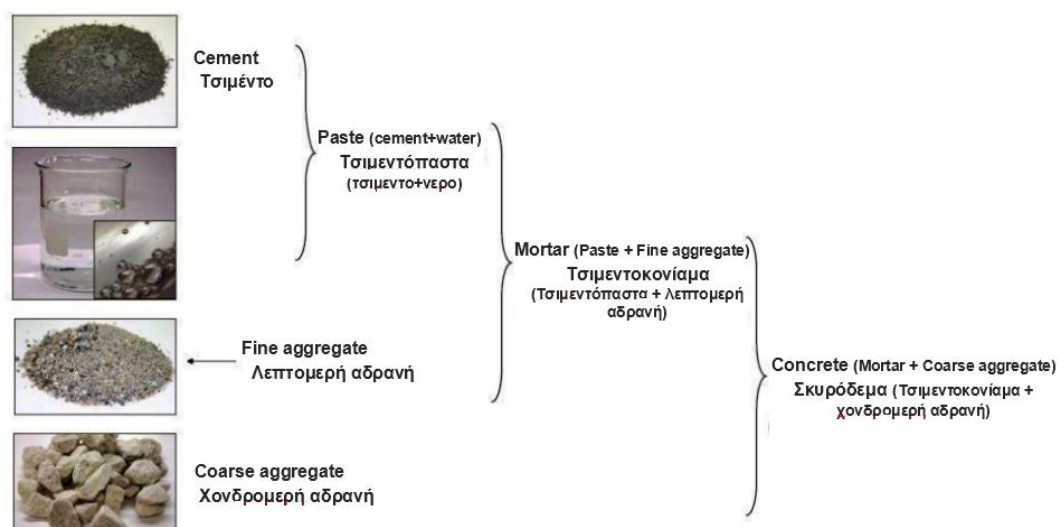
et.al., 2013). Το παραγόμενο υγρό έλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες ντίζελ, λέβητες ή σε άλλες εφαρμογές ως υγρό καύσιμο, ενώ το αέριο παραπροϊόν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει τη συνολική ενεργειακή απαίτηση της εγκατάστασης (Abnisa & Daud, 2014).

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται εκτενής έρευνα για την χρήση των πλαστικών ως πληρωτικά υλικά στον κατασκευαστικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η ενσωμάτωσή τους σε κονιάματα, σκυροδέματα και άλλα κατασκευαστικά υλικά, με στόχο την βελτίωση των ιδιοτήτων τους και την εύκολη ανακύκλωση των αποβλήτων (Manjunath, 2016). Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται αναλυτικά προηγούμενες έρευνες στον τομέα αυτό.

2.5. ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ/ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Η χρήση των πλαστικών αποβλήτων στην παραγωγή τσιμεντοκονιαμάτων και σκυροδέματος αποτελεί μια σύγχρονη και οικονομική εναλλακτική λύση, η οποία μπορεί να συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην μείωση της τεράστιας ποσότητας πλαστικών που απορρίπτονται ετησίως. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται εκτενής έρευνα στον τομέα αυτό, η οποία εξετάζει τις επιδράσεις του πλαστικού στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του κονιάματος ή σκυροδέματος.

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η διαφορά μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος, η οποία συνίσταται στο γεγονός ότι στο τελευταίο γίνεται η χρήση χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών, σε αντίθεση με το πρώτο όπου χρησιμοποιούνται μόνο λεπτόκοκκα. Πιο αναλυτικά, τα μίγματα υλικών που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό παρουσιάζονται στην Εικόνα 8, όπως δίνονται από το Portland Cement Association.



Εικόνα 8: Σύσταση τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος (<https://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-concrete-is-made>).

Τα κονιάματα τυγχάνουν διαφόρων χρήσεων στον κατασκευαστικό τομέα και μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κονιάματα δόμησης ή τοιχοποιίας
- Κονιάματα επιχρισμάτων
- Κονιάματα εξίσωσης δαπέδων
- Επισκευαστικά κονιάματα
- Ειδικά κονιάματα

Πολλές μελέτες έχουν ασχοληθεί με την μερική αντικατάσταση των αδρανών υλικών (χονδρόκοκκων ή λεπτόκοκκων) των κονιαμάτων με πλαστικά ή συνδυασμό πλαστικών με τέφρα. Οι αναλογίες αντικατάστασης που εξετάζονται ποικίλουν, ενώ σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψιν είναι η αναλογία του νερού με το τσιμέντο (w/c ratio). Σε όλες τις μελέτες έχει εξεταστεί η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, καθώς αποτελεί βασική παράμετρο για την καταλληλότητα του σκυροδέματος ή κονιάματος στις εκάστοτε χρήσεις του, ενώ οι επόμενες σημαντικές ιδιότητες των δοκιμίων που εξετάζονται συνήθως είναι η εφελκυστική και καμπτική αντοχή, καθώς και η θερμική αγωγιμότητα, η συμπεριφορά σε όξινο ή κρύο περιβάλλον κ.α.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της αξιοποίησης πλαστικών αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα είναι:

- Η ιδιαίτερη ευελιξία και ικανότητα προσαρμογής των πλαστικών για την κάλυψη συγκεκριμένων τεχνικών αναγκών.
- Το μικρότερο βάρος τους συγκριτικά με τα ανταγωνιστικά υλικά, που μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά τη μεταφορά.
- Η ανθεκτικότητά και η αντοχή τους σε χημικά, νερό και κρούση
- Οι πολύ καλές ιδιότητες θερμικής και ηλεκτρικής μόνωσης
- Το συγκριτικά μικρότερο κόστος παραγωγής

Από την άλλη, τα μειονεκτήματά τους αφορούν τις χαμηλές ιδιότητες συγκόλλησής τους, οι οποίες συμβάλουν στην μείωση της θλιπτικής, εφελκυστικής και καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος, και το χαμηλό σημείο τήξης τους, που εμποδίζει την επεξεργασία τους σε υψηλές θερμοκρασίες (Manjunath, 2016).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικές μελέτες της εφαρμογής πλαστικών σε σκυρόδεμα και τσιμεντοκονιάματα.

Μελέτες σε σκυρόδεμα

Οι Subramani & Pugal, 2015, εξέτασαν την εφαρμογή πλαστικών αποβλήτων ως χονδρόκοκκα αδρανή για την κατασκευή σκυροδέματος. Τα απόβλητα αφού συλλέχθηκαν, πλύθηκαν και θερμάνθηκαν, τεμαχίστηκαν στο επιθυμητό μέγεθος. Η αναλογία νερού/τσιμέντου διατηρήθηκε στα 0.46 και τα ποσοστά αντικατάστασης των χονδρόκοκκων αδρανών με πλαστικό ήταν 5, 10 και 15%. Οι παράμετροι των δοκιμών που εξετάστηκαν αφορούσαν την θλιπτική, εφελκυστική και καμπτική αντοχή τους, σε 7, 14 και 28 ημέρες ωρίμανσης. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς η 10% αντικατάσταση πλαστικού εμφάνισε την υψηλότερη αντοχή στο σκυρόδεμα, ενώ οι μελετητές συμπέραναν πως η μέχρι 20% προσθήκη πλαστικού στα δοκίμια επιφέρει αποτελέσματα εντός των επιτρεπτών ορίων.

Ο Manjunath, 2016, μελέτησε την εφαρμογή πλαστικών αποβλήτων από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό σε σκυρόδεμα και την επίδρασή τους στην αντοχή θλίψης, εφελκυσμού και κάμψης των δοκιμών. Οι αναλογίες που μελετήθηκαν ήταν 10, 20, και 30% και ο λόγος νερό/τσιμέντο διατηρήθηκε στα 0.5. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση των αντοχών με την αύξηση της ποσότητας του πλαστικού στα δοκίμια, κάτι το οποίο οφείλεται στην μείωση της συνοχής μεταξύ των υλικών και του υδρόφοβου χαρακτήρα του πλαστικού. Παρόλα αυτά, οι τιμές των αντοχών παρέμειναν εντός των νομοθετικά επιτρεπτών ορίων.

Στην ίδια φιλοσοφία κινήθηκαν και οι μελέτες των *Rahman et.al., 2013* και *Prasanna & Rao, 2014*, οι οποίοι εξέτασαν την ενσωμάτωση πλαστικών HDPE και πλαστικών αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, αντίστοιχα, σε δοκίμια σκυροδέματος. Και στις δυο περιπτώσεις τα πλαστικά χρησιμοποιήθηκαν ως χονδρόκοκκα αδρανή σκυροδέματος και μελετήθηκε η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, παρατηρήθηκε έντονη μείωση των αντοχών για όλες τις αναλογίες αντικατάστασης.

Το πλαστικό που έχει μελετηθεί αρκετά ως προς την χρήση του στην κατασκευή σκυροδέματος είναι το τереφθαλικό πολυαιθυλένιο, PET (polyethylene terephthalate). Οι *Silva et.al., 2013* εξέτασαν την συμπεριφορά του σκυροδέματος με αντικατάσταση 7.5% των χονδρόκοκκων αδρανών με πλαστικό PET. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια μείωση της τάξεως του 5.1% στην θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, παραμένοντας όμως εντός των επιτρεπτών επιπέδων χρήσης, ενώ οι ερευνητές τόνισαν πως το σχήμα και η ομαλότητα των πλαστικών τεμαχιδίων παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της αντοχής. Μια ακόμη μελέτη για τα PET, των *Islam et.al., 2016*, παρουσιάζει πως η αντικατάσταση έως και 20% πλαστικού, διατηρώντας χαμηλό τον λόγο νερού προς τσιμέντο, επιφέρει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα και μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί στον κατασκευαστικό τομέα.

Μελέτες σε κονίαμα

Αντίστοιχες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και σε κονιάματα, εξετάζοντας τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Μία εξ' αυτών είναι η έρευνα των *Ghernouti & Rabehi, 2012*, όπου απόβλητες πλαστικές σακούλες χρησιμοποιήθηκαν ως αντικαταστάτες της άμμου στην κατασκευή των δοκιμίων, σε ποσοστά έως 40%. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μείωση των μηχανικών αντοχών των δοκιμίων ήταν ανάλογη της αύξησης του πλαστικού, παραμένοντας όμως σε επίπεδα κοντά στο πρότυπο δείγμα, ενώ παρουσίασαν πολύ καλή συμπεριφορά έναντι διαφόρων θερμοκρασιών ωρίμανσης.

Επίσης, οι *Savvilotidou, V., & Gidarakos, E., 2018*, μελέτησαν την εφαρμογή πλαστικών ABS και PVC, από απόβλητα φωτοβολταϊκά, ως λεπτόκοκκα αδρανή σε τσιμεντοκονιάματα, σε αναλογίες αντικατάστασης 5 και 10%. Χρησιμοποιώντας κομμάτια πλαστικών με μέγεθος μικρότερο από 4 mm και με το λόγο νερού προς τσιμέντο να κυμαίνεται μεταξύ 0.4 έως 0.7, εξέτασαν τις φυσικές, μηχανικές και

θερμικές ιδιότητες των κονιαμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα δοκίμια με PVC παρουσίασαν υψηλότερη θλιπτική αντοχή συγκριτικά με τα αντίστοιχα με ABS, ενώ και στις δύο περιπτώσεις οι αντοχές ήταν χαμηλότερες του προτύπου. Αξιοσημείωτο, όμως είναι το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι ερευνητές, πως η προσθήκη του ABS δύναται να ενισχύσει τις θερμομονωτικές ιδιότητες των κονιαμάτων.

Έρευνα των *Ruiz-Herrero et.al., 2016*, εξέτασε ρεύμα πλαστικών αποβλήτων, αποτελούμενο κατά κύριο λόγο από PE και PVC, ως λεπτόκοκκα αδρανή στην παρασκευή κονιάματος. Έπειτα από τη μελέτη των μηχανικών αντοχών και φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων (θερμική αγωγιμότητα, δοκιμή ενανθράκωσης, πυκνότητα, πορώδες), κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η χρήση των πλαστικών σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι ένας πολύ ενδιαφέρον τρόπος επέκτασης της ζωής τους που, παρότι προσδίδει χαμηλές μηχανικές ιδιότητες στα κονιάματα, ενισχύει τις θερμομονωτικές δυνατότητές τους. Στο ίδιο συμπέρασμα είχαν οδηγηθεί και οι *Wang & Meyer, 2012*, οι οποίοι εξέτασαν την συμπεριφορά δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος με την προσθήκη HIPS.

Οι *Akcaözoğlu et.al., 2010*, χρησιμοποίησαν απόβλητο πλαστικό PET από μπουκάλια, αντικαθιστώντας ποσοστό της άμμου στην κατασκευή κονιαμάτων. Διατηρώντας τον λόγο νερού προς τσιμέντο σταθερό (0.45), μελέτησαν την θλιπτική, καμπτική και εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων, καθώς και την εναθράκωση και συρρίκνωση ξήρανσής τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι αντοχές των υπό μελέτη δοκιμίων ήταν χαμηλότερα του προτύπου, υψηλότερα όμως των νομοθετικών προδιαγραφών, ενώ οι συγγραφείς επισημαίνουν πως η χρήση τεμαχισμένων αποβλήτων PET σε σκυρόδεμα ή κονίαμα μπορούν να ενισχύσουν την αντισεισμική συμπεριφορά τους. Την ίδια προσέγγιση ακολούθησαν και οι *Ge et.al., 2013*, με την διαφορά πως το πλαστικό PET ενσωματώθηκε στο μίγμα των κονιαμάτων ως λιωμένο υλικό. Παρόλα αυτά τα συμπεράσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς η κατά 25% αντικατάσταση της άμμου από πλαστικό πέτυχε ιδιαίτερα υψηλές αντοχές.

Γενικά, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες στον τομέα της χρήσης πλαστικών αποβλήτων σε κατασκευαστικά υλικά, εξετάζοντας πληθώρα υλικών και παραμέτρων. Οι *Saikia & de Brito, 2012*, *Sharma & Bansal, 2016* και *Gu & Ozbakkaloglu, 2016* έχουν δημοσιεύσει ανασκοπήσεις των ερευνών αυτών.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. ΣΤΟΧΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Το ρεύμα των πλαστικών αποβλήτων που προέρχεται από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό αποτελεί ένα ραγδαία αυξανόμενο περιβαλλοντικό ζήτημα παγκοσμίως. Τα ΑΗΗΕ απαρτίζονται κατά 20% από πλαστικά, διαφόρων κατηγοριών, τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης μεταχείρισης τόσο για περιβαλλοντικούς όσο και για οικονομικούς λόγους. Για τον λόγο αυτό, μέθοδοι ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης αυτών των υλικών εξετάζονται και εφαρμόζονται ευρέως τα τελευταία χρόνια, με απώτερο σκοπό την δημιουργία μιας βιώσιμης κοινωνίας.

Στο πλαίσιο αυτό κινείται και η παρούσα εργασία, η οποία έχει ως στόχο τη διερεύνηση της εφαρμογής πλαστικών αποβλήτων ηλεκτρονικού εξοπλισμού (πλαστικά από οθόνες LCD) σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η σύσταση των πλαστικών αποβλήτων από LCD οθόνες Η/Υ, μέσω του προσδιορισμού των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών τους, καθώς και η επίδραση αυτών στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων.

Η διερεύνηση των χαρακτηριστικών των πλαστικών μπορεί να αποτελέσει έναν τρόπο ερμηνείας των αποτελεσμάτων των κονιαμάτων, και έτσι να διεξαχθεί ένα συνολικό συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου. Στο πεδίο αυτό έχουν λάβει χώρα αρκετές έρευνες τις τελευταίες δεκαετίες με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Οι περισσότερες έρευνες εστίασαν σε μίγμα πλαστικών ΑΗΗΕ ενώ κάποιες άλλες σε συγκεκριμένες κατηγορίες, όπως PET, PC κ.α. Δεν υφίσταται όμως αρκετή βιβλιογραφία για την εφαρμογή του ABS σε τέτοιες δοκιμές, παρότι καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό (30%) στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της συνεισφοράς στην γενικότερη έρευνα στον τομέα της εφαρμογής πλαστικών αποβλήτων σε κατασκευαστικά υλικά, και επιλέχθηκε το ABS πλαστικό ως υποκατάστατο των αδρανών.

3.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το αρχικό στάδιο της μελέτης αφορούσε τη συλλογή των πλαστικών αποβλήτων, η οποία πραγματοποιήθηκε από την Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ), του νομού Χανίων. Συνολικά συλλέχθηκαν δεκατέσσερις LCD οθόνες, διαφόρων εταιριών, από τις οποίες χρησιμοποιήθηκε είτε το περιμετρικό πλαίσιο είτε το οπίσθιο κάλυμμα αυτών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Δείγματα πλαστικών από οθόνες LCD που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Στην συνέχεια, έλαβε χώρα η αρίθμηση των αποβλήτων σε τυχαία σειρά, καθώς και ο προσδιορισμός της κατηγορίας πλαστικού στην οποία ανήκαν. Παρατηρήθηκε πως το πλαστικό που συνέθετε τα συγκεκριμένα απόβλητα ήταν κατά κύριο λόγο το **ABS** (Acrylonitrile Butadiene Styrene), είτε εξ' ολοκλήρου είτε σε μίξη με PC (PolyCarbonate) [**ABS/PC**] και/ή HIPS (High Impact PolyStyrene) [**ABS/PC/HIPS**, **ABS/HIPS**]. Ο Πίνακας 3 δείχνει την ονομασία που δόθηκε και την κατηγορία πλαστικού των εξεταζόμενων δειγμάτων. Όπως διακρίνεται, έξι εκ των δεκατεσσάρων δειγμάτων ανήκουν στην κατηγορία του ABS, τρία στην κατηγορία ABS/PC, τέσσερα στην ABS/PC/HIPS και μόλις ένα στην κατηγορία ABS/HIPS. Να σημειωθεί πως όλα

τα δείγματα περιείχαν επιβραδυντικά φλόγας, σύμφωνα με αναγραφή στο εσωτερικό τους.

Πίνακας 3: Ονομασία και κατηγορία πλαστικού των εξεταζόμενων δειγμάτων.

Ονομασία δείγματος	Κατηγορία πλαστικού
<i>LCD_1</i>	<i>ABS/PC</i>
<i>LCD_2</i>	<i>ABS</i>
<i>LCD_3</i>	<i>ABS/PC/HIPS</i>
<i>LCD_4</i>	<i>ABS</i>
<i>LCD_5</i>	<i>ABS</i>
<i>LCD_6</i>	<i>ABS/PC/HIPS</i>
<i>LCD_7</i>	<i>ABS/PC</i>
<i>LCD_8</i>	<i>ABS/PC</i>
<i>LCD_9</i>	<i>ABS</i>
<i>LCD_10</i>	<i>ABS</i>
<i>LCD_11</i>	<i>ABS</i>
<i>LCD_12</i>	<i>ABS/PC/HIPS</i>
<i>LCD_13</i>	<i>ABS/PC/HIPS</i>
<i>LCD_14</i>	<i>ABS/HIPS</i>

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης πραγματοποιήθηκε ο τεμαχισμός των πλαστικών αποβλήτων σε μικρότερα κομμάτια και ίνες, ώστε να γίνει εφικτή η περαιτέρω επεξεργασία τους, καθώς και η ξήρανση κάποιων εξ' αυτών, η οποία ήταν απαραίτητη για τον ορθό προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της κάθε κατηγορίας (Εικόνες 10, 11). Η μείωση του μεγέθους των υλικών έγινε χειρωνακτικά, με τη βοήθεια τρίφτη και ψαλιδιού για σκληρές επιφάνειες.



Εικόνα 10: Τεμαχισμός πλαστικών δειγμάτων.

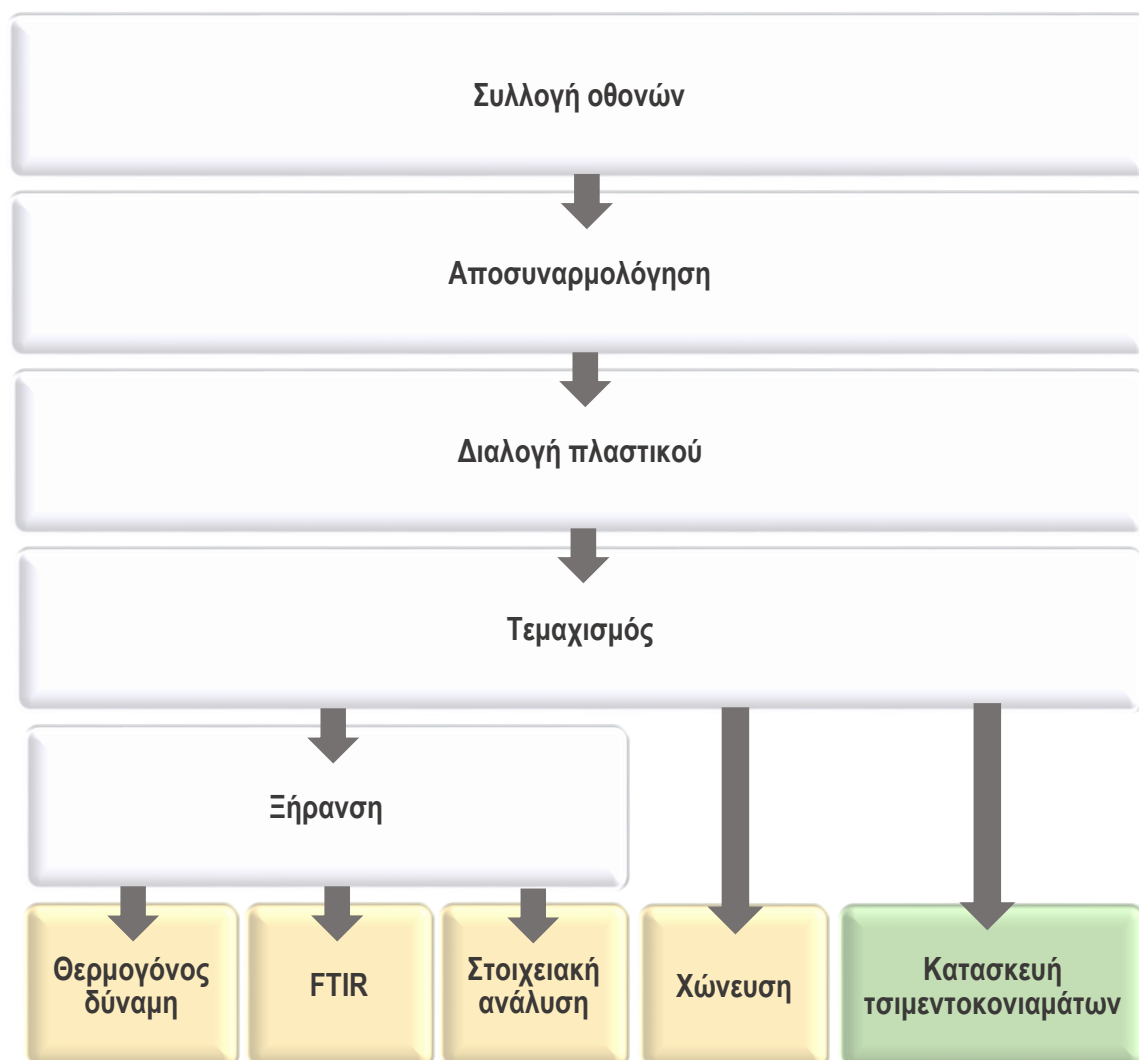


Εικόνα 11: Δείγματα προς ξήρανση.

Στην συνέχεια ακολούθησαν οι διεργασίες χαρακτηρισμού των δειγμάτων, οι οποίες περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης, των περιεχόμενων τοξικών μετάλλων μέσω όξινης χώνευσης, της δομής των οργανικών ενώσεων μέσω φασματοσκοπίας υπερύθρου (FTIR), και τέλος της στοιχειακής ανάλυσης.

Έπειτα, επιλέχθηκαν τα δείγματα που περιείχαν μόνο ABS και με κοκκομετρία < 4mm, τα οποία αντικατέστησαν μερικώς την άμμο στην παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων, στα οποία μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητές τους (θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας), η πυκνότητα, το πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα.

Συνοπτικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε φαίνεται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη. Με πορτοκαλί αναφέρονται οι διεργασίες χαρακτηρισμού των πλαστικών δειγμάτων.

3.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

3.3.1. Θερμογόνος δύναμη

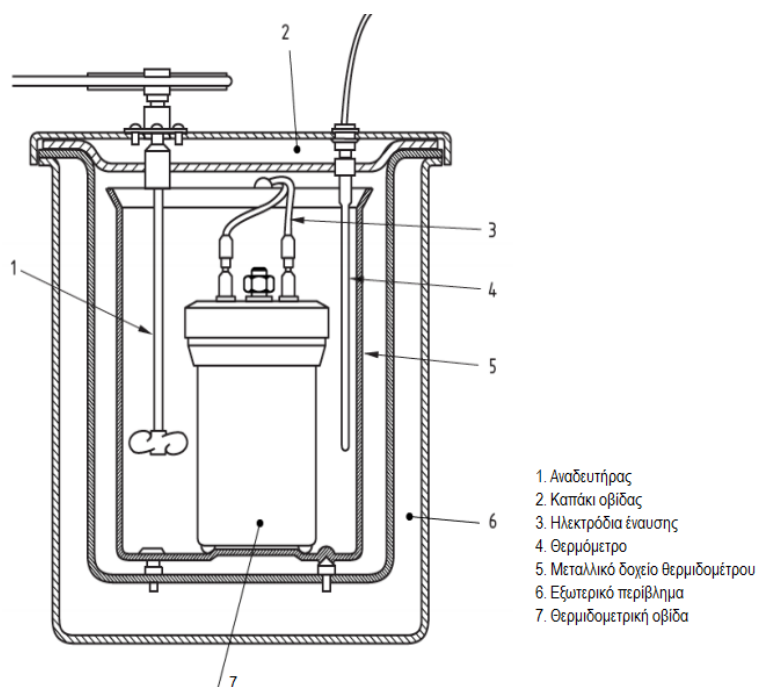
Η θερμογόνος δύναμη ενός υλικού αντιστοιχεί στην ενέργεια που εκλύεται κατά την πλήρη και τέλεια καύση του με το οξυγόνο. Διακρίνεται σε ανώτερη (HHV – Higher Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, και σε κατώτερη (Lower Heating Value), όταν το νερό είναι σε αέρια κατάσταση. Στην παρούσα μελέτη, για τον υπολογισμό της θερμογόνου δύναμης των πλαστικών δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε θερμιδόμετρο AC-350 της LECO (Εικόνα 12), τύπου οβίδας οξυγόνου, το οποίο μετρά την ανώτερη θερμογόνο δύναμη, με μονάδα μέτρησης cal/g. Η αρχή λειτουργίας ενός θερμιδόμετρου βασίζεται στην μέτρηση της εκλυόμενης θερμότητας από την πλήρη καύση του εξεταζόμενου δείγματος σε περιβάλλον οξυγόνου.



Εικόνα 12: Θερμιδόμετρο AC-350 της LECO, Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων.

Στο θερμιδόμετρο, η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε ένα ασφαλισμένο δοχείο υπό σταθερό όγκο (οβίδα), κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο είναι βυθισμένο σε μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού. Το σύστημα αυτό περιβάλλεται από μονωμένα τοιχώματα, τα οποία εξασφαλίζουν τις απαιτούμενες αδιαβατικές συνθήκες λειτουργίας. Μια τυπική διάταξη θερμιδομέτρου παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Στο εσωτερικό της οβίδας πραγματοποιείται η καύση του υλικού, το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα σε μεταλλικό δοχείο (κάψα) που στηρίζεται σε μια μεταλλική στεφάνη, ενώ για την έναυση χρησιμοποιείται πολύ λεπτό σύρμα

βολφραμίου, με τα δυο άκρα του συνδεδεμένα σε πηγή συνεχούς ρεύματος και το υπόλοιπο οριακά πάνω από το δείγμα. Κατά την καύση του δείγματος μέσα στην οβίδα, η θερμότητα που εκλύεται μεταφέρεται στο νερό και έτσι μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια, μέσω της μέτρησης της αύξησης της θερμοκρασίας του νερού. (Γιδαράκος, Ε., 2014)



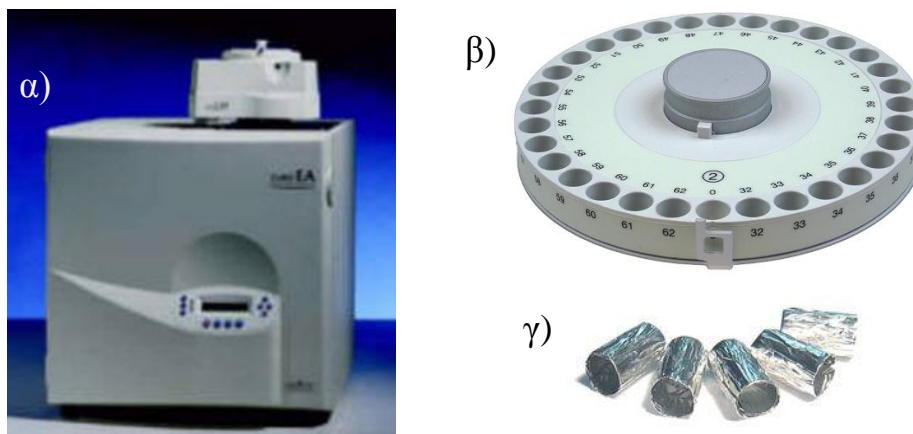
Εικόνα 13: Τυπική διάταξη θερμιδομέτρου.

Για την μέτρηση της θερμογόνου δύναμης των πλαστικών αποβλήτων χρησιμοποιήθηκαν 0.5 g υλικού, τα οποία αφού ξηράθηκαν στους 60 °C για 24 ώρες, τοποθετήθηκαν σε ειδικό υποδοχέα (κάψα), μέσα από τον οποίο περνά λεπτό σύρμα βολφραμίου, που χρησιμοποιείται για την ανάφλεξή του. Η κάψα με το δείγμα τοποθετήθηκαν στην οβίδα υψηλής ανθεκτικότητας, σε πίεση 440 psi και σε ατμόσφαιρα καθαρού O₂, η οβίδα εισήλθε σε μεταλλικό ειδικό δοχείο, το οποίο με τη σειρά του οδηγήθηκε μέσα στη συσκευή ώστε να ξεκινήσει η διεργασία της καύσης.

3.3.2. Στοιχειακή ανάλυση

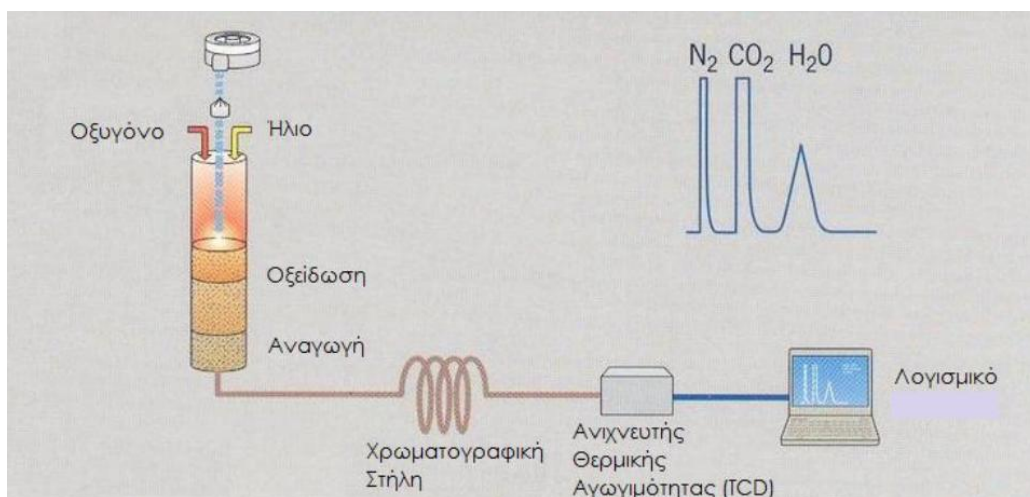
Η στοιχειακή ανάλυση στερεών δειγμάτων αποτελεί έναν τρόπο προσδιορισμού των βασικών στοιχείων του, δηλαδή του άνθρακα (C), του υδρογόνου (H), του αζώτου (N) και του θείου (S). Η συγκεκριμένη διεργασία βασίζεται στις αρχές της καύσης του δείγματος σε υψηλή θερμοκρασία σε περίσσεια οξυγόνου και στη διαδοχική οξείδωση

και αναγωγή των απαερίων της καύσης. Για την προκείμενη μελέτη, η στοιχειακή ανάλυση έλαβε χώρα στο εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων με την βοήθεια του στοιχειακού αναλυτή EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O (Εικόνα 14α).



Εικόνα 14: α)Στοιχειακός αναλυτής EuroVector, β)Ειδικός υποδοχέας δειγμάτων, γ)Κάψες κασσίτερου.

Αρχικά, σε μια κάψα κασσίτερου τοποθετείται μικρή ποσότητα ξηραμένου πλαστικού δείγματος, της τάξεως του 0.5 mg, η οποία στη συνέχεια εισάγεται στο μηχάνημα σε ειδικό υποδοχέα (Εικόνα 14β,γ) και διέρχεται από μια στήλη χαλαζία παρουσία οξυγόνου (αέριο καύσης) και ηλίου (αέριο μεταφοράς), όπου πραγματοποιείται η πλήρης καύση του. Έπειτα, το αέριο καύσης οδηγείται σε μια στήλη καταλυτών οξείδωσης και μια στήλη χαλκού, όπου κατακρατούνται τα οξείδια του αζώτου και οι θεικές ενώσεις που σχηματίστηκαν κατά την καύση. Κατόπιν, τα αέρια εισέρχονται σε χρωματογραφική στήλη, όπου διαχωρίζονται και ποσοτικοποιούνται με τη χρήση ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας, ο οποίος παράγει ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα, ανάλογο της ποσότητας του στοιχείου που αναλύεται.



Εικόνα 15: Διαδικασία λειτουργίας στοιχειακού αναλυτή.

Τα αποτελέσματα προβάλλονται από το λογισμικό ανάλυσης ως κορυφές, που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό σήμα του εκάστοτε στοιχείου. Η σειρά με την οποία ανιχνεύονται τα συστατικά που παράγονται από την καύση είναι: N_2 , CO_2 , H_2O και SO_2 , ενώ η συνολική μάζα των στοιχείων C, H, N, S υπολογίζεται με ακρίβεια 0.1 mg. Η παραπάνω διεργασία απεικονίζεται και στην Εικόνα 15.

3.3.3. Χώνευση – Ανάλυση δειγμάτων

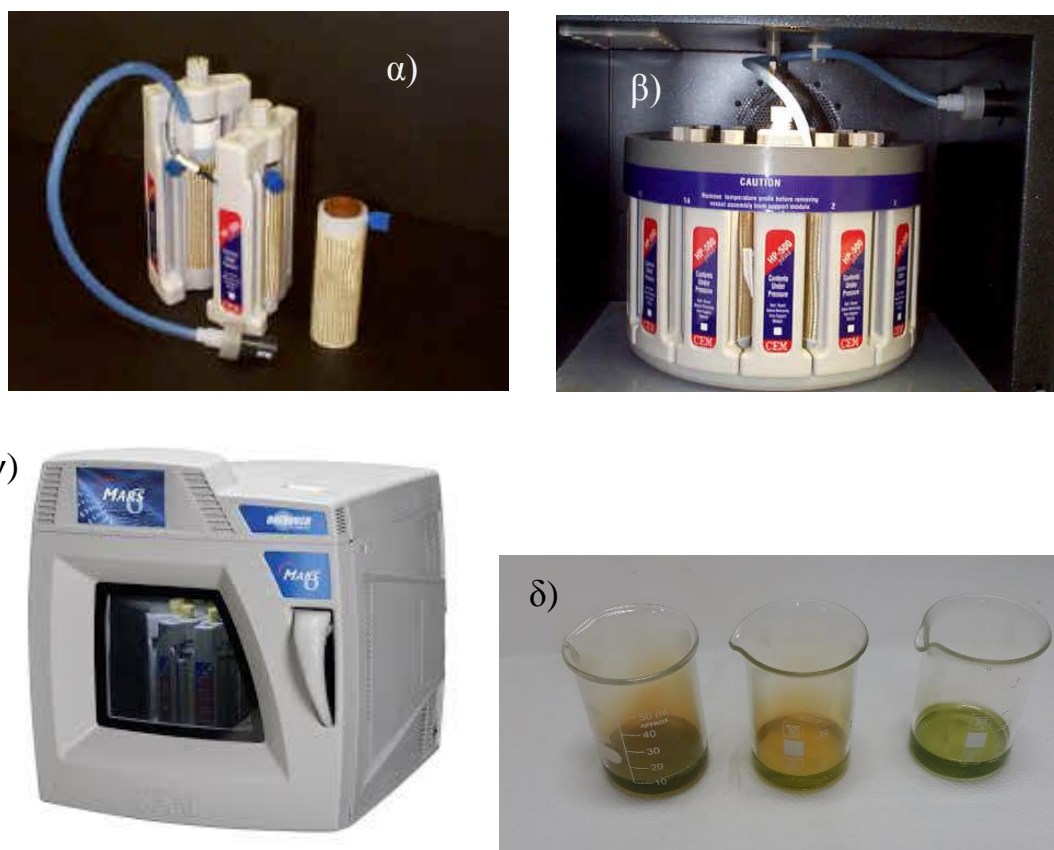
Χώνευση

Η διεργασία της χώνευσης αποτελεί έναν τρόπο μετατροπής των δειγμάτων από στερεή μορφή σε μορφή διαλύματος, ώστε να γίνει εφικτός ο μετέπειτα προσδιορισμός των μετάλλων που περιέχονται στο δείγμα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικός εργαστηριακός φούρνος MARS 6 Microwave Reactor System CEM (Εικόνα 16γ).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην πρότυπη μέθοδο 3051 της US EPA, σύμφωνα με την οποία 0.5 g δείγματος μαζί με 10 mL νιτρικού οξέος τοποθετούνται σε ειδικά φθοροανθρακικά δοχεία (vessels), τα οποία αφήνονται στην ηρεμία για λίγα λεπτά. Στη συνέχεια, τα vessels σφραγίζονται προσεκτικά, έτσι ώστε η οπή που βρίσκεται στο καπάκι τους να είναι ελεύθερη (προς αποφυγή έκλυσης αερίων κατά το ξεβίδωμα) και τοποθετούνται προσεκτικά στον φούρνο, στις θέσεις που προβλέπει το μηχάνημα (Εικόνα 16α,β). Στην θέση 1, όπου βρίσκεται το πρότυπο, εισάγεται θερμομέτρο και αισθητήρας πίεσης, συνδεδεμένα και με τον φούρνο, ενώ τα υπόλοιπα

vessels τοποθετούνται στις υπόλοιπες προβλεπόμενες θέσεις . Αφού ελεγχθεί πως όλα είναι σωστά τοποθετημένα και συνδεδεμένα, τίθεται σε λειτουργία η συσκευή.

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά μέχρι τους 180°C, ώστε να πραγματοποιηθεί η χώνευση των δειγμάτων και στην συνέχεια μειώνεται έως ότου φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου. Στην συνέχεια απομακρύνονται τα vessels από τον φούρνο και ανοίγονται προσεκτικά στον απαγωγό, με τη χρήση των απαιτούμενων μέτρων προστασίας, λόγω της ενδεχόμενης έκλυσης οξέων. Έπειτα, τα διαλύματα διηθούνται (Εικόνα 16δ) και αραιώνονται με απιονισμένο νερό μέχρι τα 10 mL, ώστε να είναι έτοιμα για την περαιτέρω ανάλυσή τους.



Εικόνα 16: α)Ειδικά δοχεία (vessels), β) Vessels τοποθετημένα στη σωστή σειρά μέσα στον εργαστηριακό φούρνο, γ)Ειδικός εργαστηριακός φούρνος MARS 6 Microwave Reactor System CEM, δ)Διηθημένα δείγματα μετά την ολοκλήρωση της χώνευσης.

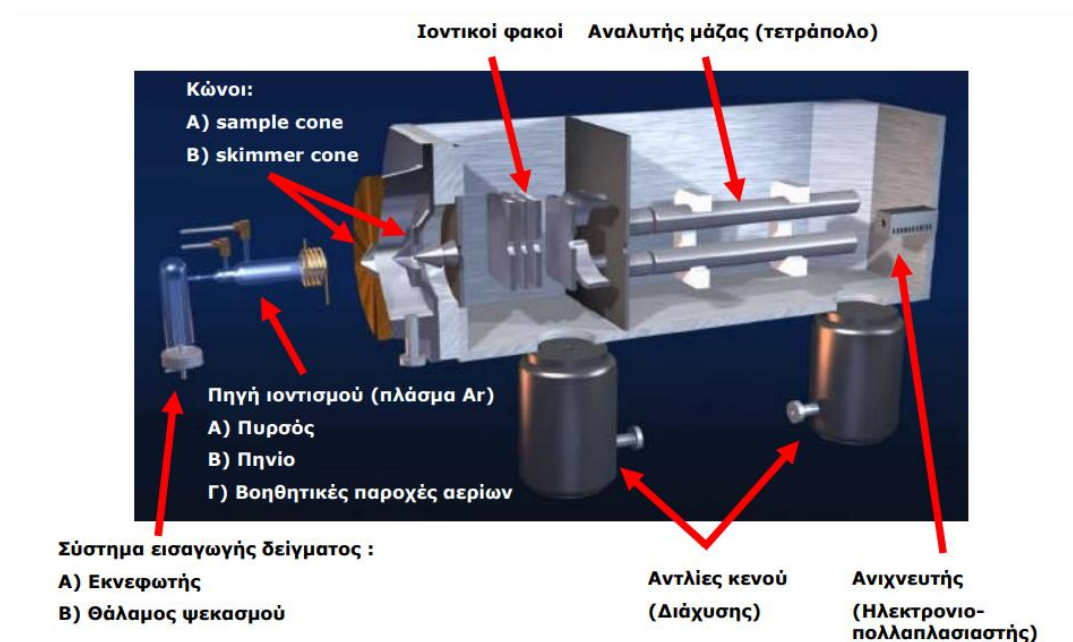
Ανάλυση δειγμάτων

Η ανάλυση των δειγμάτων για ανίχνευση μετάλλων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια οργάνου φασματομετρίας μάζας με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP – MS), το οποίο αποτελεί σύζευξη δυο πολύ καλά καταρτισμένων τεχνικών. Το ICP – MS

χρησιμοποιεί ως μέσο διέγερσης του δείγματος πλάσμα αργού, το οποίο έχει πολύ καλή σταθερότητα, συγκριτικά με παλαιότερες φασματοσκοπικές τεχνικές εκπομπής. Επιτρέπει τον σύγχρονο προσδιορισμό μέχρι και 60 στοιχείων, έχοντας υψηλή ευαισθησία και μεγάλη γραμμική αναλυτική περιοχή, με όρια ανίχνευσης 0.01 – 1 ng/mL. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται με επιτυχία στους τομείς γεωχημικής έρευνας, του περιβάλλοντος αλλά και πυρηνικής χημείας.

Τα κυριότερα τμήματα ενός οργάνου ICP – MS αποτελούν (Εικόνα 17):

1. Το σύστημα εισαγωγής του δείγματος
2. Το σύστημα ατμοποίησης ICP
3. Το σύστημα εισαγωγής των ιόντων
4. Το σύστημα κενού
5. Ο αναλυτής μάζας
6. Ο ανιχνευτής ιόντων
7. Ο Η/Υ όπου γίνεται η επεξεργασία και αποτίμηση των δεδομένων



Εικόνα 17: Διάταξη οργάνου ICP – MS.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ICP – MS έναντι άλλων τεχνικών συνίσταται στα χαμηλότερα όρια ανίχνευσης και τη μεγαλύτερη ταχύτητα αναλύσεων που προσφέρει, την αποκλειστική δυνατότητα ισοτοπικής ανάλυσης, την ανάλυση σπάνιων γαιών, τις μηδενικές χημικές παρεμποδίσεις και τη μεγαλύτερη γραμμική περιοχή. Παράλληλα

όμως, το μειονέκτημά της αποτελεί το υψηλό κόστος λειτουργίας και πιθανές ισοβαρείς παρεμποδίσεις.

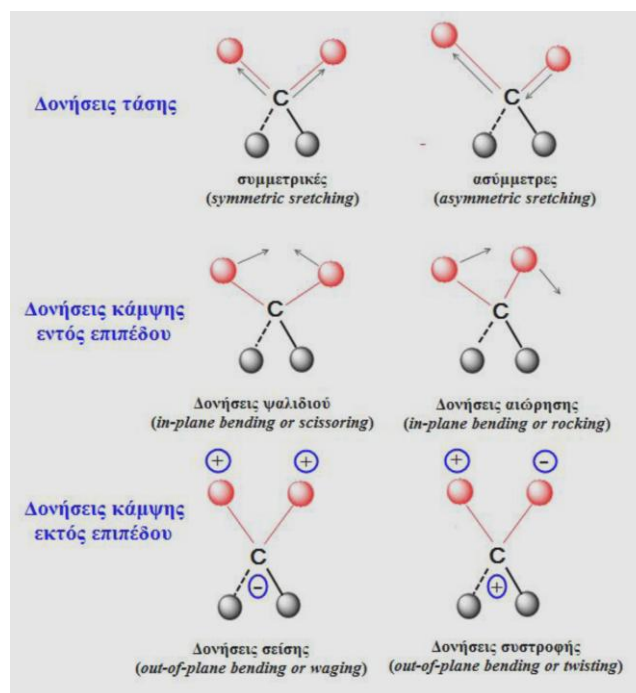
Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ICP-MS (Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometer) 7500cx coupled με αυτόματο δειγματολήπτη Series 3000, by Agilent Technologies, του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

3.3.4. Φασματοσκοπία υπέρυθρου (IR)

Η υπέρυθρη φασματοσκοπία (Infrared Spectrometry, IR) αποτελεί μια πολύ σημαντική τεχνική της οργανικής χημείας, η οποία χρησιμοποιείται για την λήψη φασμάτων διαφόρων οργανικών ενώσεων, καθώς και τη σύγκριση αυτών με φάσματα γνωστών ενώσεων.

Η αρχή της λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην απορρόφηση μέρους υπέρυθρης ακτινοβολίας με μεταβαλλόμενη συχνότητα, από τα μόρια του υλικού στο οποίο αυτή προσπίπτει. Τα άτομα των μορίων δεν παραμένουν ποτέ ακίνητα, αλλά αντιθέτως εκτελούν κινήσεις δόνησης και περιστροφής. Έτσι, όταν μια ποσότητα ύλης δεχτεί υπέρυθρη ακτινοβολία, ένα ποσοστό των μορίων της διεγείρεται και αυξάνει την ενέργεια δόνησης και περιστροφής τους. Οι συχνότητες με τις οποίες δονούνται τα άτομα στα μόρια εξαρτώνται μόνο από τις μάζες των ατόμων, τον τύπο του δεσμού και το σχήμα του μορίου. Αν ένα μόριο είναι συμμετρικό δεν παρατηρείται απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας, καθώς η απορρόφηση στο IR θα πραγματοποιηθεί εφόσον μεταβάλλεται η διπολική ροπή του μορίου κατά την διάρκεια της δόνησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της διπολικής ροπής, τόσο ισχυρότερη είναι και η απορρόφηση (Νικολαΐδης, 2016).

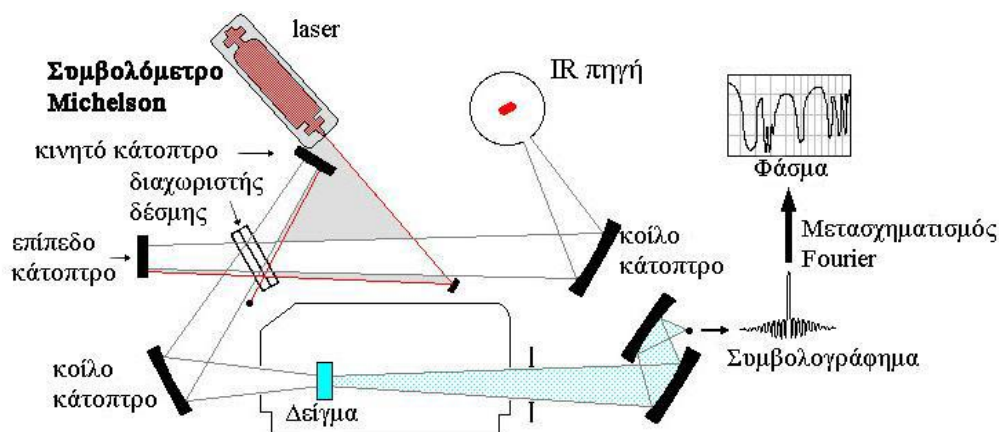
Οι δονήσεις που λαμβάνουν χώρα διακρίνονται σε δονήσεις τάσης και κάμψης. Υπάρχουν όμως και οι συνδυασμένες δονήσεις, δηλαδή άλλα είδη παραμόρφωσης της δομής του μορίου (Εικόνα 18), όπως όταν αυτό σείεται (wagging), κλυδωνίζεται (rocking), στρεβλώνεται (twisting), ή έχει ψαλιδωτή κίνηση (scissoring), κ.λπ. (Κουή κ.α., 2015).



Εικόνα 18: Βασικοί τύποι δονήσεων τάσης και κάμψης των μοριακών δομών (Κουή κ.α., 2015).

Οι δονήσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στις δονήσεις σκελετού και τις δονήσεις των χαρακτηριστικών ή δραστικών ομάδων. Οι πρώτες εμφανίζονται στη χαμηλότερη περιοχή του υπέρυθρου φάσματος ($1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$) και επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τη δομή του μορίου, ενώ οι δεύτερες αφορούν συχνότητες από 4000 έως 1400 cm^{-1} , και οφείλονται στη δόνηση ομάδων που αποτελούνται από δύο άτομα.

Η αδυναμία των κοινών φασματοφωτομέτρων είναι ο "θόρυβος" που δημιουργείται και σκεπάζει τις ταινίες απορρόφησης, καθώς οι εντάσεις των απορροφήσεων είναι πολύ μικρές. Η φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR) ήρθε να καλύψει αυτήν την αδυναμία, και έτσι αντί να καταγράφεται το ποσό ενέργειας που απορροφάται για διαφορετικές συχνότητες, η ακτινοβολία οδηγείται στο δείγμα αφού πρώτα διαμορφωθεί μέσω ενός συμβολόμετρου. Αφού περάσει μέσα από το δείγμα, το μετρούμενο σήμα είναι το συμβολογράφημα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα φάσμα όμοιο με αυτό της συμβατικής φασματοσκοπίας διασποράς (Βαλαβανίδης, 2006). Μια τυπική διάταξη φασματοφωτόμετρου FTIR παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Αναπαράσταση της λειτουργίας φασματοφωτόμετρου FTIR (Κουή κ.α., 2015).

Η υπέρυθη φασματοσκοπία έχει τη δυνατότητα να αναλύει δείγματα που βρίσκονται σε αέρια, υγρή ή στερεή φάση. Στην παρούσα μελέτη αναλύθηκαν μόνο στερεά δείγματα, τα οποία πρώτα είχαν υποστεί ξήρανση για 24 ώρες στους 105 °C. Η διαδικασία παρασκευής του δείγματος ξεκινάει ζυγίζοντας 100 mg φασματοσκοπικώς καθαρού KBr και 1 mg από το εκάστοτε προς ανάλυση δείγμα, τηρείται συνεπώς η αναλογία 100/1. Το δείγμα τοποθετείται σε γουδί, όπου γίνεται ανάμιξη και λειοτρίβηση των υλικών, ενώ στη συνέχεια τοποθετείται σε πρέσα, όπου του ασκείται πίεση 10 – 14 tones για 3 min. Από τη διαδικασία αυτή λαμβάνεται ταμπλέτα με διάμετρο 1.2 cm και πάχος 0.3 cm, η οποία αναλύεται στη συσκευή υπέρυθρης φασματοσκοπίας με μετασχηματισμό, μοντέλο Perkin – Elmer system 1000.

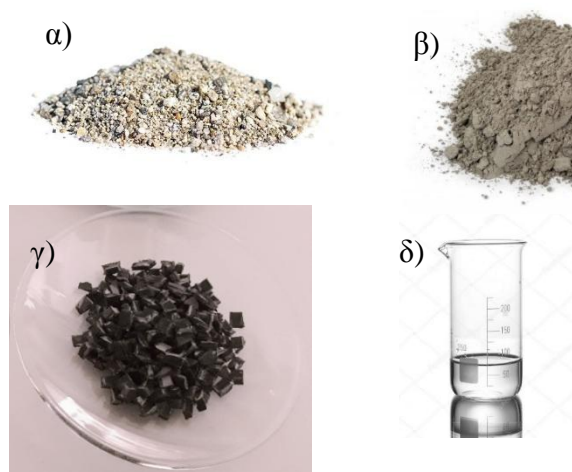
3.4. ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Μια από τις μεθόδους επαναχρησιμοποίησης των πλαστικών αποβλήτων αποτελεί η αξιοποίησή τους ως αδρανή υλικά στην κατασκευή κονιαμάτων και σκυροδέματος. Στην προκειμένη εργασία, μελετήθηκε η εφαρμογή ABS (Acrylonitrile – Butadiene – Styrene) πλαστικών από απόβλητα οθονών ηλεκτρονικού εξοπλισμού, σε τσιμεντοκονιάματα.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμαστική δοκιμή με στόχο τον προσδιορισμό της κοκκομετρίας του πλαστικού που θα χρησιμοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η χρήση κόκκων διαμέτρου < 4 mm και ινών πλαστικού ως προς την αντοχή που προσέδιδαν στα δοκίμια. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι ίνες ABS μείωσαν σε μεγάλο βαθμό την θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων, ενώ δημιούργησαν προβλήματα

και κατά την διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων. Έτσι, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν κομμάτια πλαστικού για την διεξαγωγή των υπόλοιπων πειραμάτων.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν τσιμέντο τύπου CEM II/A-m 42.5 N, ασβεστολιθική άμμος διαμέτρου $< 4\text{ mm}$, νερό και πλαστικό απόβλητο (Εικόνα 20). Αρχικά, τα πλαστικά απόβλητα τεμαχίστηκαν χειρωνακτικά σε μικρότερα κομμάτια, με τελικό μέγεθος $< 4\text{ mm}$, έτσι ώστε να αντικαταστήσουν τμήμα της αδρανούς άμμου. Η άμμος ξηράθηκε στους $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ για 24 ώρες και στη συνέχεια κοσκινίστηκε, για να μην υπερβαίνει το επιθυμητό μέγεθος.



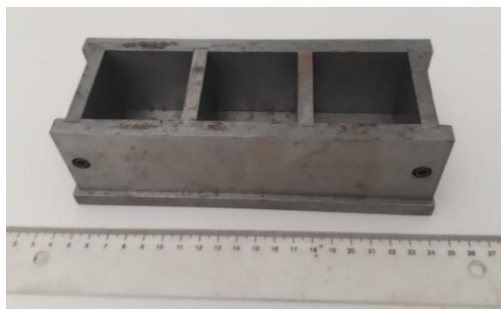
Εικόνα 20: α)Ασβεστολιθική άμμος, β)Τσιμέντο CEM II/A-m 42.5N, γ)Πλαστικό ABS, δ)Νερό.

Τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος κατασκευάστηκαν σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM C 109/C 109M – 07, η οποία αναφέρεται σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων $5\times 5\times 5\text{ cm}$. Η αντικατάσταση της άμμου από το ABS έγινε σε ποσοστά 2.5, 5, 7.5, 10 και 12.5%. Οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων ήταν οι προτεινόμενες της παραπάνω πρότυπης μεθόδου και αναγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 4. Σημαντική παράμετρος που διατηρήθηκε σταθερή και σύμφωνη με την πρότυπη μέθοδο ήταν η αναλογία νερού τσιμέντου (w/c ratio), η οποία παρέμεινε στα 0.5.

Πίνακας 4: Ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΥΛΙΚΑ	Αντικατάσταση άμμου (%)					
	0	2.5	5	7.5	10	12.5
Τσιμέντο (g)	411	411	411	411	411	411
Άμμος (g)	1130	1102	1074	1045	1017	989
Νερό (mL)	200	200	200	200	200	200
Πλαστικό (g)	0	28	56	85	113	141

Τα υλικά αφού αναμίχθηκαν με τη βοήθεια εργαστηριακού αναδευτήρα, τοποθετήθηκαν σε μήτρες τριών κυβικών δοκιμίων, διαστάσεων 5×5×5 cm (Εικόνα 21, 22). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά την εισαγωγή του μίγματος στις μήτρες, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία φυσαλίδων, και να δημιουργηθούν συμπαγή και ομοιόμορφα δοκίμια. Έπειτα, οι μήτρες αφέθηκαν στην ηρεμία, σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες, ώστε να σταθεροποιηθούν τα δοκίμια, τα οποία στη συνέχεια αφαιρέθηκαν προσεκτικά και διατηρήθηκαν σε περιβάλλον με 100% υγρασία και θερμοκρασία στους 22 °C. Η ωρίμανση των δοκιμίων στις συνθήκες αυτές διήρκεσε για 7 και 28 ημέρες, αντίστοιχα. Οι ημέρες αυτές επιλέχθηκαν βάσει βιβλιογραφίας, σύμφωνα με την οποία το κονίαμα αποκτά τη μέγιστη αντοχή του την 28^η ημέρα. Για κάθε αναλογία αντικατάστασης εξετάστηκαν τρία δοκίμια στις 7 ημέρες ωρίμανσης και τρία δοκίμια στις 28 ημέρες.

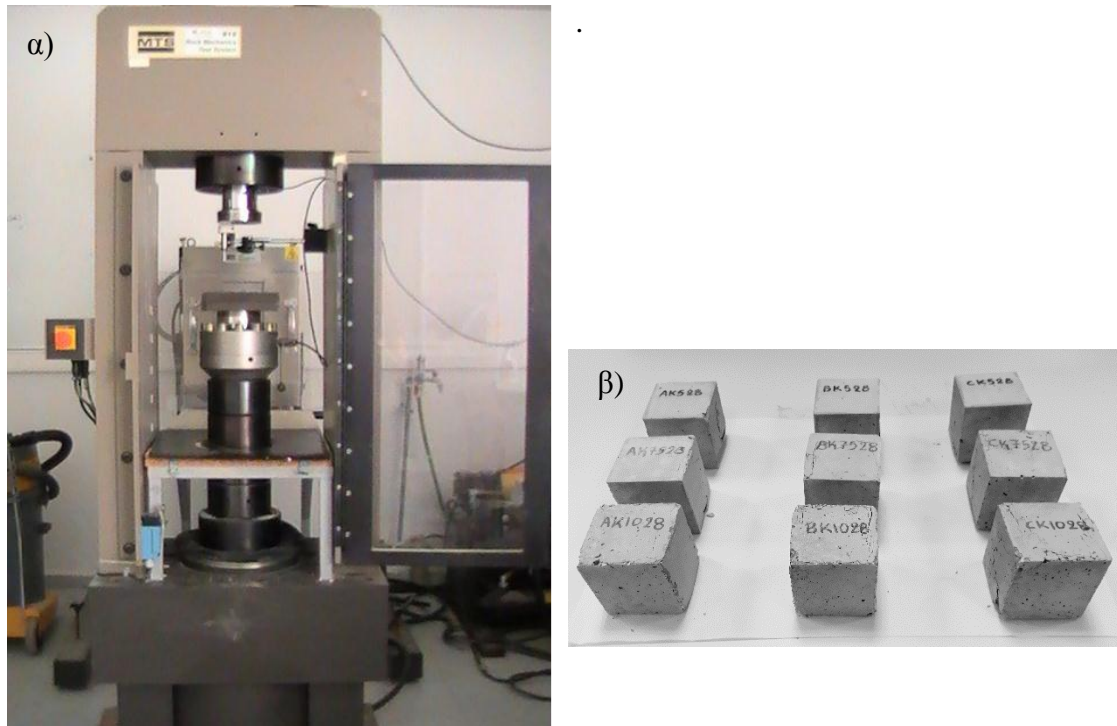


Εικόνα 21: Μήτρα τετραγωνικών δοκιμίων διαστάσεων 5×5×5 cm.



Εικόνα 22: : Εργαστηριακός αναδευτήρας.

Σε επόμενο στάδιο, τα δοκίμια οδηγήθηκαν για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων, με πρέσα τύπου MTS – 815 με δυναμικότητα ± 1600 kN μέγιστης δύναμης και μέγιστης μετατόπισης ± 50 mm (Εικόνα 23). Τα αποτελέσματα έδειξαν την θλιπτική αντοχή των εξεταζόμενων δοκιμίων, καθώς και το μέτρο ελαστικότητάς τους.



Εικόνα 23: α) Πρέσα τύπου MTS – 815, β) Δοκίμια μετά την θλίψη.

Επιπλέον μετρήσεις για τις φυσικές ιδιότητες των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών & Υάλου, όπου μετρήθηκε το πορώδες, η πυκνότητα και η υδατοαπορροφητικότητά τους (Εικόνα 24). Η διαδικασία με την οποία υπολογίστηκαν οι παραπάνω ιδιότητες είχε τα ακόλουθα βήματα:

- i. Ζύγιση της ξηρής μάζας των δειγμάτων
- ii. Τοποθέτηση των δειγμάτων σε δοχείο υπό κενό αέρος για περίπου μία ώρα
- iii. Πλήρωση του δοχείου με νερό για 24 ώρες
- iv. Ζύγιση της κορεσμένης μάζας των δειγμάτων
- v. Ζύγιση των δειγμάτων



Εικόνα 24: Δοχείο για την μέτρηση του πορώδους, της πυκνότητας και της υδατοαπορροφητικότητάς.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

4.1.1. Θερμογόνος δύναμη

Η ανάλυση των δειγμάτων ως προς τη θερμογόνο δύναμή τους επέφερε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης.

ΔΕΙΓΜΑ	ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ (MJ/KG)	ΔΕΙΓΜΑ	ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ (MJ/KG)
ABS		ABS/PC+HIPS	
LCD_2	34.5	LCD_3	39.1
LCD_4	39.5	LCD_6	41.1
LCD_5	39.3	LCD_12	39.2
LCD_9	39.0	LCD_13	41.2
LCD_10	38.9	ABS/HIPS	
LCD_11	39.6	LCD_14	39.8
ABS/PC+ABS			
LCD_1	39.4		
LCD_7	39.0		
LCD_8	39.1		

Όπως γίνεται φανερό και από τα αποτελέσματα της θερμογόνου δύναμης, οι τιμές για όλα τα δείγματα πλαστικών που εξετάστηκαν κυμαίνονται περίπου στα 39 MJ/kg, με μόνο ένα δείγμα ABS να μειώνεται στα 34 MJ/kg. Ελάχιστα υψηλότερη τιμή, στα 41 MJ/kg, παρατηρήθηκε σε δύο δείγματα ABS/PC+HIPS. Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα της προκείμενης ανάλυσης συμβαδίζουν με την βιβλιογραφία, όπου όπως έχει αναφερθεί λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς των πλαστικών σε υδρογονάνθρακες, η θερμιδική τους αξία είναι εξίσου αυξημένη, αγγίζοντας τα 40 MJ/kg (Wasilewski & Siudyga. 2013). Πιο συγκεκριμένα η αναφορά των Patel *et.al.*, 2006, παρουσιάζει πως το ABS και το PC έχουν θερμογόνο δύναμη ίση με 41,92 και 32,11 MJ/kg, αντίστοιχα.

Γενικά, στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν και πολλές αναφορές της θερμογόνου δύναμης για τα συγκεκριμένα είδη πλαστικών που εξετάστηκαν. Παρόλα αυτά, το γεγονός πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν εμπίπτουν στα όρια τιμών της θερμογόνου δύναμης των πλαστικών ως συνολικό ρεύμα (40 MJ/kg), είναι αρκετά ικανοποιητικό.

Η υψηλή θερμιδική αξία των πλαστικών, όπως έδειξαν και τα αποτελέσματα, είναι ο βασικός παράγοντας που τα καταστεί ιδανικά απόβλητα για ενεργειακή ανάκτηση. Λόγω της πετροχημικής προέλευσής τους, έχουν κοντινή απόδοση με το πετρέλαιο (43 MJ/kg), ενώ ξεπερνάν κατά πολύ το κάρβουνο και το ξύλο, των οποίων η θερμογόνος δύναμη κυμαίνεται στα 30 και 19 MJ/kg, αντίστοιχα (Endres & Siebert-Raths, 2011).

4.1.2. Στοιχειακή ανάλυση

Η στοιχειακή ανάλυση είναι μια μέθοδος προσδιορισμού της περιεκτικότητας των πλαστικών αποβλήτων σε άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο, θείο και οξυγόνο. Τα αποτελέσματα για τα απόβλητα της μελέτης παρουσιάζονται ανά κατηγορία πλαστικού στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης των δειγμάτων.

Δείγμα	C%	H%	N%
ABS			
LCD_2	86.39	9.77	5.72
LCD_4	86.60	10.35	3.14
LCD_5	85.72	10.32	3.15
LCD_9	85.78	9.65	3.89
LCD_10	85.38	9.75	3.44
LCD_11	85.61	8.91	3.01
ABS/PC+ABS			
LCD_1	76.51	9.10	4.38
LCD_7	68.03	9.30	0.99
LCD_8	86.91	10.80	4.42
ABS/PC+HIPS			
LCD_3	80.35	9.42	4.67
LCD_6	92.74	10.01	-
LCD_12	86.06	10.14	2.09
LCD_13	92.84	10.03	-
ABS/HIPS			
LCD_14	89.20	10.64	4.45

Καθώς τα πλαστικά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από υδρογονάνθρακες, είναι λογικό ο περιεχόμενος άνθρακας να κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά ποσοστά, όπως επιβεβαιώνουν και τα παραπάνω αποτελέσματα. Οι διακυμάνσεις των τιμών του άνθρακα, αζώτου και υδρογόνου που παρατηρούνται οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παρασκευή των υπό εξέταση προϊόντων, η οποία διαφέρει στις εκάστοτε κατασκευαστικές εταιρείες.

Πιο συγκεκριμένα, το ABS πλαστικό είναι το μόνο από τα εξεταζόμενα που περιέχει ομάδες νιτριλίου, όπως φανερώνει και η ονομασία του. Αντίθετα, τα PC και HIPS έχει βρεθεί πως περιέχουν ελάχιστο άζωτο, τις περισσότερες φορές μη ανιχνεύσιμο (*Cafiero et.al. 2014*). Έτσι, το δείγμα LCD_2, που αποτελείται μόνο από ABS φέρει και την υψηλότερη ποσότητα που ανιχνεύθηκε (5.72%), ενώ στα υπόλοιπα δείγματα το ποσοστό αυτό μειώνεται, εξ' αιτίας της ποικιλίας αναλογιών των τριών πλαστικών που βρίσκονται στα προκείμενα απόβλητα.

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από παλαιότερες μελέτες για την στοιχειακή ανάλυση των εξεταζόμενων δειγμάτων, που όπως προκύπτει συμφωνούν με τα ευρήματα της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα στοιχειακής ανάλυσης παλαιότερων ερευνών.

Είδος πλαστικού	C %	H %	N%	Πηγή
ABS	90.07	9.02	0.82	Taurino et.al., 2010
ABS/PC	80.08	7.32	0.44	
Br - ABS	72.3	6.4	4.1	Onwudili et.al., 2009
ABS	73.3	6	4.5	Acomb et.al., 2013
HIPS	78.8	6.6	1.2	
ABS	72.3	6.4	4.1	Muhammad et.al., 2015
HIPS	80.5	7.3	0.2	
ABS	70.8	6.7	4.4	Tostar et.al., 2013
Br - ABS	71.9	6.6	3.9	Hlaing et.al., 2014
ABS	85.9	8	5.08	Cafiero et.al., 2014

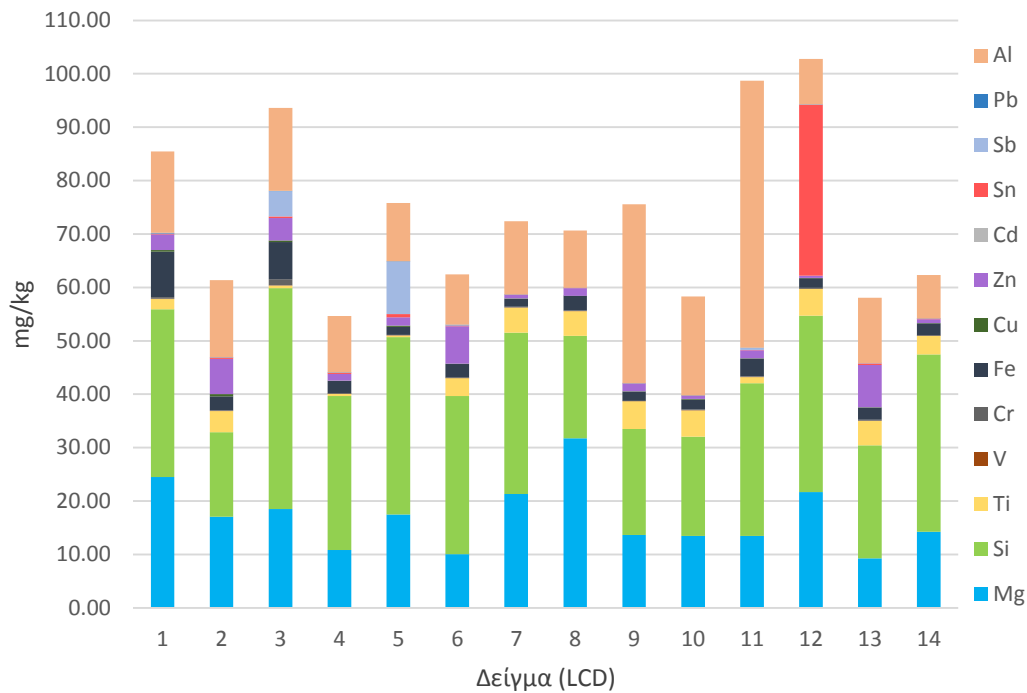
4.1.3. Χώνευση – Ανάλυση δειγμάτων

Τα πλαστικά προϊόντα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, από τη σύστασή τους περιέχουν ποικιλία μετάλλων, καθένα από τα οποία έχουν τον ρόλο τους στο τελικό προϊόν. Πολλά από αυτά τα μέταλλα όμως είναι τοξικά και μπορούν εύκολα να ρυπάνουν το περιβάλλον εάν δεν διαχειριστούν σωστά. Για τον λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει αυστηρά όρια στη χρήση επικίνδυνων ουσιών στον ΗΗΕ, που περιλαμβάνουν το μόλυβδο (Pb), υδράργυρο (Hg), κάδμιο (Cd), χρώμιο (Cr) και βρώμιο (Br) (Οδηγία 2011/65/EE).

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η περιεκτικότητα συγκεκριμένων μετάλλων σε πλαστικά απόβλητα οθονών LCD. Στα Διαγράμματα 3, 4 και 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων μετάλλων.

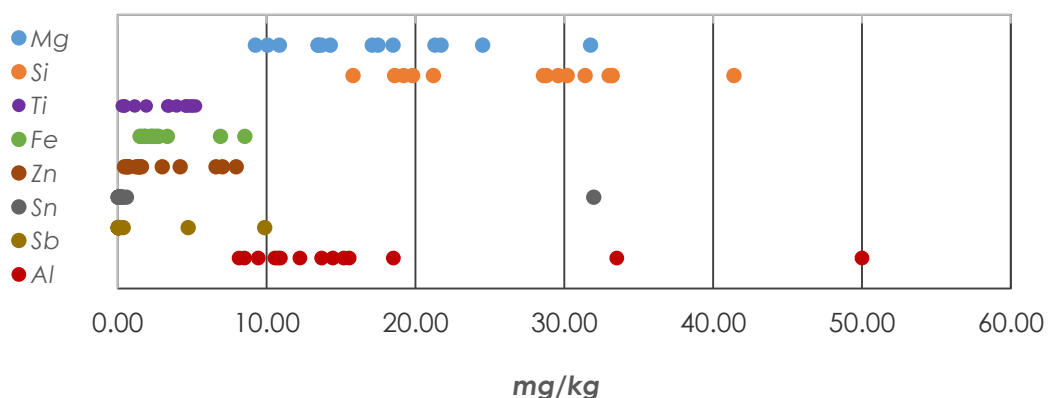
Όπως γίνεται ξεκάθαρο από τα αποτελέσματα, σε όλα τα δείγματα τα μέταλλα που κυριαρχούν είναι το πυρίτιο (Si), το μαγνήσιο (Mg) και το αργίλιο (Al). Εξαίρεση αποτελεί το δείγμα LCD_12 (ABS/PC+HIPS), όπου είναι το μόνο που παρουσιάζει περίπου 30% κασσίτερο (Sn), συγκριτικά με τα υπόλοιπα δείγματα που η συγκέντρωσή του είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Η παρουσία Si, Mg και Al υποδηλώνει την ύπαρξη επιβραδυντών φλόγας με αργίλιο και μαγνήσιο, καθώς όταν τα πολυμερή περιέχουν MgO και Al₂O₃ είναι σχεδόν βέβαιο πως περιέχουν και SiO₂, υποδεικνύοντας έτσι την παρουσία πυριτικού μαγνησίου και πυριτικού αργιλίου (Maris *et.al.*, 2015; Kousaiti *et.al.*, 2018). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως το κάθε δείγμα παρουσίασε διαφορετική αναλογία των εξεταζόμενων μετάλλων, ακόμα και αν ανήκαν στην ίδια κατηγορία πλαστικών.

Επιπλέον, το αντιμόνιο (Sb), το οποίο θεωρείται ως ένα ιδιαίτερα τοξικό μέταλλο και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το βρώμιο στους επιβραδυντές φλόγας των πλαστικών, εντοπίστηκε σε ποσοστό μικρότερο του 10% σε δύο μόνο δείγματα (LCD_3 και LCD_5). Δυστυχώς, στην παρούσα μελέτη δεν ήταν εφικτή η ποσοτικοποίηση της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε βρώμιο, ώστε να δοθεί μια πληρέστερη εικόνα της σύστασής τους. Επόμενα μέταλλα που εντοπίστηκαν σε σημαντικές ποσότητες είναι το τιτάνιο (Ti), ο ψευδάργυρος (Zn) και ο σίδηρος (Fe), τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως ως χρωστικές (TiO₂, ZnO, Fe₂O₃), ενώ ο ψευδάργυρος μπορεί να βρει χρήση και ως σταθεροποιητικό (Dimitrakakis *et.al.*, 2009a; Taurino *et.al.*, 2010).

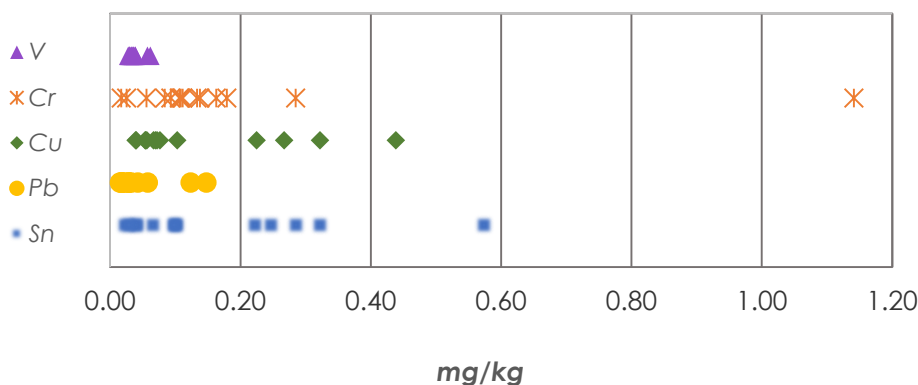


Διάγραμμα 3: Συγκέντρωση μετάλλων στα υπό εξέταση πλαστικά δείγματα.

Σημαντική αναφορά για τα προκείμενα αποτελέσματα είναι η μηδενική συγκέντρωση καδμίου σε όλα τα εξεταζόμενα δείγματα, καθώς και η ιδιαίτερα μικρή συγκέντρωση του μολύβδου και του χρωμίου. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Οδηγία RoHS το όριο ανίχνευσης για τον μολύβδο και το χρώμιο (εξασθενές χρώμιο) είναι 1000 ppm, ενώ τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης έδειξαν συγκεντρώσεις περίπου στα 2.5 ppb και 10 ppb, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4: Εύρος συγκεντρώσεων μετάλλων στα εξεταζόμενα δείγματα, για συγκεντρώσεις έως 50 mg/kg. (Mg: μαγνήσιο, Si: πυρίτιο, Ti: τιτάνιο, Fe: σίδηρος, Zn: ψευδάργυρος, Sn: κασσίτερος Sb: αντιμόνιο, Al: αργίλιο)



Διάγραμμα 5: Εύρος συγκεντρώσεων μετάλλων στα εξεταζόμενα δείγματα, για συγκεντρώσεις έως 1.20 mg/kg. (V: βανάδιο, Cr: χρώμιο, Cu: χαλκός, Pb: μόλυβδος, Sn: κασσίτερος)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συγκέντρωση του ασβεστίου στα δείγματα (Πίνακας 8), η οποία ξεπερνά τα 100 mg/kg στα περισσότερα. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη χρήση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) ως πληρωτικό υλικό στα πλαστικά προϊόντα (Stenvall *et.al.*, 2013; Kousaiti *et.al.*, 2018).

Πίνακας 8: Συγκεντρώσεις ασβεστίου στα εξεταζόμενα πλαστικά δείγματα.

Ca (mg/kg)						
LCD_1	LCD_2	LCD_3	LCD_4	LCD_5	LCD_6	LCD_7
288.2	42.60	80.60	29.60	35.40	147.60	19.40
LCD_8	LCD_9	LCD_10	LCD_11	LCD_12	LCD_13	LCD_14
18.00	33.60	22.60	43.80	204.20	50.00	27.00

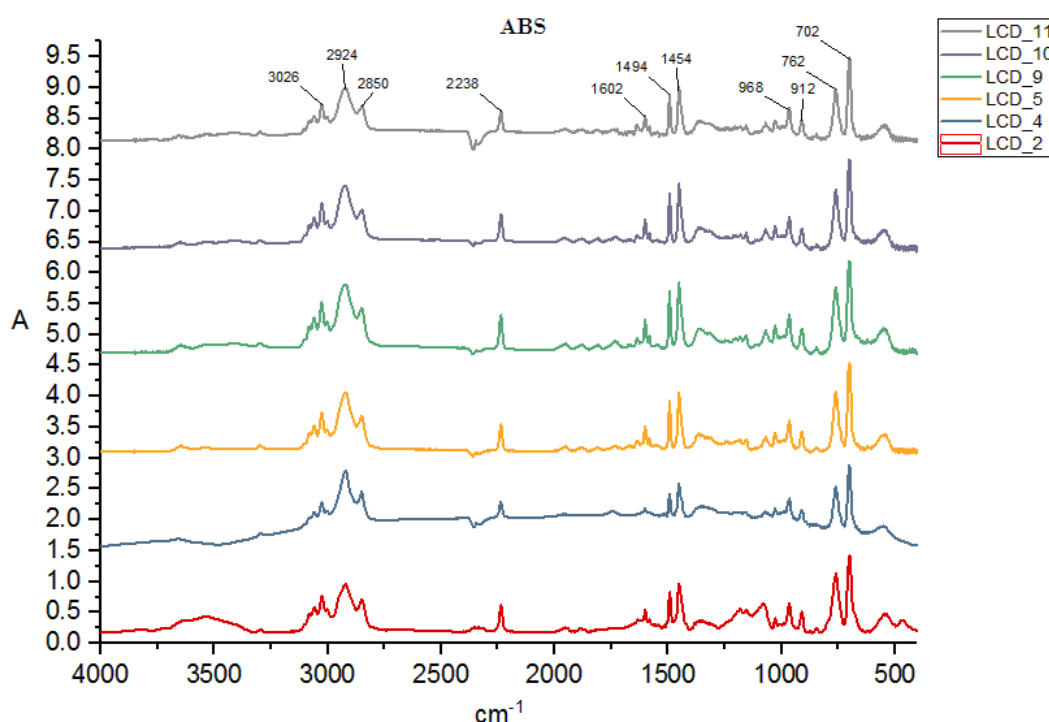
Το συμπέρασμα που προκύπτει απ' την ανάλυση των αποτελεσμάτων για την περιεκτικότητα μετάλλων στα εξεταζόμενα δείγματα είναι πως οι τιμές των κρίσιμων τοξικών μετάλλων είναι πολύ χαμηλότερες των νομοθετικών ορίων, ενώ σε όλα τα δείγματα εμπεριέχονται επιβραδυντικά φλόγας μαγνησίου και αργιλίου.

4.1.4. Φασματοσκοπία υπερύθρου (IR)

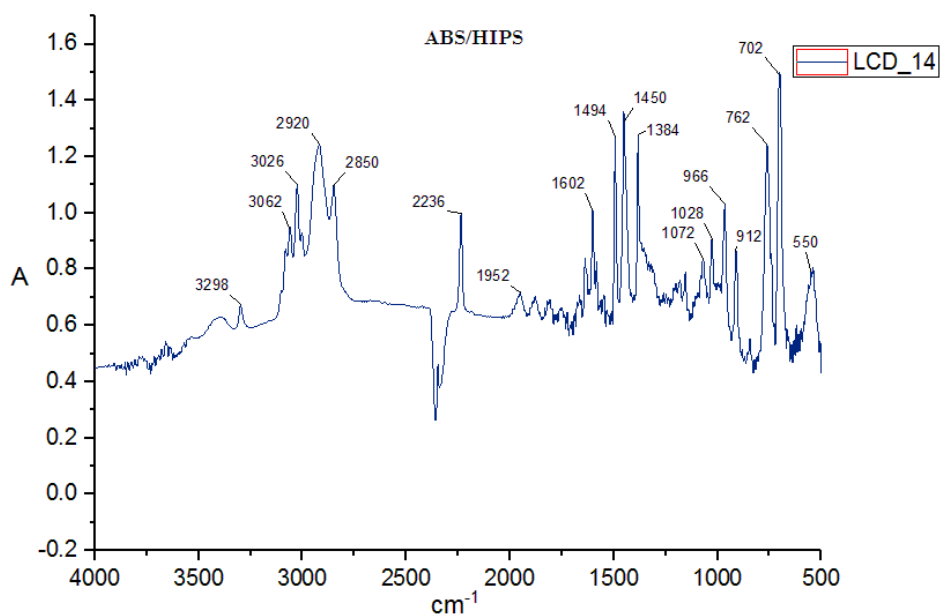
Η φασματοσκοπία υπερύθρου αποτελεί μια ιδιαίτερος ορθή μέθοδο για την αναγνώριση της χημικής δομής των υλικών. Συγκεκριμένα, για τα πλαστικά είναι ένας εύκολος τρόπος προσδιορισμού της κατηγορίας στην οποία ανήκουν, καθώς και αν αποτελούν μίγμα πολυμερών ή όχι. Τα πλαστικά απόβλητα που μελετήθηκαν στην

παρούσα μελέτη περιείχαν ABS, PC και HIPS σε διάφορες αναλογίες πρόσμιξης και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στα Διαγράμματα 6 – 9.

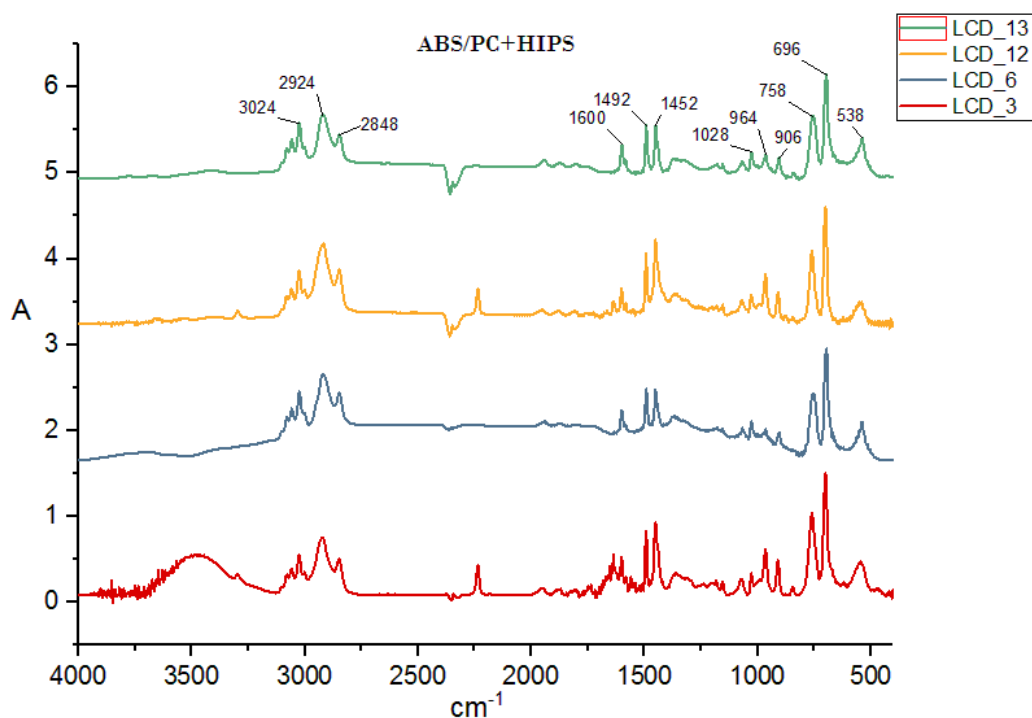
Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται το φάσμα που προέκυψε από την ανάλυση έξι δειγμάτων που περιείχαν μόνο ABS, σύμφωνα με την αναγραφή της εκάστοτε εταιρίας. Οι κορυφές που ξεχωρίζουν και προδίδουν την ύπαρξη του συγκεκριμένου πλαστικού είναι στα 2238 cm^{-1} και $968 - 912\text{ cm}^{-1}$, όπου διακρίνεται ο δεσμός νιτριλίου ($\text{C}\equiv\text{N}$) και το βουταδιένιο, αντίστοιχα (Taurino *et.al.*, 2010). Το ABS και το HIPS παρουσιάζουν τους ίδιους δεσμούς, με δύο μονομερή ίδια (βουταδιένιο και στυρένιο), και έτσι μόνο η παρουσία του νιτριλίου μπορεί να βοηθήσει στην αναγνώρισή τους στο φάσμα (Cafiero *et.al.* 2014). Η απορρόφηση στα 1494 και 1454 cm^{-1} υποδηλώνει την ύπαρξη αρωματικού δακτυλίου από το στυρένιο, ενώ και στις κορυφές 762 και 702 cm^{-1} φαίνεται η κάμψη βενζολικού δακτυλίου ($-\text{C}-\text{H}$). Επίσης, το τέντωμα του διπλού και απλού αρωματικού δεσμού άνθρακα ($\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{H}$) υποδηλώνεται από την κορυφή στα 1602 cm^{-1} και $2924 - 2850\text{ cm}^{-1}$, αντίστοιχα. (Truc & Lee, 2017)



Διάγραμμα 6: Φάσμα απορροφήσεων για τα ABS πλαστικά δείγματα. (LCD_2, LCD_4, LCD_5, LCD_9, LCD_10, LCD_11)



Διάγραμμα 8: Φάσμα απορροφήσεων για το ABS/HIPS δείγμα. (LCD_14)

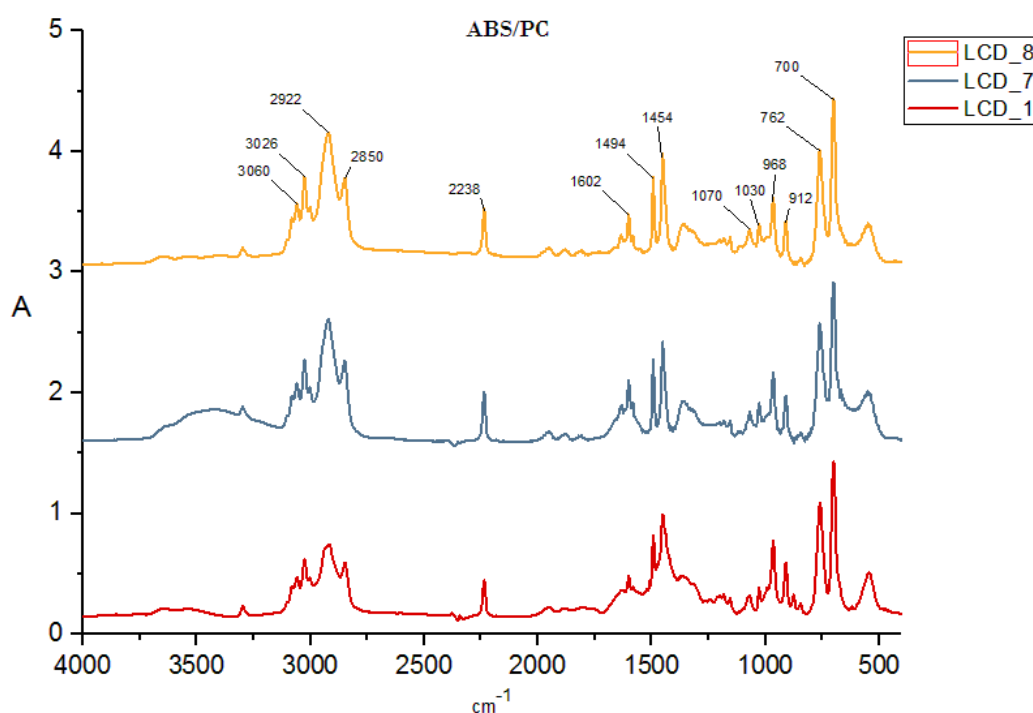


Διάγραμμα 7: Φάσμα απορροφήσεων για τα ABS/PC+HIPS πλαστικά δείγματα. (LCD_3, LCD_6, LCD_12, LCD_13)

Όσον αφορά το PC πλαστικό, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η χαρακτηριστική κορυφή για την αναγνώρισή του βρίσκεται στα 1720 cm^{-1} , όπου παρατηρείται επέκταση του καρβονυλίου. Τα αποτελέσματα της προκείμενης ανάλυσης δεν έδειξαν

αυτήν την κορυφή σε κανένα δείγμα, γεγονός που πιθανώς υποδεικνύει την ιδιαίτερα μικρή ποσότητα ή την απουσία του συγκεκριμένου είδους πλαστικού από τα εξεταζόμενα απόβλητα (Διάγραμμα 7 και 8).

Επίσης, σύμφωνα με το φάσμα της ανάλυσης των πλαστικών, δύναται να επιβεβαιωθεί και η παρουσία οξειδίων των μετάλλων, όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, στην κορυφή 2924 cm^{-1} , συναντάται το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), το διοξείδιο του τιτανίου και του πυριτίου (TiO_2 , SiO_2). Επίσης, το οξείδιο του αργιλίου και του σιδήρου (Al_2O_3 , Fe_2O_3) εμφανίζονται στην κορυφή 1366 cm^{-1} , ενώ το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) στα 848 cm^{-1} . Τα μέταλλα αυτά βρίσκονται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες σε όλα τα δείγματα πλαστικών, οπότε η εμφάνισή τους και στο φασματοσκοπικό φάσμα υπερύθρων ήταν αναπόφευκτη.



Διάγραμμα 9: Φάσμα απορροφήσεων για τα ABS/PC πλαστικά δείγματα. (LCD_1, LCD_7, LCD_8)

4.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΕ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Για την μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων με μερική αντικατάσταση αδρανών από πλαστικό ABS και σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο ($w/c=0.49$), εξετάστηκαν κάποιες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα,

μελετήθηκε η θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των εξεταζόμενων αναλογιών (2.5, 5, 7.5, 10 και 12.5% ABS) στις 7 και 28 ημέρες ωρίμανσης, καθώς και το πορώδες, η πυκνότητα και η υδατοαπορροφητικότητα τους.

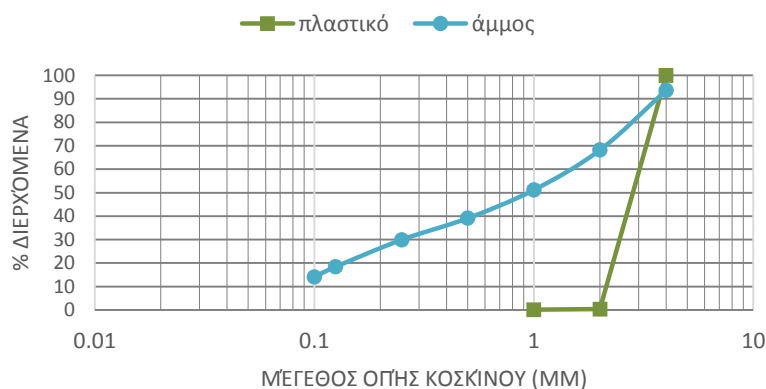
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: α) κομμάτια πλαστικού ABS, με χαρακτηριστικά που περιεγράφηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα, β) τσιμέντο τύπου CEM II/A-m 42.5 N, με χημική σύσταση όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 9, γ) ασβεστολιθική άμμος, με κοκκομετρική διαβάθμιση όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10 και δ) ποσότητα νερού.

Πίνακας 9: Χημική σύσταση τσιμέντου CEM II/A-m 42.5 N (Τάσσος X., κ.α., 2018).

CEM II/A-m 42.5 N

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O
23.85	5.22	4.13	58.2	3.2	3.3	0.68
Na_2O	TiO_2	P_2O_5	SrO	Cr_2O_3	ZnO	MnO
0.32	0.24	0.06	0.03	0.02	0.01	-

Για την κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα με μέγεθος οπής 4, 2, 1, 0.50, 0.25, 0.125, 0.100, 0.063 mm, σύμφωνα με το πρότυπο EN 13139:2002, για τα λεπτόκοκκα αδρανή κονιαμάτων. Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 10, η ομοιόμορφη κατανομή της άμμου σε όλο το φάσμα των διαμέτρων, δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ορθή κατασκευή των δοκιμίων. Να σημειωθεί πως η ίδια κατανομή δεν παρατηρείται από τα κομμάτια πλαστικού, των οποίων το μέγεθος περιορίζεται μεταξύ $4 < ABS < 2 \text{ mm}$.



Διάγραμμα 10: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου και πλαστικών αποβλήτων.

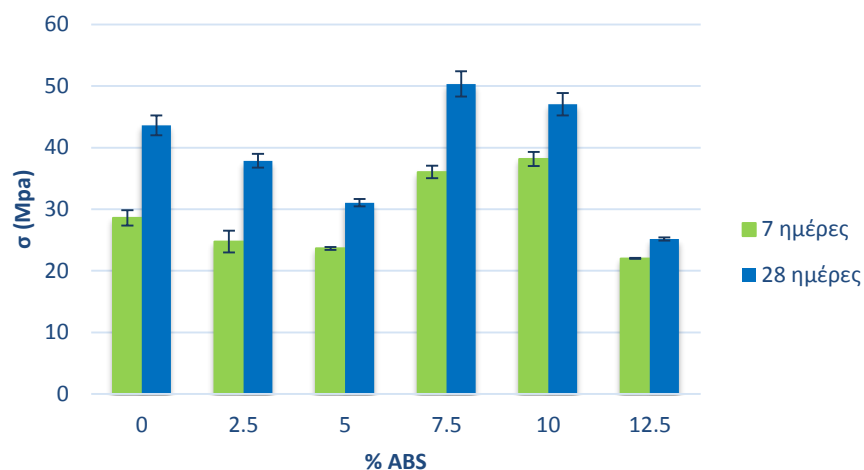
Θλιπτική αντοχή

Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων για τις διάφορες αναλογίες αντικατάστασης πλαστικού, για 7 και 28 ημέρες ωρίμανσης, των τριών επαναλήψεων αντίστοιχα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 11, ενώ στον Πίνακα 10 παρατίθεται η μέση τιμή αυτών.

Όπως γίνεται φανερό, η θλιπτική αντοχή αυξάνεται σύμφωνα με τις ημέρες ωρίμανσης των δοκιμίων (7 και 28 ημέρες), για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης της άμμου. Αυτό συμβαίνει διότι με το πέρας του χρόνου ωρίμανσης των δοκιμίων, σε περιβάλλον με 100% υγρασία, η ενυδάτωση του τσιμέντου αυξάνεται και συνεπώς η συνεκτικότητα των κονιαμάτων είναι καλύτερη (Ghernouti & Rabehi, 2012).

Επίσης, παρατηρείται μια ανομοιογενής συμπεριφορά από τα δοκίμια στις διάφορες αναλογίες αντικατάστασης. Τα δείγματα με 2.5, 5 και 12.5% αντικατάσταση πλαστικού παρουσιάζουν χαμηλότερη θλιπτική αντοχή από το πρότυπο, ενώ υψηλότερη αυτού παρατηρείται στα δείγματα με 7.5 και 10% αντικατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, για τις 7 ημέρες ωρίμανσης επέρχεται μείωση της αντοχής κατά 13.4, 17.3 και 23% από την αντικατάσταση 2.5, 5 και 12.5% πλαστικού, αντίστοιχα, ενώ 26 και 33.4% αύξηση στην θλιπτική αντοχή έχουν τα δοκίμια με 7.5 και 10% πλαστικό, αντίστοιχα. Κατά τον ίδιο τρόπο, η αντοχή στις 28 ημέρες ωρίμανσης των κονιαμάτων με 2.5, 5 και 12.5% πλαστικό ABS μειώνεται κατά 13.2, 28.8 και 42.3%, αντίστοιχα, ενώ από την άλλη τα κονιάματα με 7.5 και 10% πλαστικό παρουσιάζουν αύξηση κατά 15.4 και 7.8%, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς δεν είναι σύνηθες να αυξάνεται η θλιπτική αντοχή κονιαμάτων που περιέχουν ως αδρανή πολυμερή υλικά.

Η θλιπτική αντοχή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως τον λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c ratio), το είδος, το σχήμα και την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και τη θερμοκρασία ωρίμανσης. Στην περίπτωση που εξετάζονται τσιμεντοκονιάματα με μερική αντικατάσταση αδρανών από πολυμερή, σημαντικό ρόλο παίζουν το σχήμα και το είδος του πλαστικού, καθώς και οι αναλογίες αντικατάστασης.



Διάγραμμα 11: Θλιπτική αντοχή δοκιμίων για τις αναλογίες αντικατάστασης, σε 7 και 28 ημέρες.

Η μείωση της θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων είναι κάτι που συναντάται πολύ συχνά στην βιβλιογραφία και οφείλεται κυρίως, στην μειωμένη συνάφεια μεταξύ της επιφάνειας του πλαστικού και του τσιμεντοπολτού, και τον υδρόφοβο χαρακτήρα των πλαστικών, ο οποίος εμποδίζει την απαιτούμενη ενυδάτωση των δοκιμίων κατά την περίοδο ωρίμανσής τους (Gu & Ozbakkaloglu, 2016; Saikia & de Brito, 2012). Στις περισσότερες περιπτώσεις η μείωση της αντοχής γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης.

Πίνακας 10: Τιμές θλιπτικής αντοχής δοκιμίων για τις εξεταζόμενες αναλογίες αντικατάστασης, στις 7 και 28 ημέρες ωρίμανσης.

ΗΜΕΡΕΣ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ	% ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ					
	0	2.5	5	7.5	10	12.5
	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)					
7	28.61	24.76	23.66	36.04	38.17	22.02
28	43.62	37.87	31.06	50.34	47.04	25.16

Αντίθετα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής δεν έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές του συγκεκριμένου τομέα. Για την έγκυρη επεξήγησή της απαιτείται η μικροσκοπική διερεύνηση των κονιαμάτων, ώστε να γίνει αντιληπτός ο τρόπος ενσωμάτωσης του πλαστικού στην δομή της μήτρας του τσιμεντοπολτού. Δυστυχώς, στην παρούσα εργασία δεν ήταν εφικτή η πραγματοποίηση μιας τέτοιας ανάλυσης.

Παρόλα αυτά, χρησιμοποιώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους που μετρήθηκαν, δύναται να δοθεί μια επαρκής απάντηση σε αυτήν την συμπεριφορά των δοκιμίων.

Σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι *Rahmani et.al.*, 2013, που μελέτησαν την μερική αντικατάσταση αδρανών με πλαστικό PET, με μέγιστη κοκκομετρία 7 mm και λόγο νερού προς τσιμέντο 0,54. Παρατήρησαν πως για 5% αντικατάσταση, η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων αυξήθηκε κατά 12%, ενώ για αντικατάσταση PET 10%, η αντοχή ήταν πολύ κοντά με αυτή του προτύπου. Αυτό, σύμφωνα με τους ερευνητές, οφείλεται στην πολύ καλή αλληλοσύνδεση των πλαστικών κομματιών με την θραυσμένη επιφάνεια του τσιμεντοπολτού, κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου. Το σχήμα, η ευκαμψία και το χαμηλό ποσοστό αντικατάστασης των PET πιθανολογείται πως συνέβαλε για αυτήν την καλή συμπεριφορά των δοκιμίων. Αντίστοιχα, οι *Marzouk et.al.*, 2007, παρατήρησαν πως, για χρήση PET μεγέθους μικρότερο από 5 mm και λόγο νερού προς τσιμέντο 0.5, η έως 50% αντικατάσταση των αδρανών σε κονιάματα, παρουσίασε θλιπτική αντοχή πολύ κοντινή σε αυτή του προτύπου. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το ακανόνιστο σχήμα καθώς και η τραχιά επιφάνεια των πλαστικών συνέβαλε στην ενίσχυση της "σκελετικής" δομής των αδρανών, τόσο μεταξύ τους όσο και με το μίγμα της τσιμεντόπαστας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση όλων των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων, και το γεγονός πως ο λόγος νερού προς τσιμέντο, το είδος του πλαστικού και οι συνθήκες ωρίμανσης παραμένουν σταθερές για όλες τις δοκιμές, απομένει η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών (άμμος και πλαστικό), η οποία είναι σε θέση να επηρεάσει την αντοχή. Τα αδρανή έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην κατασκευή κονιαμάτων, καθώς η καλή διαβάθμισή τους, με διαστάσεις κόκκων που να καλύπτουν όλο το φάσμα κατανομής, οδηγεί σε καλύτερη συνεκτικότητα και εργασιμότητα του τσιμέντου (*Αναγνωστοπούλου*, 2012).

Παρότι με την χρήση πλαστικού ενισχύθηκε το κλάσμα μεταξύ 4 και 2 mm, και διαταράχθηκε έτσι η κοκκομετρική κατάταξη των αδρανών, τα δοκίμια με 7.5 και 10% πλαστικό έδειξαν καλύτερες αντοχές από το πρότυπο. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι δημιουργήθηκε καλύτερη συνδεσιμότητα μεταξύ του μίγματος αδρανών και της τσιμεντόπαστας, καθιστώντας τα δοκίμια ιδιαίτερος ανθεκτικά σε μεγαλύτερα φορτία μετατόπισης.

Μέτρο ελαστικότητας

Μια ακόμη μηχανική ιδιότητα των κονιαμάτων που μετρήθηκε ήταν το μέτρο ελαστικότητας, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των αδρανών, καθώς η παραμόρφωση των δοκιμίων εξαρτάται άμεσα από την ελαστική παραμόρφωση των αδρανών (Saikia & de Brito, 2012). Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν αυτήν την ιδιότητα είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο, το πορώδες των αδρανών και τα χαρακτηριστικά της μεταβατικής ζώνης, ενώ στην περίπτωση μερικής χρήσης πλαστικού σημαντικό ρόλο παίζουν το είδος και το ποσοστό αντικατάστασης.

Όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 11 η ελαστικότητα των δοκιμίων παρουσιάζει μια φθίνουσα τάση, όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης. Η μείωση αυτή οφείλεται στην μείωση της πυκνότητας των κονιαμάτων, καθώς και στην χαμηλή ελαστικότητα του πλαστικού (Hannawi *et.al.*, 2010; Wang & Meyer, 2012). Να σημειωθεί πως το εύρος ελαστικότητας του ABS πλαστικού και της ασβεστολιθικής άμμου που χρησιμοποιήθηκε είναι 2.0 – 2.6 και 15 – 55 GPa, αντίστοιχα. Το γεγονός πως τα δείγματα με 7.5 και 10% παρουσίασαν υψηλή θλιπτική αντοχή και ελαστικότητα πολύ κοντινή με του προτύπου, οδηγεί στο συμπέρασμα πως τα συγκεκριμένα τσιμεντοκονιάματα δύναται να χρησιμοποιηθούν για εξωτερικές επιστρώσεις και επιχρίσματα (Λεγάκις, 1954).

Πίνακας 11: Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας των εξεταζόμενων δειγμάτων για 7 και 28 ημέρες ωρίμανσης.

Αντικατάσταση (%)	0	2.5	5	7.5	10	12.5
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	7 ημέρες					
	7.77	5.62	5.68	9.11	10.04	7.07
	28 ημέρες					
	15.36	9.57	8.07	12.58	11.70	3.01

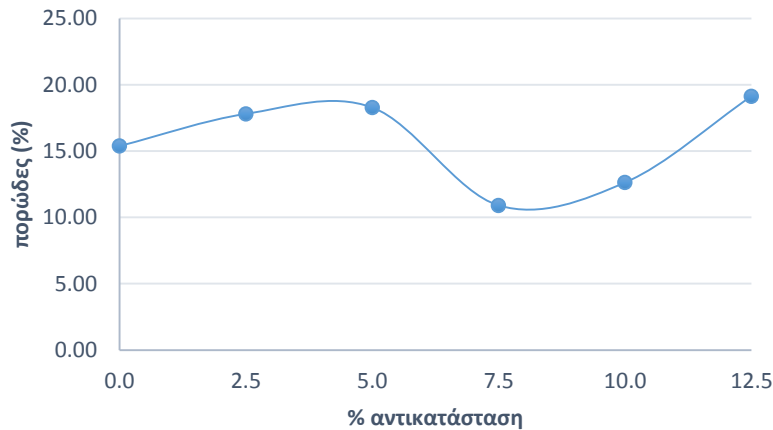
Πορώδες, πυκνότητα, υδατοαπορροφητικότητα

Η ανάλυση των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων (πορώδες, υδατοαπορροφητικότητα, πυκνότητα) πραγματοποιήθηκε στα δείγματα των 28 ημερών ωρίμανσης, για όλες τις εξεταζόμενες αναλογίες αντικατάστασης και το πρότυπο.

Το πορώδες αποτελεί μια φυσική ιδιότητα του κονιάματος, που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή και την υδατοαπορροφητικότητα του. Συνήθως, εξαρτάται από τον λόγο νερού προς τσιμέντο, την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, όπως και την ποιότητά τους, ώστε να έχουν καλύτερη ενσωμάτωση στην τσιμεντόπαστα (Γκαβέλα, 2009). Πρακτικά, μικρό πορώδες σημαίνει πως έχει γίνει σωστή κατανομή και ενσωμάτωση των αδρανών στην δομή της τσιμεντόπαστας, ενισχύοντας έτσι τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του κονιάματος.

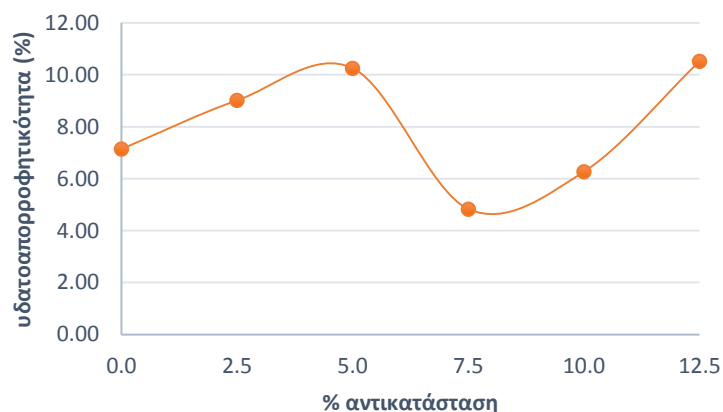
Τα αποτελέσματα του πορώδους των δοκιμίων της παρούσας εργασίας δίνονται στο Διάγραμμα 12. Όπως ήταν αναμενόμενο, λαμβάνοντας υπόψιν και τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής, το πορώδες για τα κονιάματα με 2.5, 5 και 12.5% πλαστικό αυξήθηκε, ενώ για 7.5 και 10% αντικατάσταση, όπου όπως προαναφέρθηκε βρέθηκε υψηλότερη του προτύπου θλιπτική αντοχή, παρατηρείται πως το πορώδες μειώθηκε. Αυτό δείχνει πως η διαβάθμιση των αδρανών (άμμος, πλαστικό), καθώς και η συνεκτικότητα της συνολικής μάζας των δοκιμίων βρίσκονταν σε απόλυτη αρμονία και έχει γίνει σωστή συμπίκνωση του νωπού τσιμεντοκονιάματος. Γενικά, η μερική προσθήκη πλαστικών σε τσιμεντοκονιάματα οδηγεί σε μείωση του πορώδους, καθώς δεν πραγματοποιείται συνήθως σωστή κατανομή και ο υδρόφοβος χαρακτήρας των πλαστικών εμποδίζει την σωστή ενυδάτωση του δοκιμίου (Akcaözoğlu *et.al.*, 2010).

Η υδατοαπορροφητικότητα είναι η ιδιότητα του κονιάματος που δείχνει τον όγκο και τη συνδεσιμότητα των διαπερατών πόρων του (Gu & Ozbakkaloglu, 2016). Σε μελέτες όπου μέρος της άμμου αντικαταστάθηκε με κομμάτια πλαστικού, η υδατοαπορροφητικότητα παρουσιάζει μια αυξητική τάση, καθώς το μίγμα των αδρανών (άμμος, πλαστικό) δεν κατάφερε να ενσωματωθεί επαρκώς στην δομή της τσιμεντόπαστας, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερα κενά μεταξύ των υλικών (Akcaözoğlu *et.al.*, 2010; Saikia & de Brito, 2012; Silva *et.al.*, 2013).



Διάγραμμα 12: Αποτελέσματα πορώδους για τα δείγματα των 28 ημερών ωρίμανσης.

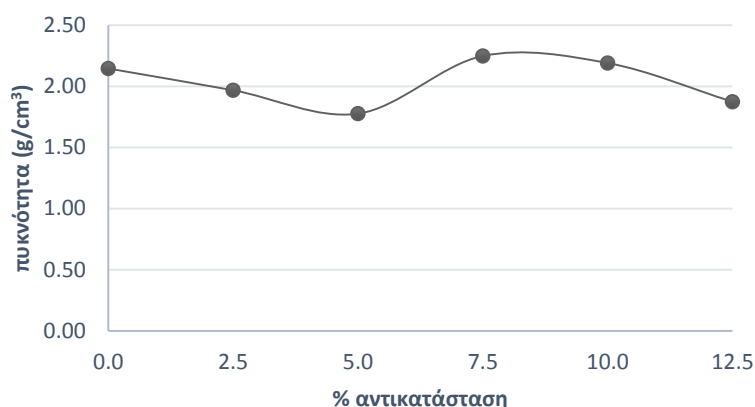
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της υδατοαπορροφητικότητας των εξεταζόμενων δοκιμίων στο Διαγραμμα 13, γίνεται φανερό πως η αντικατάσταση 2.5, 5 και 12.5% πλαστικών οδηγεί σε αύξηση των κενών μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας, ενώ η 7.5 και 10% αντικατάσταση, επιφέρει καλύτερη συνοχή και μικρότερη υδατοαπορροφητικότητα από το πρότυπο. Το μοτίβο αυτό συνάδει με το αντίστοιχο του πορώδους και της θλιπτικής αντοχής, καθώς οι τρεις αυτές ιδιότητες αλληλεξαρτώνται και έμμεσα υποδεικνύουν εάν το εξεταζόμενο κονίαμα δύναται να χρησιμοποιηθεί στον κατασκευαστικό τομέα.



Διάγραμμα 13: Αποτελέσματα υδατοαπορροφητικότητας των δειγμάτων στις 28 ημέρες ωρίμανσης.

Το πλαστικό είναι ένα σχετικά ελαφρύ υλικό, που αν προστεθεί σε κονίαμα επηρεάζει άμεσα την πυκνότητά του. Συγκεκριμένα, το ABS έχει πυκνότητα $1.0 - 1.4 \text{ g/cm}^3$. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η προσθήκη πλαστικού σε δοκίμια κονιάματος μειώνει την πυκνότητά τους, λόγω της μειωμένης συνεκτικότητας που εμφανίζεται μεταξύ των υλικών (Saikia & de Brito, 2012). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και τον άμεσο επηρεασμό των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων, οι οποίες μειώνονται αντίστοιχα.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, όπως προκύπτει και από το Διάγραμμα 14, η πυκνότητα των δοκιμίων εμφανίζει μικρές διακυμάνσεις για τις εξεταζόμενες αναλογίες αντικατάστασης με πλαστικό. Συγκεκριμένα, για τα ποσοστά αντικατάστασης 2.5, 5 και 12.5%, η πυκνότητα των κονιαμάτων παρουσιάζεται χαμηλότερη από αυτήν του προτύπου, ενώ για 7.5 και 10% αντικατάσταση είναι ελάχιστα υψηλότερη. Η διακύμανση είναι σύμφωνη και με τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής, όπου γίνεται κατανοητό πως οι δοκιμές με 7.5 και 10% χρήση του πλαστικού ABS ως αδρανή, η συνεκτικότητα των κονιαμάτων αυξάνεται.



Διάγραμμα 14: Αποτελέσματα πυκνότητας των δειγμάτων, για 28 ημέρες ωρίμανσης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν μια ασυνήθιστη συμπεριφορά των δοκιμίων, με την μερική αντικατάσταση των αδρανών με ABS πλαστικό. Παρατηρήθηκε πως η μονοαξονική θλιπτική αντοχή τους αυξήθηκε μόνο για τις αναλογίες αντικατάστασης 7.5 και 10%, παρότι ήταν σε κοντινά με του προτύπου επίπεδα και οι υπόλοιπες δοκιμές. Μια έμμεση επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων αυτών δίνεται και από τις μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων (πυκνότητα, πορώδες, υδατοαπορροφητικότητα), οι οποίες ακολουθούσαν τις αυξομειώσεις της αντοχής.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κοκκομετρία θεωρείται πως έπαιξε τον σημαντικότερο ρόλο στην θλιπτική συμπεριφορά των δοκιμίων, καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι διεξαγωγής των πειραμάτων διατηρήθηκαν σταθερές. Καθότι δεν ελέγχθηκε επακριβώς ποιο κλάσμα της άμμου αντικαταστάθηκε από το πλαστικό, και λαμβάνοντας υπόψιν ότι η βαθμονόμηση των κόκκων του πλαστικού περιορίστηκε σε $4 < \text{ABS} < 2 \text{ mm}$, είναι πιθανόν κατά την παρασκευή των μιγμάτων, με 7.5 και 10% αντικατάσταση, να μην διαταράχθηκε η συνολική διαβάθμιση των αδρανών. Έτσι, τα δοκίμια απέκτησαν καλύτερη συνεκτικότητα και παρουσίασαν μεγαλύτερες αντοχές από το πρότυπο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα των τελευταίων ετών αφορά τη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων, καθώς ο ρυθμός παραγωγής τους αυξάνεται ραγδαία και οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που αναδύονται χρήζουν προσοχής. Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αποτελεί η χρήση αυτού του ρεύματος αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα, με στόχο την παραγωγή προϊόντων με ιδιότητες όμοιες με υπάρχοντα εμπορικά προϊόντα. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινήθηκε και η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία είχε ως στόχο την διερεύνηση της συμπεριφοράς τσιμεντοκονιαμάτων με μερική αντικατάσταση των αδρανών με πλαστικό. Παλαιότερες μελέτες που έχουν ασχοληθεί με αυτό το αντικείμενο, επιδεικνύοντας αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Για την αξιολόγηση της επίδρασης μιας τέτοιας προσθήκης, εξετάζονται συνήθως οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες τόσο των πλαστικών όσο και των κονιαμάτων.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων του πλαστικού ABS έδειξαν πως αφορά ένα υλικό με υψηλή θερμιδική αξία, που σίγουρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς, με την κατάλληλη προ-επεξεργασία. Επίσης, διαπιστώθηκε πως τα περιεχόμενα τοξικά μέταλλα κυμαίνονται εντός των νομοθετικών ορίων της Οδηγίας RoHS, ενώ αυτά που διαπιστώθηκαν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, όπως το πυρίτιο (Si), το μαγνήσιο (Mg) και το αργίλιο (Al), υποδηλώνουν την ύπαρξη αντίστοιχων επιβραδυντών φλόγας. Σημαντική ήταν και η ποσότητα ασβεστίου (Ca) που ανιχνεύθηκε, η οποία συνδέεται άμεσα με την χρήση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) ως πληρωτικό υλικό στην κατασκευή των πλαστικών. Επιπρόσθετα, με την εφαρμογή της υπέρυθρης φασματοσκοπίας έγινε εφικτός ο καθορισμός της χημικής δομής των δειγμάτων, ο οποίος επιβεβαίωσε την ύπαρξη των εξεταζόμενων ειδών πλαστικού, καθώς και των μεταλλικών οξειδίων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Στην συνέχεια, με την μερική αντικατάσταση της άμμου από πλαστικό ABS, για διαφορετικές αναλογίες, παρατηρήθηκε μια ανομοιόμορφη διακύμανση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση που σημειώθηκε με την προσθήκη 2.5, 5 και 12.5% πλαστικό, αντίστοιχα, ήταν σύμφωνη με την βιβλιογραφία και βασίστηκε στην δημιουργία μη επαρκούς συνεκτικότητας μεταξύ των τεμαχίων του πολυμερούς με την τσιμεντόπαστα. Αντίθετα, για τις αναλογίες 7.5 και 10%, η θλιπτική αντοχή εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένη συγκριτικά με αυτή του προτύπου, κάτι που

πιθανότατα οφείλεται στον σωστό κοκκομετρικό διαμερισμό του πλαστικού στην δομή του τσιμεντοπολτού και την ενίσχυση της συνεκτικότητας των κονιαμάτων.

Αντίθετα, το μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων, έπειτα από 28 ημέρες ωρίμανσης, διαπιστώθηκε να διατηρεί μια πτωτική τάση, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως, τα δοκίμια που εμφάνισαν υψηλή θλιπτική αντοχή έγιναν πιο ανθεκτικά αλλά λιγότερο όλκιμα.

Τα παραπάνω αποτελέσματα της αντοχής επιβεβαιώνονται και από τις μετρήσεις των φυσικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων, δηλαδή του πορώδους, της υδατοαπορροφητικότητας και της πυκνότητας. Η διακύμανση των τιμών τους ήταν σύμφωνη με την αντοχή που παρουσίασαν τα εξεταζόμενα κονιάματα.

Οι βασικές παράμετροι που δύναται να επηρεάσουν την αντοχή των κονιαμάτων είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c ratio) και η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Στην παρούσα μελέτη ο λόγος w/c διατηρήθηκε σταθερός σε όλες τις δοκιμές, ενώ η κοκκομετρία των δοκιμίων διέφερε. Η διακύμανση των αποτελεσμάτων που παρατηρήθηκε οφείλεται στην παράμετρο αυτή, καθώς η σωστή συνεκτικότητα μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού επηρεάζεται άμεσα από την κοκκομετρική διαβάθμιση. Έτσι, η αντικατάσταση των αδρανών με 7.5 και 10% πλαστικό έφερε μεγαλύτερη του προτύπου αντοχή, υποδεικνύοντας πως το πλαστικό ABS μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί ως αντικαταστάτης λεπτόκοκκων αδρανών στην κατασκευή τσιμεντοκονιαμάτων.

Συμπερασματικά, τα πλαστικά απόβλητα ABS μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρές ποσότητες για την κατασκευή κονιαμάτων για χρήση ως εξωτερικά και στεγανά επιχρίσματα ή στεγανές επιστρώσεις, επιλύοντας πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα. Αντίστοιχες εφαρμογές πραγματοποιούνται σε βιομηχανικό επίπεδο και για το πλαστικό PET, το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς και χρησιμοποιείται για την παρασκευή σκυροδέματος και ασφάλτου.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Το αντικείμενο που εξετάστηκε στην προκείμενη εργασία, αναφορικά με την χρήση πλαστικών αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα, αποτελεί ένα πεδίο που χρήζει μεγαλύτερης έρευνας, κυρίως στην μελέτη περισσότερων κατηγοριών πολυμερών. Η βιβλιογραφία έχει επικεντρωθεί κυρίως στην έρευνα των PET αλλά και των πλαστικών ΑΗΗΕ ως συνολικό μίγμα. Το κενό αυτό προσπάθησε να καλύψει η παρούσα μελέτη χρησιμοποιώντας το πλαστικό ABS ως μερικώς αντικαταστάτη των αδρανών στην παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων.

Παρότι τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο κομμάτι απαιτείται, ώστε να δοθεί μια πληρέστερη εικόνα της αλληλεπίδρασης των προκείμενων πλαστικών αποβλήτων στην δομή του κονιάματος. Πιο συγκεκριμένα, η μικροσκοπική εξέταση των δοκιμίων, καθώς και η μελέτη της συμπεριφοράς τους υπό ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως UV ακτινοβολία, κύκλους ψύξης και ενανθράκωση, θα συμβάλλουν στον σκοπό αυτό. Ακόμη, η μελέτη περισσότερων αναλογιών αντικατάστασης μεταξύ του 5 και 10%, θα προσδώσουν μια καλύτερη εξήγηση της αυξημένης αντοχής των δοκιμίων.

Τέλος, είναι σημαντικό να μελετηθεί και η χημική προ – επεξεργασία των πλαστικών αποβλήτων πριν την ενσωμάτωσή τους στην τσιμεντόπαστα, με στόχο την αντιμετώπιση του υδρόφοβου χαρακτήρα τους, ο οποίος αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα στην καλή συμπεριφορά των κονιαμάτων. Έτσι, δύναται να δημιουργηθεί καλύτερη συνοχή μεταξύ του μίγματος των υλικών, προσφέροντας ενισχυμένες ιδιότητες στο τελικό προϊόν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Abnisa, F., & Daud, W. M. A. W. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: an optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87, 71-85.
- Acomb, J. C., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2013). Thermal processing of plastics from waste electrical and electronic equipment for hydrogen production. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 103, 320-327.
- Akçaözoğlu, S., Atiş, C. D., & Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste management*, 30(2), 285-290.
- Amato, A., Rocchetti, L., & Beolchini, F. (2017). Environmental impact assessment of different end-of-life LCD management strategies. *Waste management*, 59, 432-441.
- Ardente, F., & Mathieux, F. (2014). Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an Energy using Product. *Journal of cleaner production*, 83, 126-141.
- Arroyo, M., & Olabisi, O. (1997). Handbook of thermoplastics. Olabisi, O., Ed, 599.
- Cafiero, L., Castoldi, E., Tuffi, R., & Ciprioti, S. V. (2014). Identification and characterization of plastics from small appliances and kinetic analysis of their thermally activated pyrolysis. *Polymer degradation and stability*, 109, 307-318.
- Damal, V. S., & Londhe, S. S. (2015). Utilization of Electronic Waste Plastic in Concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(4), 35-38.
- Delgado, C., Barruetabeña, L., & Salas, O. (2007). Assessment of the environmental advantages and drawbacks of existing and emerging polymers recovery processes. *JRC Institute for Prospective Technological Studies*.
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., & Gidarakos, E. (2009)b. Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of hazardous materials*, 161(2-3), 913-919.
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., & Gidarakos, E. (2009)a. Determination of heavy metals and halogens in plastics from electric and electronic waste. *Waste Management*, 29(10), 2700-2706.
- Directive, E. C. (2011). Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011, on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast). *Official Journal of the European Communities*.

- Endres, H. J., & Siebert-Raths, A. (2011). Engineering biopolymers. *Eng. Biopolym*, 71148.
- Ge, Z., Sun, R., Zhang, K., Gao, Z., & Li, P. (2013). Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 44, 81-86.
- Ghernouti, Y., & Rabehi, B. (2012). Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 145-153.
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste management*, 30(11), 2312-2320.
- Hlaing, Z. Z., Wajima, T., Uchiyama, S., & Nakagome, H. (2014). Reduction of Bromine Compounds in the Pyrolysis Oil of Computer Casing Plastics Using Shell, Ca (OH) 2 and NaOH. *APCBEE procedia*, 10, 193-197.
- Islam, M. J., Meherier, M. S., & Islam, A. R. (2016). Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 946-951.
- Kousaiti, A., Pivnenko, K., Savvilotidou, V., Astrup, T. F., & Gidarakos, E. (2018). Hexabromocyclododecane, tetrabromobisphenol-a and inorganic additives in polymers from electric and electronic waste. In 6th International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management, Chania, Crete
- Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: an overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32-42.
- Kutz, M. (Ed.). (2015). *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Li, J., Chen, F., Yang, L., Jiang, L., & Dan, Y. (2017). FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 184, 361-367.
- Ma, C., Yu, J., Wang, B., Song, Z., Xiang, J., Hu, S., ... & Sun, L. (2016). Chemical recycling of brominated flame retarded plastics from e-waste for clean fuels production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 433-450.
- Manjunath, B. A. (2016). Partial replacement of e-plastic waste as coarse-aggregate in concrete. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 731-739.
- Maris, E., Botane, P., Wavrer, P., & Froelich, D. (2015). Characterizing plastics originating from WEEE: A case study in France. *Minerals Engineering*, 76, 28-37.

- Marzouk, O. Y., Dheilily, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste management*, 27(2), 310-318.
- Muhammad, C., Onwudili, J. A., & Williams, P. T. (2015). Catalytic pyrolysis of waste plastic from electrical and electronic equipment. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 332-339.
- Onwudili, J. A., & Williams, P. T. (2009). Degradation of brominated flame-retarded plastics (Br-ABS and Br-HIPS) in supercritical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, 49(3), 356-368.
- Palos, A., D'Souza, N. A., Snively, C. T., & Reidy III, R. F. (2001). Modification of cement mortar with recycled ABS. *Cement and Concrete research*, 31(7), 1003-1007.
- Parajuly, K., Habib, K., & Liu, G. (2017). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Denmark: Flows, quantities and management. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 85-92.
- Patel, M. K., Crank, M., Dornburg, V., Hermann, B. G., Roes, A. L., Huesing, B., ... & Recchia, E. (2006). Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources.
- Plastics Europe, *Plastics – the facts 2017*
- Prasanna, P. K., & Rao, M. K. (2014). Strength variations in concrete by using E-waste as coarse aggregate. *International Journal of Education and applied research*, 4(2), 82-84.
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*.
- Rahman, M. M., Islam, M. A., Ahmed, M., & Salam, M. A. (2013). Recycled polymer materials as aggregates for concrete and blocks. *Journal of Chemical Engineering*, 27(1), 53-57.
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.
- Ruiz-Herrero, J. L., Nieto, D. V., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., ... & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2016). Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 104, 298-310.
- Ryan, A., O'Donoghue, L., & Lewis, H. (2011). Characterising components of liquid crystal displays to facilitate disassembly. *Journal of cleaner production*, 19(9-10), 1066-1071.

- Saikia, N., & de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401.
- Savvilotidou, V., & Gidakos, E. (2018) Potentials and challenges of recycled materials from photovoltaic panels in cement mortars. In 6th International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management, Chania, Crete
- Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482.
- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy conversion and management*, 115, 308-326.
- Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422.
- Stenvall, E., Tostar, S., Boldizar, A., Foreman, M. R. S., & Möller, K. (2013). An analysis of the composition and metal contamination of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Waste management*, 33(4), 915-922.
- Subramani, T., & Pugal, V. K. (2015). Experimental Study On Plastic Waste As A Coarse Aggregate For Structural Concrete. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IIAIEM)*, 4(5), 144-152.
- Tansel, B. (2017). From electronic consumer products to e-wastes: global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environment international*, 98, 35-45.
- Taurino, R., Pozzi, P., & Zanasi, T. (2010). Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. *Waste Management*, 30(12), 2601-2607.
- Tostar, S., Stenvall, E., Boldizar, A., & Foreman, M. R. S. J. (2013). Antimony leaching in plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) with various acids and gamma irradiation. *Waste management*, 33(6), 1478-1482.
- Truc, N. T. T., & Lee, B. K. (2017). Combining ZnO/microwave treatment for changing wettability of WEEE styrene plastics (ABS and HIPS) and their selective separation by froth flotation. *Applied Surface Science*, 420, 746-752.
- Vanegas, P., Peeters, J. R., Cattrysse, D., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2017). Improvement potential of today's WEEE recycling performance: The case of LCD TVs in Belgium. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(5), 13.
- Wang, B., Zhang, Y., Tao, Y., Zhou, X., Song, L., Jie, G., & Hu, Y. (2018). Monitoring the degradation of physical properties and fire hazards of high-impact polystyrene

- composite with different ageing time in natural environments. *Journal of hazardous materials*, 352, 92-100.
- Wang, R., & Meyer, C. (2012). Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 975-981.
- Wasilewski, R., & Siudyga, T. (2013). Energy recovery from waste plastics. *Chemik*, 67(5), 435.
- Yang, X., Sun, L., Xiang, J., Hu, S., & Su, S. (2013). Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. *Waste management*, 33(2), 462-473.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αναγνωστοπούλου, Σ., 2012, Διδακτορική Διατριβή, «Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης», Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Βαλαβανίδης, Α., 2006, «Φασματοσκοπία Οργανικών Ενώσεων». Τμήμα Χημείας, Ε.Κ.Π.Α., Αθήνα.
- Γιδαράκος Ε., Καστανάκη Ε. (2014). Ακαδημαϊκές σημειώσεις του Μαθήματος «Επεξεργασία και Διαχείριση Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Γκαβέλα, Σ., 2009, Διδακτορική Διατριβή, «Μελέτη της ενσωμάτωσης θερμοπλαστικών απορριμμάτων στην σύνθεση διαφόρων τύπων σκυροδέματος», Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουή, Μ., Αβδελίδης, Ν., Θεοδωρακάς, Π., Χειλάκου, Ε., 2015, «Μη καταστρεπτικές και φασματοσκοπικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών», Εκδόσεις Κάλλιπος.
- Λεγάκις Α. Αντωνίου, (1954) «Δομικά Υλικά». Αθήνα.
- Νικολαΐδης, Α., 2016, Διδακτορική Διατριβή, «Φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό fourier χρονικής ανάλυσης της οξειδοαναγωγικής βαζ από το βακτήριο *Thermus thermophilus*», Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- Οδηγία 2002/96/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003 σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) (13.02.2003), Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης,
- Τάσος, Χ., Σιδέρης, Κ., Χατζόπουλος, Α., Πιστοφίδης, Ν., Χανιωτάκης, Ε., 2018, «Επίδραση του τύπου του τσιμέντου στην ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων έναντι ενανθράκωσης», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αθήνα.

Διαδικτυακές πηγές

omnexus.specialchem.com

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/weee>

http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselee&lang=en

<http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=63>

<https://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-concrete-is-made>