



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

**Πτυχιακή Εργασία**

# **ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ**



Σπουδάστρια

**Αφροδίτη Κοντομηνά**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Νικόλας Νικολουτσόπουλος**

Πειραιάς, Σεπτέμβριος 2017

## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν θα μπορούσε να έχει ολοκληρωθεί, χωρίς την συμπαράσταση και την βοήθεια πολλών ατόμων. Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Νικολουτσόπουλο Νίκο, MSc Εκπαιδευτικό Τεχνολόγο Πολιτικό Μηχανικό Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ – Συνεργάτη του ΤΕΙ Πειραιά, που με στήριξε και με βοήθησε στη σύλληψη και εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Αφροδίτη,  
Πειραιάς 2017

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/η... ΚΡΙΣΤΟΜΑΝΑ ΑΦΡΟΔΙΤΗ....., του  
ΧΑΡΑΜΑΝΙΩΤΗ φοιτητής του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Ε.Ε.

του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονεμίσει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλών



Ημερομηνία

23/11/17

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστίασε στην έρευνα σχετικά με το ζήτημα της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας τόσο στην Ελλάδα όσο και στον υπόλοιπο κόσμο.

Ο ρυθμός έρευνας της ιπτάμενης τέφρας ακολουθεί διεθνώς μία εκθετική ανάπτυξη που γίνεται εκρηκτική στο τέλος της δεκαετίας του 1970 και την αρχή της δεκαετίας του 1980. Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατόν να ερμηνευθεί από τις δύο πετρελαϊκές κρίσεις (Οκτώβριος 1973 και Ιούνιος 1979), που είχαν διπλά ευεργετικό αποτέλεσμα για την ανάπτυξη της έρευνας της. Ιδιαίτερα έντονο εκδηλώνεται το ενδιαφέρον για την Ι.Τ.

Στόχος της εργασίας είναι η σύνταξη μιας μελέτης στην οποία να αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας (ιδιαιτερότητες, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα), να δίνονται παραδείγματα της χρήσεις της, αλλά και προτάσεις (διεθνώς και ελληνικά), και να αναφέρονται σχετικές νομοθεσίες (διεθνής κανονισμοί, ελληνική εθνική τεχνική προδιαγραφή).

***ABSTRACT***

The subject of this thesis was the research on the issue of the use of fly ash both in Greece and in the rest of the world.

The rate of fly ash research follows an exponential growth explosive at the end of the 1970s and early 1980s. This phenomenon can be interpreted by the two oil crises (October 1973 and June 1979), which had double A beneficial effect on the development of its research. Particularly strong interest is shown in fly ash.

The aim of the work is to compile a study which analyzes the technical characteristics of fly ash. (Peculiarities, advantages, disadvantages), give examples of its uses, as well as proposals (internationally and greek), and refer to relevant legislation (international regulations, Greek national technical specification).

## **Περιεχόμενα**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>1. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</b> .....                            | <b>3</b>  |
| 1.1. Εναλλακτικές Πρώτες Ύλες .....                                     | 3         |
| 1.2. Ποζολάνες .....  | 4         |
| 1.2.1. Φυσικές Ποζολάνες .....  | 5         |
| 1.2.2. Τεχνητές Ποζολάνες .....   | 8         |
| 1.2.2.1. Σκωρίες Υψικαμίνων .....                                       | 8         |
| 1.2.2.2. Ιπτάμενη Τέφρα .....   | 10        |
| <b>2. ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ</b> .....                   | <b>12</b> |
| 2.1. Χημική Σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας .....                              | 12        |
| 2.2. Φυσική Σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας .....                              | 13        |
| 2.3. Παραγωγή Τέφρας .....  | 14        |
| 2.4. Κατάταξη Ιπτάμενης Τέφρας .....                                    | 16        |
| 2.4.1. Κατεργασμένη Ιπτάμενη Τέφρα .....                                | 18        |
| 2.4.2. Ακατέργαστη Ιπτάμενη Τέφρα .....                                 | 19        |
| 2.5. Ευρωπαϊκά & Ελληνικά Πρότυπα Καταλληλότητας Ιπτάμενης Τέφρας ..... | 19        |
| <b>3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ</b> .....               | <b>21</b> |
| 3.1. Χημική Σύσταση Ελληνικών Ιπτάμενων Τεφρών .....                    | 21        |
| 3.2. Φυσική Σύσταση Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας .....                    | 21        |
| 3.3. Ανάλυση της Δομής της Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας .....             | 22        |
| 3.4. Ποιότητα Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας .....                          | 22        |
| 3.5. Μειονεκτήματα Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας .....                     | 24        |
| 3.6. Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή .....                                   | 25        |
| 3.7. Χρήση Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας στην Παραγωγή Σκυροδέματος .....  | 27        |
| 3.8. Χρήση Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας στην Οδοποιία .....               | 28        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.9. Παραγωγή και Κατανάλωση Ιπτάμενων Τεφρών στην Ελλάδα.....         | 30        |
| <b>4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....</b>         | <b>33</b> |
| 4.1. Παραγωγή και Κατανάλωση Ιπτάμενων Τεφρών στην Ευρώπη.....         | 33        |
| 4.2. 4.2 Οικονομικά Οφέλη από την Χρήση Ιπτάμενης Τέφρας.....          | 35        |
| 4.3. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από την Απουσία Μέτρων.....            | 38        |
| <b>5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ.....</b>           | <b>39</b> |
| 5.1. Το φράγμα της Πλατανόβρυσης, Ελλάδα.....                          | 39        |
| 5.2. Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία.....                                  | 40        |
| 5.3. Αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, Australia.....                 | 41        |
| 5.4. Φράγμα Νέας Βικτωρίας, Αυστραλία.....                             | 41        |
| 5.5. Φράγμα Salto Caxias, Βραζιλία.....                                | 42        |
| 5.6. Σιλό, Βέλγιο.....   | 43        |
| 5.7. Φράγμα Puylaurent στη Lozère, Γαλλία.....                         | 44        |
| 5.8. Ανατολική Γέφυρα, Δανία.....                                      | 44        |
| 5.9. Πύργος Ψύξης Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας, Γερμανία.....           | 45        |
| 5.10. Οι πύργοι «Κάστωρ και Πολυδεύκης», Γερμανία.....                 | 46        |
| 5.11. Ο πύργος Πικάσο, Ισπανία.....                                    | 47        |
| 5.12. Φράγμα Klong Tha Dan, Ταϊλάνδη.....                              | 47        |
| 5.13. Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, ΗΠΑ..... | 48        |
| <b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>  | <b>50</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>   | <b>53</b> |

## Ευρετήριο Εικόνων

|  |    |
|--|----|
| <i>Εικόνα 1:</i> Φυσικές ποζολάνες .....   | 4  |
| <i>Εικόνα 2:</i> Ορυχείο θηραϊκής γης στη νήσο Γυαλί .....   | 5  |
| <i>Εικόνα 3:</i> Τεχνητή ποζολάνη, τέφρα.....  | 8  |
| <i>Εικόνα 4:</i> Κατασκευή οδοστρώματος με σκωρία στο αεροδρόμιο Θεσσαλονίκης (2004) και στην Εθνική οδό Αθηνών Θεσσαλονίκης (2005) .....  | 10 |
| <i>Εικόνα 5:</i> Η ποζολανική αντίδραση.....   | 13 |
| <i>Εικόνα 6:</i> Χαρακτηριστικές περιοχές υδραυλικών κονιών και ποζολανών .....  | 17 |
| <i>Εικόνα 7:</i> Γρεβενά, θέση γεφύρι του Πασά, κατασκευή πιλοτικού οδοστρώματος με τέφρα. Διάστρωση του τεφροσκυροδέματος με finisher σε 2 στρώσεις σε θερμοκρασίας περιβάλλοντος υψηλή κατά την ώρα της διάστρωσης ..... | 18 |
| <i>Εικόνα 8:</i> Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για σταθεροποίηση πρανών ώρα της διάστρωσης .....  | 18 |
| <i>Εικόνα 9:</i> Χρήση ακατέργαστης τέφρας για την σταθεροποίηση πρανών .....  | 19 |
| <i>Εικόνα 10:</i> Το φράγμα της Πλατανόβρυσης στον δήμο Δράμας.....  | 39 |
| <i>Εικόνα 11:</i> Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία .....  | 40 |
| <i>Εικόνα 12:</i> Αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, Αυστραλία.....  | 41 |
| <i>Εικόνα 13:</i> Φράγμα Νέας Βικτωρίας, Αυστραλία .....   | 42 |
| <i>Εικόνα 14:</i> Φράγμα Salto Caxias, Βραζιλία.....   | 43 |
| <i>Εικόνα 15:</i> Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία .....  | 43 |
| <i>Εικόνα 16:</i> Φράγμα Ruylaurent στη Lozère, Γαλλία .....   | 44 |
| <i>Εικόνα 17:</i> Ανατολική Γέφυρα, Δανία .....  | 45 |
| <i>Εικόνα 18:</i> Πύργος ψύξης σταθμού παραγωγής ενέργειας, Γερμανία .....   | 45 |
| <i>Εικόνα 19:</i> Οι πύργοι «Κάστωρ αι Πολυδεύκης», Γερμανία.....  | 46 |
| <i>Εικόνα 20:</i> Ο πύργος Πικάσο, Ισπανία.....  | 47 |
| <i>Εικόνα 21:</i> Φράγμα Klong Tha Dan, Ταϊλάνδη.....  | 48 |
| <i>Εικόνα 22:</i> Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, ΗΠΑ.....   | 48 |

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

|  |    |
|--|----|
| <i>Διάγραμμα 1:</i> Παραγωγή και αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας ανά χώρα..... | 35 |
|--|----|



**Ευρετήριο Πινάκων**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά είδη εναλλακτικών πρώτων υλών και καυσίμων.....</i>                                     | <i>4</i>  |
| <i>Πίνακας 2: Χημική σύσταση φυσικών ποζολανών σε ποσοστά %.....</i>   | <i>6</i>  |
| <i>Πίνακας 3: Χημική σύσταση και ειδικό βάρος ποζολανών διαφορετικής προέλευσης .....</i>                            | <i>6</i>  |
| <i>Πίνακας 4: Τυπική χημική σύσταση (XRF).....</i>   | <i>9</i>  |
| <i>Πίνακας 5: Χημική σύσταση Ελληνικών Ιπτάμενων Τεφρών.....</i>   | <i>21</i> |
| <i>Πίνακας 6: Μειονεκτήματα ελληνικής ιπτάμενης τέφρας.....</i>  | <i>24</i> |
| <i>Πίνακας 7: Ιστορική εξέλιξη αξιοποίησης ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα.....</i>                                     | <i>31</i> |
| <i>Πίνακας 8: Χρονολόγιο: Αξιοποίηση Ιπταμένων Τεφρών στο Διεθνή χώρο .....</i>                                      | <i>33</i> |
| <i>Πίνακας 9: Ποσά παραγόμενης τέφρας και περιοχές αξιοποίησής της σε διάφορες χώρες (σε 10<sup>6</sup> t) .....</i> | <i>35</i> |

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η έρευνα σχετικά με το ζήτημα της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας τόσο στην Ελλάδα όσο και στον υπόλοιπο κόσμο.

Η αξιοποίηση των παραπροϊόντων καύσης από κάρβουνο (CCBs - Coal Combustion Byproducts) ξεκίνησε από την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας, εξ' αιτίας των περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργούνται από την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων που παράγονται ετησίως κατά την καύση των στερεών καυσίμων, αλλά και των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν που τις καθιστούν ένα υλικό κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές. Έτσι, η επιστημονική κοινότητα σε παγκόσμιο επίπεδο προέβη στην αναζήτηση διαφόρων χρήσεων, έτσι ώστε να αξιοποιείται η μεγαλύτερη δυνατόν παραγόμενη ποσότητα.

Από την δεκαετία του 1930 η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιήθηκε στην Αμερική ως ορυκτό στα ασφαλτικά μίγματα. Από τότε έως σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως σε διάφορες εφαρμογές, ενώ έχουν θεσπιστεί κανονισμοί σε πολλές χώρες για την χρήση της.

Στόχος της εργασίας είναι η σύνταξη μιας μελέτης στην οποία να αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας. (Ιδιαιτερότητες, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα), να δίνονται παραδείγματα της χρήσεις της, αλλά και προτάσεις (διεθνώς και ελληνικά), και να αναφέρονται σχετικές νομοθεσίες (διεθνής κανονισμοί, ελληνική εθνική τεχνική προδιαγραφή).

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των εναλλακτικών ποζολανικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον κατασκευαστικό τομέα, (κτίρια, οδοποιία κλπ.) μέσα στα οποία περιλαμβάνεται και η ιπταμένη τέφρα, ως παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο η εργασία εστιάζει στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών της ιπτάμενης τέφρας. Συγκεκριμένα καταγράφονται πληροφορίες σχετικά με τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της, τις προδιαγραφές που διέπουν την χρήσης της και τις κατηγορίες που διακρίνεται βάσει της σύστασης της.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση που κυριαρχεί στον Ελληνικό χώρο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην παραγωγή και την κατανάλωση των ιπτάμενων τεφρών, σε ελληνικό και γενικότερα ευρωπαϊκό επίπεδο.

## **1. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των εναλλακτικών ποζολανικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον κατασκευαστικό τομέα, (κτίρια, οδοποιία κλπ.) μέσα στα οποία περιλαμβάνεται και η ιπταμένη τέφρα, ως παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη.

Σαν ποζολανικά υλικά χαρακτηρίζονται τα αργιλοπυριτικά υλικά που, από μόνα τους ή δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες ή έχουν ασθενείς υδραυλικές ιδιότητες αλλά, σε λεπτό διαμερισμό παρουσία νερού αντιδρούν με την υδράσβεστο σε συνήθη θερμοκρασία και σχηματίζουν ενώσεις με υδραυλικές ιδιότητες.

### **1.1. Εναλλακτικές Πρώτες Ύλες**

Με τον όρο Εναλλακτικές Πρώτες Ύλες, ονομάζονται τα υλικά που προέρχονται από διάφορες οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες, περιέχουν χημικά συστατικά κατάλληλα για την παραγωγή κλίνκερ ή τσιμέντου και μπορούν να υποκαταστήσουν πρώτες ύλες. Εναλλακτικά Καύσιμα, ονομάζονται τα υλικά που προέρχονται από διάφορες δραστηριότητες, έχουν υποστεί κάποια προεπιλογή ή προεπεξεργασία, περιέχουν σημαντικό ενεργειακό φορτίο και μπορούν να υποκαταστήσουν παραδοσιακά καύσιμα. Πολύ προηγμένες χώρες οι οποίες εμφανίζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία σε θέματα περιβάλλοντος, όπως είναι η Σουηδία, η Φιλανδία και η Ελβετία έχουν κινηθεί προς αυτή την κατεύθυνση .

Από τη φύση της η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου προσφέρει τεράστιες δυνατότητες προς αυτή την κατεύθυνση. Η βέλτιστη αξιοποίηση της υφιστάμενης τεχνολογίας για αξιοποίηση άχρηστων υλικών στην παραγωγική διαδικασία εφαρμόζεται στα εργοστάσιά μας σε όλο τον κόσμο με πολύ μεγάλα οφέλη για το περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία:

- Περιορίζει τη χρήση μη ανανεώσιμων ορυκτών πόρων, όπως άργιλος, γύψος, ασβεστόλιθος, σχιστόλιθος
- Μειώνει τη χρήση μη ανανεώσιμων φυσικών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το κάρβουνο.
- Παρέχει ουσιαστικές υπηρεσίες στην τοπική κοινωνία προσφέροντας μια ασφαλή λύση στο πρόβλημα της διάθεσης αποβλήτων.

- Συνεισφέρει στην προσπάθεια για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.
- Και επιπλέον μειώνει το κόστος παραγωγής και βελτιώνει την ανταγωνιστικότητά μας.

*Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά είδη εναλλακτικών πρώτων υλών και καυσίμων*

| <b>ΚΑΥΣΙΜΑ</b>                                   | <b>ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ</b>                        |
|--|---|
| Ξύλο, Χαρτί, Χαρτόνια                            | Τέφρες από σταθμούς Η/Π                   |
| Υφάσματα   | Σκωρίες παραγωγής χάλυβα                  |
| Πλαστικά   | Κατάλοιπα παραγωγής αλουμινίου            |
| RDF  | Χημική γύψος                              |
| Ελαστικά   | Χρησιμοποιημένα πυρότουβλα                |
| Βιομηχανικές ιλύες                               | Υπολείμματα μεταλλουργικών δραστηριοτήτων |
| Ιλύες βιολογικών καθαρισμών                      |   |
| Ζωικά κατάλοιπα, λίπη                            |   |
| Κατάλοιπα εξόρυξης άνθρακα<br>Γεωργικά κατάλοιπα |   |
| Πριονίδι και μίγματα αυτού                       |   |
| Διαλύτες και χημικά κατάλοιπα                    |   |
| Κατάλοιπα μη ανακυκλώσιμων λαδιών                |   |

## 1.2. Ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι κονίες, οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των υδραυλικών κονιών. Κατά το ASTM - C219/07a είναι υλικά πυριτικής ή αργιλοπυριτικής σύστασης, τα οποία, ενώ έχουν μικρή υδραυλική ικανότητα, όταν κονιοποιηθούν και παρουσία υγρασίας, αντιδρούν με το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε συνήθεις θερμοκρασίες και δίνουν ενώσεις με αυξημένες υδραυλικές ιδιότητες. Οι ποζολάνες διακρίνονται σε φυσικές και σε τεχνητές ανάλογα με την προέλευσή τους.



*Εικόνα 1: Φυσικές ποζολάνες*

Τα ποζολανικά υλικά ανάλογα την προέλευση τους μπορούν να διακριθούν σε:

- Φυσικές Ποζολάνες, που είναι φυσικά αποθέματα ηφαιστιογενών πηγών (πυροκλαστικά υλικά) και έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε πυριτικά πετρώματα π.χ. θηραϊκή γη.
- Τεχνητές Ποζολάνες, δηλαδή διάφορα αργιλοπυριτικά υλικά που λαμβάνονται μετά από κάποια θερμική κατεργασία σαν απόβλητα. Τέτοια υλικά είναι οι τέφρες των ατμοηλεκτρικών σταθμών είτε είναι ιπτάμενες (fly ashes) είτε είναι βάσης (bottom ashes) και οι διάφορες σκωρίες υψικαμίνων (blast furnaces slags).

### 1.2.1. Φυσικές Ποζολάνες

Οι φυσικές ποζολάνες βρίσκονται αυτούσιες στο περιβάλλον και είναι κυρίως ηφαιστιογενείς, όπως η ιταλική Pozzolana, η οποία έδωσε το όνομα της σ' αυτή την κατηγορία των κονιών, η γερμανική trass κ.ά. Η δραστική ύαλος που περιέχουν δημιουργήθηκε από ηφαιστειογενή έκρηξη. Τα αέρια που ελευθερώθηκαν κατά την έκρηξη στο υπό μορφή τήγματος μίγμα και η απότομη ψύξη, που ακολούθησε, προκάλεσε την κρυστάλλωση με μεγάλη εσωτερική επιφάνεια λόγω ακριβώς της απελευθέρωσης και διαφυγής των αερίων. Αυτές οι φυσικές ποζολάνες είναι ενεργειακά αναβαθμισμένα υλικά. (ΕΛΟΤ 408)



Εικόνα 2: Ορυχείο θηραϊκής γης στη νήσο Γυαλί

Στην Ελλάδα υπάρχει φυσική ποζολάνη που έχει πάρει το όνομα της από την νήσο Σαντορίνη (στο εξωτερικό γνωστή σαν Santorin Earth) και είναι γνωστή με το όνομα Θηραϊκή Γη. Σε σύγκριση με τις άλλες φυσικές ποζολάνες έχει υψηλότερο ποσοστό SiO<sub>2</sub>.

Είναι υλικό ηφαιστειογενούς προέλευσης και αποτελείται από:

- Ηφαιστειακή στάχτη
- Κίσηρης
- Οψιδιανό

Είναι πλούσια σε οξείδια του πυριτίου και του αργιλίου και έχει την εξής σύσταση.

*Πίνακας 2: Χημική σύσταση φυσικών ποζολανών σε ποσοστά %.*

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO | Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|---------------------------------|-----------------|------------------|
| 66.0             | 14.5                           | 5.5                            | 3.0 | 0.8 | 3.5                             | 0.7             | 2.0              |

Η απώλεια πύρωσης της θηραϊκής γης στους 1000°C είναι 3,5%.

*Πίνακας 3: Χημική σύσταση και ειδικό βάρος ποζολανών διαφορετικής προέλευσης*

| Σύνθεση                        | Ρήνου    | Βαυαρίας  | Αυστρίας | Salone<br>Ιταλίας | Bacoli<br>Ιταλίας | Θηραϊκή<br>Γη |
|--------------------------------|----------|-----------|----------|-------------------|-------------------|---------------|
| ΑΠ%                            | 4.6-11.8 | 6-8.8     | 15.2     | 4.3               | 3.5               | 4,5           |
| SiO <sub>2</sub>               | 51-57.7  | 59-65.9   | 57.1     | 48.1              | 58.9              | 63,6          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.1-19  | 13.8-16.6 | 17.5     | 18.2              | 20.5              | 17,1          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.8-5.8  | 3-5.4     | 3.3      | 7.3               | 0.8               | 4,1           |
| TiO <sub>2</sub>               |          |           | 0.8      | 0.7               | 0.5               | 0,5-1         |
| CaO                            | 3.1-5.8  | 3.3-7.8   | 0.3      | 9.9               | 4.0               | 3,6           |
| MgO                            | 1.1-1.7  | 0.9-2.8   | 0.9      | 5.7               | 1.5               | 1,8           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.8-5.4  | 1.7-2.2   | 0.5      | 0.9               | 2.7               | 2,4           |
| K <sub>2</sub> O               | 2.8-6.3  | 1.5-2.3   | 2.8      | 4.4               | 6.6               | 2,1           |
| SO <sub>3</sub>                | ίχνη     | ίχνη      | 1.9      | ίχνη              | ίχνη              | ίχνη          |
| E.B.                           | 2.4-2.6  | 2.5-2.6   | 2.4      | 2.7               | 2.4               | 2.4           |

Η χρήση των φυσικών ποζολανών σαν πρόσθετα στο τσιμέντο έχει μακρόχρονη παρουσία. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για λόγους μείωσης του κόστους. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν για εξοικονόμηση ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο η χρήση τους

γενικεύθηκε μετά την ενεργειακή κρίση του 1970. Με το χρόνο διαπιστώθηκε η αυξημένη αντοχή τους στη διάβρωση.

Σύμφωνα με τις Αμερικανικές προδιαγραφές ASTM C595 τα τσιμέντα αυτά χαρακτηρίζονται σαν Type IP. Σύμφωνα με τις Γερμανικές προδιαγραφές DIN 1164 T1 χαρακτηρίζονται σαν Trasszement (Trz).

Η χρήση των ποζολανών σαν πρόσθετα μπορεί να γίνει είτε κατά την παραγωγή του τσιμέντου με ξηρή συνάλεση στο κλίνκερ (Σύνθετα Τσιμέντα), είτε με ανάμιξη εκ των υστέρων κατά την παραγωγή του σκυροδέματος. Στη δεύτερη περίπτωση η ποζολάνη πρέπει να έχει αλεσθεί. Οι φυσικές ποζολάνες σαν πρόσθετα στο τσιμέντο Portland συντελούν ώστε: (Γκερέκος και Καλογέρας, 2009)

- Να μειωθεί η εκλυόμενη θερμότητα κατά την πήξη
- Να αυξηθεί η αντοχή σε διάβρωση
- Να καθυστερεί η ανάπτυξη αντοχών

Όλα αυτά είναι συνέπειες της συμμετοχής της φυσικής ποζολάνης στις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου. Κατά την ενυδάτωση πρώτα αντιδρούν οι ενώσεις του κλίνκερ. Στη συνέχεια αρχίζει με βραδύ ρυθμό η αντίδραση της υδρασβέστου, που απελευθερώνεται από τις ενώσεις του κλίνκερ με τα δραστικά συστατικά της ποζολάνης. Κύριο προϊόν της αντίδρασης αυτής είναι το CSH. Επειδή η αντίδραση αυτή είναι βραδεία επιβραδύνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αλλά και η ανάπτυξη μηχανικών αντοχών. Ταυτόχρονα η δέσμευση της υδρασβέστου συντελεί στην αύξηση της ανθεκτικότητας σε όξινο περιβάλλον. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι, η αντίδραση της υδρασβέστου με τα  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  αλλά και το  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  γίνεται μέσα στους πόρους της μάζας του τσιμέντου και τα προϊόντα περιορίζουν το πορώδες. (Τάσιος και Οικονόμου, 1983)

Τα τσιμέντα με πρόσθετο φυσική ποζολάνη είναι ανθεκτικότερα σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο Portland σε μαλακά νερά, θαλασσινό νερό και σε αραιά διαλύματα αλάτων μαγνησίου. Μόνο σε πυκνά διαλύματα αλάτων μαγνησίου η αντοχή του τσιμέντου Portland είναι μεγαλύτερη. Ακόμη λόγω της ικανότητας δέσμευσης των χλωριόντων συντελούν στην προστασία του οπλισμού.



### 1.2.2. Τεχνητές Ποζολάνες

Οι τεχνητές ποζολάνες παρασκευάζονται από αργίλους και σχιστόλιθους με θερμική κατεργασία, δηλαδή πύρωση σε θερμοκρασίες μεταξύ 770 – 900°C. Τεχνητές ποζολάνες είναι επίσης και οι σκωρίες από υψικαμίνων, η ιπτάμενη τέφρα, η οποία είναι η σκόνη που παράγεται από την καύση λιθανθράκων και λιγνιτών σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όλες οι ποζολανικές κονίες θεωρούνται ως κονίες υδραυλικής ασβέστου. Η αντοχή τους, όμως, είναι σχεδόν διπλάσια από την αντοχή των κονιών της υπερυδραυλικής ασβέστου. Ο όρος τεχνητές ποζολάνες εισήχθη για να περιγράψει αυτά τα προαναφερθέντα ενδιαφέροντα υλικά, όπως και εκείνα που επιτυγχάνονται με τη θερμική κατεργασία αργίλων και γαιών.

Γενικά όμως πρέπει να παραλειφθεί διότι δημιουργεί σύγχυση μεταξύ υλικών που έχουν κοινό γνώρισμα την ποζολανική δραστηριότητα, δηλαδή να αντιδρούν με την άσβεστο παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές στη προέλευση, σχηματισμό και μικροδομή. Η χρησιμοποίηση αυτού



Εικόνα 3: Τεχνητή ποζολάνη, τέφρα

του όρου επιβλήθηκε παλαιότερα διότι έπρεπε να αποκτηθεί η εμπιστοσύνη της αγοράς για τα νέα υλικά που δεν ήταν ιδιαίτερα γνωστή η συμπεριφορά τους. Σήμερα δεν έχει πλέον έννοια, γιατί οι Ι.Τ. έχει αποδειχθεί ότι δεν υστερούν από τις καλύτερες ποζολάνες. Πράγματι αυτές έχουν διερευνηθεί και εφαρμοσθεί επιτυχώς σε αρκετές περιπτώσεις σαν πρόσθετα στα τσιμέντα, στα κονιάματα και σκυροδέματα, σαν πρώτες ύλες στη βιομηχανία προκατασκευασμένων και στις περιπτώσεις οδοποιίας. (Σακελλαρίου)

#### 1.2.2.1. Σκωρίες Υψικαμίνων

Οι «σκωρίες» είναι μεταλλουργική έκφραση που περιγράφει γενικά τα μη μεταλλικά ορυκτά συστατικά μέρη και διακρίνονται από τις τέφρες, που αποτελούν κατάλοιπα καύσης. Κατά τη βιβλιογραφία, η σκωρία του ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα βιομηχανικά ληφθέν τεχνητό πέτρωμα, του οποίου η χημική σύνθεση, η

ορυκτολογική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανάλογες των μαγματικών πετρωμάτων (π.χ. βασάλτης ή γρανίτης). (Τριανταφύλλου, 2008)

Η ποσότητα που παράγεται στα χαλυβουργεία, ως παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί ποσοστό περίπου 10%-15% επί της συνολικής ποσότητας τροφοδοσίας του κλιβάνου, με αποτέλεσμα οι μεταλλουργικές σκωρίες να είναι ένα από τα μεγαλύτερα σε ποσότητα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Η συνολική ποσότητα στην Ελλάδα είναι περίπου 350.000 τόνοι ανά έτος.

Ο παλαιοσίδηρος (σκραπ) αποτελεί την πρώτη ύλη των χαλυβουργείων. Αρχικά γίνεται διαχωρισμός από μονάδα άλεσης σε μεταλλικά μέρη. Στη συνέχεια, μόνο οι σιδηρούχες ύλες προωθούνται στο κλίβανο για τήξη, όπου προστίθενται ασβέστης και άλλα συλλιπάσματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της «μεταλλουργικής σκωρίας». Η σκωρία οδηγείται σε ρευστή κατάσταση (1630oC) από ειδική θυρίδα του κλιβάνου, συλλέγεται και οδηγείται σε χώρο συγκέντρωσης, όπου και ψύχεται. Η απότομη ψύξη της σκωρίας, της δίνει την άμορφη, υαλώδη μορφή προσδίδοντας έτσι τις άριστες μηχανικές της ιδιότητες. Από τη στιγμή αυτή η σκωρία παύει να είναι παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του χαλυβουργείου και αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή διαβαθμισμένων σκληρών αδρανών. (Κόλια, 1986)

**Πίνακας 4:** Τυπική χημική σύσταση (XRF)

| Στοιχείο | FeO <sub>x</sub> | CaO | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO | MgO |
|----------|------------------|-----|------------------|--------------------------------|-----|-----|
| Ποσοστό  | 36%              | 31% | 14%              | 6%                             | 6%  | 2%  |

Για την παραγωγή των τελικών προϊόντων ακολουθείται σειρά μηχανικών διεργασιών, κατά σειρά προδιαλογή, ασιδήρωση, πρωτογενής θραύση, δευτερογενής θραύση και τελικά παραγωγή των τελικών προϊόντων από κοσκίνιση. Τα αδρανή που παράγονται, ταξινομούνται σε διάφορα κλάσματα και αποθηκεύονται σε σωρούς στις πελατείες τελικών προϊόντων. Από τον 02/2006 τα σκληρά αδρανή της ΑΕΙΦΟΡΟΣ είναι πιστοποιημένα κατά ΕΛΟΤΕΝ 13043.

Το κύριο πλεονέκτημα της σωστά επεξεργάσιμης σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου είναι οι άριστες μηχανικές ιδιότητες που ικανοποιούν τόσο τις εγχώριες όσο και τις Διεθνείς προδιαγραφές αδρανών για την κατασκευή επιφανειακών επιστρώσεων και συγκεκριμένα αντιολισθηρών ταπήτων. Η χρήση των αδρανών αυτών στην οδοποιία και ειδικά σε οδούς με μεγάλες απαιτήσεις αντίστασης σε ολίσθηση, όπως

οδούς ταχείας κυκλοφορίας και αυτοκινητοδρόμους, επιδρά καταλυτικά στον τομέα της ασφάλειας. Η ποιότητα των οδοστρωμάτων αυτών μπορεί να συγκριθεί ποιοτικά με τα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων στις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες.



*Εικόνα 4: Κατασκευή οδοστρώματος με σκυρία στο αεροδρόμιο Θεσσαλονίκης (2004) και στην Εθνική οδό Αθηνών Θεσσαλονίκης (2005)*

#### **1.2.2.2. Ιπτάμενη Τέφρα**

Σαν ιπτάμενη τέφρα (I.T.) ορίζεται, κατά το ASTM-C618 το "λεπτά διαμερισμένο υπόλειμμα που είναι αποτέλεσμα της καύσεως κονιοποιημένου άνθρακα". Στο BS-3892 σαν pulverized fuel ash (PFA) ορίζεται "το στερεό υλικό που συλλέγεται με ηλεκτροστατικά και μηχανικά μέσα από τα αέρια καύσεως των εστιών που καίνε κονιοποιημένο άνθρακα". Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450 για τα κατασκευαστικά υλικά, η ιπτάμενη τέφρα ορίζεται ως "το λεπτόκοκκο υλικό αποτελούμενο από κυρίως σφαιρικά, υαλώδη σωματίδια, προερχόμενα από την καύση κονιοροποιημένου άνθρακα. Λαμβάνεται από τα ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα, τα οποία την δεσμεύουν από τα απαέρια των λεβήτων καύσης κονιοροποιημένου άνθρακα. Μπορεί να είναι πυριτικής ή ασβεστολιθικής προέλευσης". Οι I.T. είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν αυξανόμενου ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπ' όψη το γεγονός, ότι η παγκόσμια παραγωγή I.T. φθάνει τα 180.000.000 τόνους ετησίως, από την οποία γίνεται εκμετάλλευση περίπου 16-17%. Το ποσοστό αυτό στις προηγμένες χώρες ανέρχεται στο 30-40%. Αυτή η παραγωγή αυξάνεται αφού υπάρχει τάση λιγότερης χρησιμοποίησης υγρών και αερίων καυσίμων στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Οι λέβητες των ατμοηλεκτρικών σταθμών μπορεί να είναι δύο τύπων, με τετηγμένη τέφρα (WET BOTTOM ASH) ή ξηρή τέφρα (dry ash).

Στη πρώτη περίπτωση 85- 99% του στερεού υπολείμματος συλλέγεται σε τετηγμένη κατάσταση και ψύχεται γρήγορα στο νερό. Η περιεκτικότητα σε άκαυστο άνθρακα είναι πάρα πολύ μικρή. Στη δεύτερη περίπτωση ένα κλάσμα (10-15%) του

στερεού απόβλητου κατακάθεται στο πυθμένα του θαλάμου καύσης, απομακρύνεται μηχανικά και συνίσταται από μικρού μεγέθους κόκκους (30 $\mu$ m - 30mm). Το υπόλοιπο (85-90%) συλλέγεται και απομακρύνεται με ηλεκτρόφιτρα. Αυτή είναι η πραγματική Ι.Τ. που διατίθεται είτε ξηρή είτε με μία υγρασία 8-12%. Η υαλώδης κατάσταση του υλικού εξαρτάται από τη θερμοκρασία καύσης και το τρόπο ψύξης. Τέφρες που σχηματίζονται σε θερμοκρασίες από 1200 $^{\circ}$ -1400 $^{\circ}$ C, μπορεί να χρησιμοποιηθούν στα τσιμέντα, αλλά καλύτερης ποιότητας τέφρες προκύπτουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες (1500 -1700 $^{\circ}$ C). Περίπου 45 εκατομμύρια τόνοι Ι.Τ. παράγονται κάθε χρόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες με μία ετήσια αύξηση 10%. Από αυτές η βιομηχανία τσιμέντων χρησιμοποιεί περίπου το 10% της ετήσιας παραγωγής.

Η Γαλλία είναι στη δεύτερη θέση, μετά τις ΗΠΑ, μεταξύ των χωρών που καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες τεφρών στη παραγωγή των υδραυλικών κονιών. Περίπου 95% της παραγωγής προέρχονται από τέφρες ανθράκων με πολύ μικρή περιεκτικότητα ασβεστίου και μία ειδική επιφάνεια κατά Blaine (2.500-4.000 cm $^2$ /g). Σε μικρότερη κλίμακα η Γαλλία επίσης παράγει τέφρες από καύση λιγνίτη, που χαρακτηρίζονται από υψηλότερη περιεκτικότητα σε ασβέστιο και ειδική επιφάνεια (5.000-6.000 cm $^2$ /g) και ονομάζονται ασβεστοθεϊκές τέφρες. Επίσης παράγει τέφρες με υψηλό ποσοστό σε άσβεστο (CaO 44%) και τις χαρακτηρίζει υδραυλικές τέφρες. Και οι δύο χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία υδραυλικών κονιών. Η Αγγλία παράγει εκατομμύρια τόνους ιπταμένων τεφρών από τους οποίους περίπου το μισό της παραγωγής χρησιμοποιεί ως επί το πλείστον για 'fillers' σε επιχώματα και μία μικρή ποσότητα στη βιομηχανία τσιμέντου.

## 2. ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Στο δεύτερο κεφάλαιο η εργασία εστιάζει στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών της ιπτάμενης τέφρας. Συγκεκριμένα καταγράφονται πληροφορίες σχετικά με τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της, τις προδιαγραφές που διέπουν την χρήση της και τις κατηγορίες που διακρίνεται βάσει της σύστασης της.

### 2.1. Χημική Σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας

Σύμφωνα με διεθνή βιβλιογραφικά δεδομένα οι τέφρες λιθανθράκων συνίστανται κυρίως από πυρίτια και αλουμίνα. Η σύνθεση είναι περίπου 50% SiO<sub>2</sub>, 30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2% CaO, 5% αλκάλια και 7% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Το άκαυστο υλικό κυμαίνεται μεταξύ 1-6%. Αυτές είναι συνεπώς αργιλοπυριτικά υλικά με υψηλό βαθμό υαλώδους φάσεως και λίγα κρυσταλλικά στοιχεία.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN197-1 διαχωρίζει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

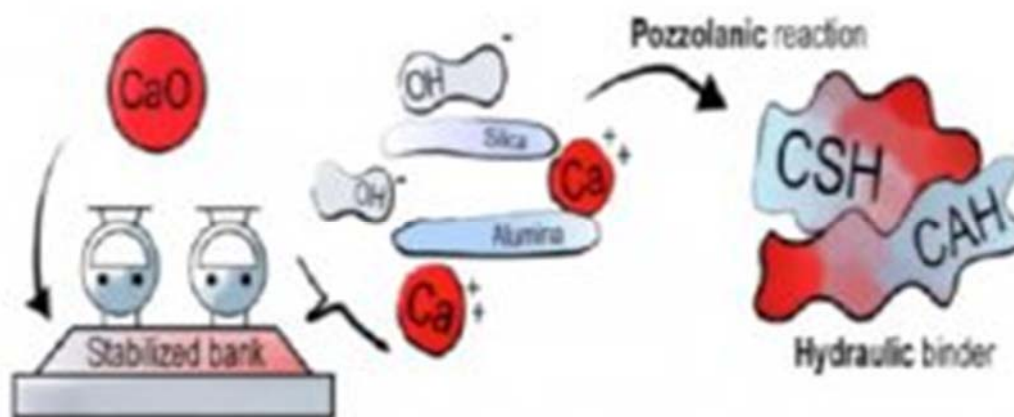
- Στις πυριτικές τέφρες (V), οι οποίες περιέχουν λιγότερο από 10% CaO.
- Στις ασβεστολιθικές τέφρες (W), οι οποίες περιέχουν 10-35% CaO.

Οι τέφρες της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζουν ποζολανικές ιδιότητες, ενώ της δεύτερης κατηγορίας μπορεί να έχουν και υδραυλικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM C618, οι τέφρες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στις τέφρες τύπου N, οι οποίες περιλαμβάνουν ακατέργαστες ποζολάνες με τουλάχιστον 70% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Στις τέφρες τύπου F που παράγονται από την καύση ανθρακίτη ή βιταμινούχου κάρβουνου με τουλάχιστον 70% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, και τέλος
- Στις τέφρες τύπου C, που είναι εκείνες που παράγονται από την καύση λιγνίτη και υπό-βιταμινούχου κάρβουνου και περιέχουν τουλάχιστον 50% αλλά λιγότερο από 70% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Οι τέφρες τύπου F περιέχουν συνήθως λιγότερο από 5% CaO, ενώ οι τέφρες τύπου C περιέχουν μεγάλη ποσότητα CaO (10-35%).

Η διερεύνηση με εξελιγμένες ηλεκτρονικές μεθόδους έχει αποκαλύψει μία μεγάλη διακύμανση στη σύνθεση ακόμη και έκταση καθενός, των κόκκων. Η διακύμανση αυτή δεν έχει καμία επίδραση στην όλη χημική σύνθεση της τέφρας, που παράγεται από ένα απλό καλό συντονισμένο ατμοηλεκτρικό σταθμό που καίει άνθρακα ή λιγνίτη από ένα ορισμένο ορυχείο. Οι λιγνιτικές ή υδραυλικές τέφρες είναι πλουσιότερες σε άσβεστο και η σύνθεσή τους κυμαίνεται μέσα στα ακόλουθα όρια:  $\text{SiO}_2$  (23-50%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8-14%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (8-20%)  $\text{CaO}$  (18-50%).



Εικόνα 5: Η ποζολανική αντίδραση

Η υδραυλική τους δράση αυξάνει αναλογικά με τη περιεκτικότητά τους σε άσβεστο. Σε τέφρες πλουσιότερες σε ασβέστιο οι νεο-σχηματιζόμενες ενώσεις κατά την αντίδρασή τους με το νερό είναι παρόμοιες με εκείνες που επιτυγχάνονται στο τσιμέντο Portland. Η αντίδρασή τους αυτή συνοδεύεται και από έκλυση θερμότητας.

## 2.2. Φυσική Σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας

Η λεπτότητα είναι μία από τις ουσιώδεις παραμέτρους, για να ορισθεί η ικανότητα της τέφρας να προστεθεί στο τσιμέντο, αφού αυτή επιδρά στο ρυθμό ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών. Υπάρχει μία βέλτιστη λεπτότητα πάνω από την οποία η αύξηση της αντοχής γίνεται με μικρότερο ρυθμό. Αυτό οφείλεται στην υπέρμετρη αύξηση της ειδικής επιφάνειας και την προσρόφηση μεγαλύτερης ποσότητας νερού, με συνέπεια την αύξηση του λόγου N/T (νερού / τσιμέντου) και άρα μείωση σχετικώς της αντοχής, προκειμένου το μίγμα να έχει την ίδια εργασιμότητα.

Η λεπτότητα των τεφρών ως έχουν, μπορεί να προσδιορισθεί με την μέθοδο Blaine και ποικίλει από χώρα σε χώρα από  $2700 \text{ cm}^2/\text{g}$  μέχρι  $4.250 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Λόγω της πορώδους φύσεως των κόκκων της τέφρας, ο υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας με

μεθόδους μετρήσεως διαπερατότητας με αέρα δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Γι' αυτό προτιμώνται μέθοδοι προσδιορισμού της κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού π.χ. αεροδιαχωριστές, Laser, και με κόσκινα.

Εργαστηριακές μελέτες που έγιναν με Ι.Τ. που περιείχαν ελαφρά δραστικούς τύπους MgO και CaO έχουν δείξει ότι διάρκεια άλεσης 10-15 λεπτά με κατάλληλες συνθήκες σ' ένα ειδικό μύλο (planet Mill), αυξάνει τη χημική δραστηριότητα που αποδίδεται σ' ένα φαινόμενο συσσωμάτωσης και καταστροφής της μακροσκοπικής δομής που παράγει ένυδρα προϊόντα υψηλότερων μηχανικών αντοχών. Η επίδραση της λεπτότητας του αλεσμένου υλικού επιβεβαιώνεται και από έρευνα που έγινε σε ιπτάμενες τέφρες λιγνιτικής προέλευσης στη χώρα μας.

Η εξέταση των μηχανικών αντοχών σε κονιάματα δείχνει ότι η τέφρα μπορεί να αντικαταστήσει μέχρι 45% το τσιμέντο Portland εάν χρησιμοποιηθεί το κλάσμα κάτω των 45 μικρών. Είναι προτιμότερο όμως να αλεσθούν εξ' ολοκλήρου όλα τα κλάσματα παρά να γίνει διαχωρισμός με κόσκινα. Ο άριστος χρόνος άλεσης είναι περίπου 10 λεπτά. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τέφρας εξάγονται από τη διερεύνηση της με σύγχρονες μεθόδους όπως είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως (SEM : Scanning Electron Microscope) και η περίθλαση ακτινών x (XRD: X-Ray Diffraction).

Η τέφρα φαίνεται σαν σκόνη από λεπτούς σφαιρικούς κόκκους το μέγεθος των οποίων ποικίλει από 0,5-200 μm. Το σχήμα και το χρώμα είναι μεταβλητό. Υπάρχουν μικρές οπές ή στερεές σφαίρες, γωνιακοί κόκκοι με εξογκώματα και κοιλότητες ανοιχτά ή όστρακα. Η υπόλοιπη επιφάνεια των κόκκων είναι γενικά λεία και στιλπνή. Από ορυκτολογική άποψη συνίστανται κυρίως από υαλώδη φάση αργιλοπυριτικών με μικρές ποσότητες σιδήρου, νατρίου, καλίου, ασβεστίου, μαγνησίου και τιτανίου. Οι άλλες εσωτερικές φάσεις είναι μουλίτης, χαλαζίας, αιματίτης, μαγνητίτης όπως επίσης και καύσιμη ύλη. Τα ίχνη του μουλίτη στο υπόλειμμα μετά από επίδραση αραιού υδροχλωρικού οξέος φαίνεται να είναι μία ένδειξη διαφοροποίησης της τέφρας από την φυσική ποζολάνη στα τσιμέντα. (ΕΛΟΤ EN12620)

### **2.3. Παραγωγή Τέφρας**

Η ιπτάμενη τέφρα, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί θεμελιώδες προϊόν σε ποσότητα, ενώ ταυτόχρονα είναι ένα στερεό και κονιώδες υλικό το οποίο παράγεται κατά την καύση των κονιοποιημένων στερεών καυσίμων (λιθάνθρακες, λιγνίτες,

τύρφη) στους λέβητες των ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ). Ακολούθως, συμπαρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται στις εγκαταστάσεις αποκονίωσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα).

Όπως συμβαίνει στη χώρα μας, αναλόγως και σε παγκόσμια κλίμακα ο διαρκώς αυξανόμενος ρυθμός της χρησιμοποίησης στερεών καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοτήτων της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας

Με διαφορετικές μεθόδους πραγματοποιείται η καύση των στερεών καυσίμων, οι οποίες έχουν διαμορφώσει διάφορες τεχνολογίες. Οι τεχνολογίες της καύσης των στερεών συμβατικών καυσίμων που εφαρμόζονται σήμερα είναι οι ακόλουθες:

- Καύση τηκόμενης τέφρας (εφαρμόζεται στην καύση γαιανθράκων με υψηλή θερμογόνο δύναμη) με θερμοκρασία φλογοθαλάμου 1600 – 700°C, όπου μόνο το 15% περίπου της παραγόμενης τέφρας αποχωρίζεται στα φίλτρα σαν ιπτάμενη τέφρα. Το υπόλοιπο καταπίπτει με την βαρύτητα στον πυθμένα του λέβητα (Bottom slag, τηγμένη τέφρα) όπου αναμειγνυόμενο με νερό προσλαμβάνει κοκκώδη μορφή (granulat). Για συντομία, στην συνέχεια ο τρόπος αυτός καύσης θα αναφέρεται σαν καύση τ.τ..
- Ξηρή καύση. (εφαρμόζεται σε λιθάνθρακες και λιγνίτες με χαμηλή θερμογόνο δύναμη), με θερμοκρασία φλογοθαλάμου 1100 – 1200°C, όπου το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας (ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου) ανέρχεται σε 85-90% περίπου της συνολικά παραγόμενης τέφρας. Το υπόλοιπο καταπίπτει και συλλέγεται σαν τέφρα πυθμένα (Bottom slag). Οι ΘΗΣ στην Ελλάδα λόγω του καυσίμου είναι εξοπλισμένοι για ξηρή καύση.
- Καύση εσχάρας μεγάλων μη κονιοποιημένων τεμαχίων (ιδίως) λιθάνθρακα, όπου το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας ανέρχεται σε 10% περίπου του συνολικού. Το υπόλοιπο συλλέγεται σαν τέφρα ή σκωρία εσχάρας. Η ποσότητα της παραγόμενης τέφρας, λόγω της συνεχούς υποχώρησης του τρόπου αυτού καύσης, μπορεί να θεωρηθεί για το μέλλον αμελητέα..
- Μικρές ποσότητες ιπτάμενης τέφρας προέρχονται και από την καύση παντός είδους απορριμμάτων (κυρίως αστικών αποβλήτων) σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής.



Για τεχνικούς κυρίως λόγους (π.χ. απλούστερη κατασκευή λεβήτων, υψηλότερη διαθεσιμότητα, υψηλότερη μέγιστη ισχύ) αλλά και περιβαλλοντικούς (χαμηλότερη εκπομπή NOx), συναντάται τα τελευταία χρόνια μεγαλύτερος αριθμός των νέων μονάδων παραγωγής που μπαίνουν σε λειτουργία σε παγκόσμιο επίπεδο να έχουν εξοπλισμό για ξηρή καύση. Το προβάδισμα που παρέχεται στην ξηρή καύση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοτήτων της παραγόμενης τέφρας, ακόμα και όταν η συνολική ποσότητα των καταναλισκόμενων στερεών καυσίμων δε μεταβάλλεται και παραμένει σταθερή.

Εκτιμάται ότι σε παγκόσμια κλίμακα αξιοποιείται μόνο το 20% περίπου της παραγόμενης τέφρας. Ο προσανατολισμός που δίνεται στην τεχνική της ξηρής καύσης-έναντι της καύσης τ.τ. έχει ως αποτέλεσμα εκτός από την ποσοτική αύξηση της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας και την ποιοτική της μεταβολή. Εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών που κυριαρχούν στον φλογοθάλαμο αυξάνεται ο αριθμός των χονδρόκοκκων και ακανόνιστου σχήματος σωματιδίων έναντι των λεπτόκοκκων και σφαιρικών. Παράλληλα, αυξάνεται πολλές φορές και το ποσοστό της κρυσταλλικής φάσης (χαλαζίας (SiO<sub>2</sub>) και μουλίτης (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>)) που εμπεριέχεται στα σωματίδια. Ακόμη λόγω της ατελέστερης διάσπασης στην τεχνολογία της ξηρής καύσης δύναται να αυξηθεί το ποσοστό του άκαυστου υπολείμματος και το πορώδες των κόκκων της ιπτάμενης τέφρας.

Οι παραπάνω μεταβολές επιδρούν τόσο στις χημικές ιδιότητες (ποζολανικότητα) όσο και στις φυσικές ιδιότητες (λεπτότητα, δομή) των ιπτάμενων τερφρών. Οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζουν την ποιότητα των ιπτάμενων τερφρών. Αυτές οι επιδράσεις στην ποιότητα γίνονται σημαντικές όταν αυτές οι τέφρες εξετάζονται στα πλαίσια της αξιοποίησής τους στα δομικά υλικά, γιατί επιδρούν στις αποκτώμενες τεχνολογικές ιδιότητες των παραγόμενων υλικών. Έτσι διαμορφώθηκε μια κατάταξη των ιπταμένων τερφρών (καθώς και μία σειρά από βασικά κριτήρια καταλληλότητας) σχετικά με τις ιδιότητες τους, σε συνάρτηση με τις προβλεπόμενες εφαρμογές.

#### **2.4. Κατάταξη Ιπτάμενης Τέφρας**

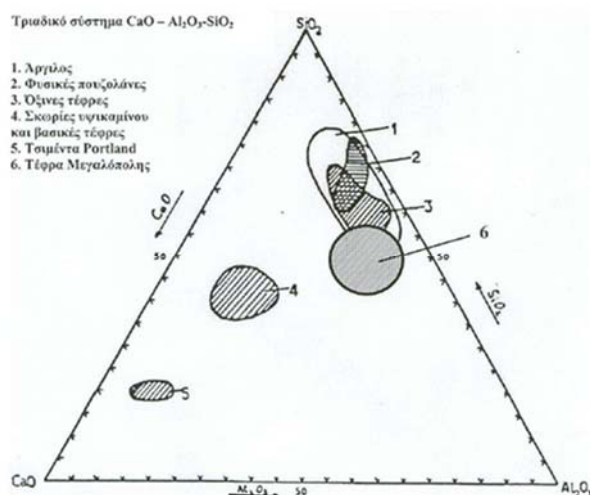
Η βασική διάκριση των ιπτάμενων τερφρών αφορά την χημική σύστασή τους, η οποία εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και από την

ορυκτολογική σύσταση των γαιωδών προσμίξεων που συνοδεύουν το καύσιμο στην εξόρυξη.

Γενικά, οι συγκεντρώσεις των οξειδίων που αποτελούν τις τέφρες μετά την καύση του περιεχόμενου άνθρακα και την διάσπαση των ανθρακικών του στερεού καυσίμου παρουσιάζονται αισθητά αυξημένες στο υλικό (ιπτάμενη τέφρα) από τις αρχικές (στόν εξορυσσόμενο λιγνίτη) λόγω συμπύκνωσης (εμπλουτισμού). Αυτό οδήγησε και σε προτάσεις για την αξιοποίηση αρκετών ιπτάμενων τεφρών σαν Α΄ ύλη για την ανάκτηση ιχνοστοιχείων (κυρίως Ge και Ga). Η κυριότερη διάκριση λόγω της χημικής σύστασης είναι αυτή που καθορίζεται από την τιμή του λόγου  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  που κατατάσσει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (Νικολαΐδης, 1983)

- Τέφρες βασικές ή υψηλής ασβέστου (HA) ή Calcareous fly ashes
- Τέφρες όξινης ή χαμηλής ασβέστου (LA) ή Siliceous fly ash

Τέφρες που χαρακτηρίζονται βασικές, έχουν συντελεστή  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 1$  ενώ τέφρες με  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 0.3$  θεωρούνται όξινης. Όπως προκύπτει από τις διακυμάνσεις που εμφανίζονται στον πίνακα σε κάθε χώρα ανάλογα με την περιοχή προέλευσης του στερεού καυσίμου παράγεται βασική (30 – 40% CaO) ή όξινη τέφρα (2 – 15% CaO).



Εικόνα 6: Χαρακτηριστικές περιοχές υδραυλικών κονιών και ποζολανών

Στην Ελλάδα, στους ενεργειακούς σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας παράγονται κατά κανόνα βασικές τέφρες ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.86-1.40$ ), ενώ στους σταθμούς της Μεγαλόπολης όξινης ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.25-0.38$ ).

Η περιοχή στην οποία εμφανίζονται οι όξινης τέφρες στο τριαδικό σύστημα  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CaO}$  βρίσκεται πολύ κοντά και επικαλύπτεται εν μέρει με την περιοχή

εμφάνισης των φυσικών ποζολανών (θηραϊκή γη, ηφαιστειακοί τόφφοι). Απεναντίας, η περιοχή των βασικών τεφρών πλησιάζει την περιοχή υδραυλικών κονιών (τσιμέντων). (Μάτης, 1983)

#### 2.4.1. Κατεργασμένη Ιπτάμενη Τέφρα

Η κατεργασμένη τέφρα βρίσκει εφαρμογή σε μαζικές κατασκευές όπως

- Τοίχοι αντιστήριξης
- Φράγματα
- Δύσκαμπα οδοστρώματα
- Πίστες αεροδρομίων
- Διαχωριστικά δρόμων
- Τριγωνικές τάφροι
- Προϊόντα σκυροδέματος όπως τσιμεντοσωλήνες, στραγγιστήρια, κρασπεδορειθρα, κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίου
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για επισκευές και σταθεροποίηση σηράγγων



**Εικόνα 7:** Γρεβενά, θέση γεφύρι του Πασά, κατασκευή πιλοτικού οδοστρώματος με τέφρα. Διάστρωση του τεφροσκυροδέματος με finisher σε 2 στρώσεις σε θερμοκρασία περιβάλλοντος υψηλή κατά την

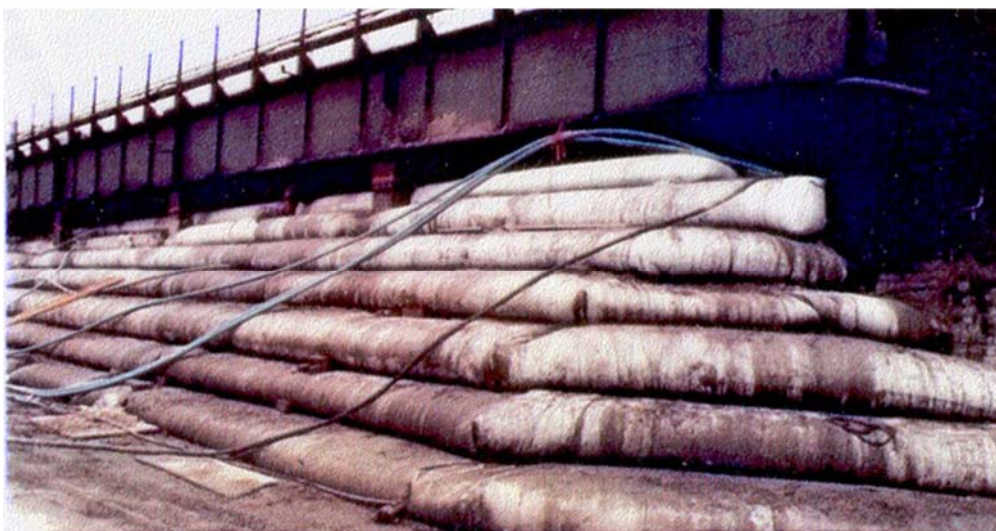


**Εικόνα 8:** Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για σταθεροποίηση πρανών ώρα της διάστρωσης

#### 2.4.2. Ακατέργαστη Ιπτάμενη Τέφρα

Ως ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα ορίζεται το υλικό που διατίθεται, όπως συλλέγεται ή μετά από στοιχειώδη ομοιογενοποίηση, επιλεκτικά συλλεγόμενου υλικού. Ποσότητες ακατέργαστης ιπτάμενης τέφρας αξιοποιείται στα εξής δομικά έργα

- Σταθεροποίηση υπόβασης
- Κατασκευή υποβάσεων και άκαμπτων οδοστρωμάτων
- Σταθεροποίηση πρανών
- Σταθεροποίηση – βελτίωση εδαφών θεμελιώσεων
- Στεγάνωση εδαφών



Εικόνα 9: Χρήση ακατέργαστης τέφρας για την σταθεροποίηση πρανών

#### 2.5. Ευρωπαϊκά & Ελληνικά Πρότυπα Καταλληλότητας Ιπτάμενης Τέφρας

Για την ανάπτυξη κριτηρίων καταλληλότητας πρέπει κατ' αρχήν να ληφθούν υπόψη η ιδιαιτερότητα κάθε τέφρας και η χρήση που θα βρει το υλικό. Δεν πρέπει επίσης να αγνοηθεί η διεθνής εμπειρία, το πως ήδη έχει αντιμετωπισθεί το θέμα και πως λειτούργησαν τα ήδη υπάρχοντα κριτήρια. (Βογιατζάκης, 1976)

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450 για τα κατασκευαστικά υλικά, η ιπτάμενη τέφρα ορίζεται ως το λεπτόκοκκο υλικό αποτελούμενο από κυρίως σφαιρικά, υαλώδη σωματίδια, προερχόμενα από την καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα. Λαμβάνεται από τα ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα, τα οποία την δεσμεύουν από τα απαέρια των λεβήτων καύσης κονιορτοποιημένου άνθρακα. Μπορεί να είναι πυριτικής ή ασβεστολιθικής προέλευσης. (2007)

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN197-1 διαχωρίζει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Στις πυριτικές τέφρες (V), οι οποίες περιέχουν λιγότερο από 10% CaO
- Στις ασβεστολιθικές τέφρες (W), η οποίες περιέχουν 10-35% CaO

Οι τέφρες της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζουν ποζολανικές ιδιότητες, ενώ της δεύτερης κατηγορίας μπορεί να έχουν και υδραυλικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM C 618, οι τέφρες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: (Παπαγιάννη, 1983)

- Στις τέφρες τύπου N, οι οποίες περιλαμβάνουν ακατέργαστες ποζολάνες με τουλάχιστον 70% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Στις τέφρες τύπου F που παράγονται από την καύση ανθρακίτη ή βιταμινούχου κάρβουνου με τουλάχιστον 70% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, και τέλος

Στις τέφρες τύπου C, που είναι εκείνες που παράγονται από την καύση λιγνίτη και υπό-βιταμινούχου κάρβουνου και περιέχουν τουλάχιστον 50% αλλά λιγότερο από 70% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (Στιβανάκης)

Οι τέφρες τύπου F περιέχουν συνήθως λιγότερο από 5% CaO, ενώ οι τέφρες τύπου C περιέχουν μεγάλη ποσότητα CaO (10-35%).

Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία των ασβεστολιθικών τεφρών (W) σύμφωνα με το EN197-1 και στην κατηγορία C σύμφωνα με το ASTM C 618, λόγω των υψηλών ποσοστών CaO που περιέχουν. (Παπαγιάννη)

### 3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Σε αυτή την ενότητα γίνεται εκτενής αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση που κυριαρχεί στον Ελληνικό χώρο.

#### 3.1. Χημική Σύσταση Ελληνικών Ιπτάμενων Τεφρών

Οι Ελληνικές Ι.Τ. είναι δυνατόν να καταταχθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Στις πλούσιες σε αργιλοπυριτικά συστατικά που έχουν ως επί το πλείστον ποζολανικές ιδιότητες (Τέφρα Μεγαλόπολης).
- Στις πλούσιες σε άσβεστο, όπως είναι οι τέφρες Πτολεμαΐδα, Καρδιάς και Αλιβερίου, που έχουν ως επί το πλείστον υδραυλικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με τα Ελληνικά βιβλιογραφικά δεδομένα, η χημική σύσταση των Ελληνικών Ι.Τ., κυμαίνεται μέσα στα όρια που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 5: Χημική σύσταση Ελληνικών Ιπτάμενων Τεφρών.*

| Σύνθεση                        | Πτολεμαΐδας | Μεγαλούπολης | Αλιβερίου |
|--------------------------------|-------------|--------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 13-35       | 40-45        | 35        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9-20        | 15-25        | 15        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,5-7,0     | 6,5-10       | 8         |
| CaO                            | 30-50       | 12-18        | 25        |
| MgO                            | 1,5-4,5     | 1,8-2,8      | 2         |
| SO <sub>3</sub>                | 4-11        | 1,5-3,5      | 2,5       |
| K <sub>2</sub> O               | 0,5-1,1     | 1,5-2        | 2         |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,6-0,8     | 0,5          | 0,5       |
| Ελεύθερο CaO                   | 9-15        | -            | 3         |
| Απώλεια                        | 1-7,5       | 0,-2,8       |           |
| Αδιάλυτο                       | 12-32       | 30-45        | 25-30     |

#### 3.2. Φυσική Σύσταση Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας

Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες, σχετικά με τις φυσικές τους ιδιότητες, μπορούν να συνοψιστούν στις παρακάτω παρατηρήσεις:



- Διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τη λεπτότητά τους. Συγκεκριμένα η Ι.Τ. Μεγαλόπολεως έχει μια ειδική επιφάνεια της τάξης των 250-300 m<sup>2</sup>/kg. (Blaine) και μια κοκκομετρία με R90 =3% , R200= 13%. Η Ι.Τ. Πτολεμαΐδας έχει μία ειδική επιφάνεια 500-600 m<sup>2</sup>/kg (Blaine) και μια κοκκομετρία R90= 10,5% και R200 = 3%. Για σύγκριση αναφέρεται ότι το τσιμέντο Portland έχει ειδική επιφάνεια κατά Blaine περίπου 300 m<sup>2</sup>/kg.
- Το απόλυτο ειδικό βάρος ποικίλει εξαρτώμενο και από την αρχική τους λεπτότητα. Αναφέρονται τιμές από 1,9-2,6 g/cm<sup>3</sup>. Η Ι.Τ. Μεγαλόπολης εμφάνιζε ελαφρά μικρότερες τιμές από την Ι.Τ. Πτολεμαΐδας.
- Το φαινόμενο ειδικό βάρος τους εξαρτάται επίσης από τη λεπτότητα τους (μειώνεται λίγο με την αύξηση της). Κυμαίνεται από 0,5-0,7 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3. Ανάλυση της Δομής της Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας

Από μελέτες που αφορούν την έρευνα της δομής των ελληνικών Ι.Τ. με XRD, SEM και μικροανάλυση (EPMA- Electron Probe Micro Analysis) παρατηρείται στην Ι.Τ. Μεγαλόπολης ένα αρκετά υψηλό ποσοστό υαλώδους υποστρώματος μέσα στο οποίο τα κύρια κρυσταλλικά συστατικά που παρατηρούνται είναι ως επί το πλείστον χαλαζίας, πλαγιόκλαστα (κυρίως λαβραδορίτης ) λίγο CaSO<sup>4</sup> (ανυδρίτης) και σε μικρότερα ποσοστά μοντμοριλονίτης, μαγνητίτης, ξευδοβολαστονίτης και αργιλικό τριασβέστιο (C3A). Στην ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας το υαλώδες υπόστρωμα εμφανίζεται σε πολύ χαμηλότερο ποσοστό από εκείνο της τέφρας της Μεγαλόπολης.

Οι κυριότερες φάσεις είναι ελευθέρως άσβεστος (CaO), άνυδρο CaSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>3</sub>, λίγα πλαγιόκλαστα και δευτερευόντως πυριτικό διασβέστιο, κυρίως όμως της γ-μορφής που δεν έχει υδραυλικές ιδιότητες, ασβεσταργιλικές ενώσεις (CaAl<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) και πυριτικό τριασβέστιο σε πολύ μικρά ποσοστά.

### 3.4. Ποιότητα Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας

Η ποιότητα των Ιπταμένων Τεφρών διαφοροποιείται έντονα. Η διαφοροποίηση αυτή στην σύστασή τους είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Εδώ δίνονται ορισμένοι από αυτούς τους παράγοντες:

- Ανάλογα με το ορυχείο τροφοδοσίας λιγνίτη (διαφοροποίηση ανόργανων συστατικών)
- Ανάλογα με το μέτωπο εξόρυξης στο ίδιο ορυχείο
- Ανάλογα με τον ατμοηλεκτρικό σταθμό (ΑΗΣ)
- Ανάλογα με την διαφορετική μονάδα κάθε ΑΗΣ (συνθήκες λειτουργίας, παλαιότητα, κατάσταση φίλτρων κλπ) Τα προβλήματα ανομοιογένειας των τεφρών που επιφέρει η μεγάλη διακύμανση στη σύστασή τους έπρεπε να ελεγχθούν για να είναι δυνατή η τυποποίηση του υλικού ώστε να ικανοποιείται η απαιτούμενη από τα πρότυπα αξιοπιστία.

Σημαντική τεχνολογία στην αντιμετώπιση και τον περιορισμό των διαφοροποιήσεων της σύστασης των τεφρών έχει αποκτηθεί από την χρήση τους στην Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία για την παραγωγή του σύνθετου τσιμέντου Π32,5 .

Η τσιμεντοβιομηχανία έχει εντοπίσει κατά την μακρόχρονη χρήση της τέφρας τις διαφοροποιήσεις αυτές στα εξής κυρίως σημεία :

- Ανομοιογένεια χημικής σύστασης
- Ανομοιογένεια ορυκτολογικής σύστασης
- Ανομοιογένεια κοκκομετρικής διαβάθμισης
- Ανομοιογένεια στην ενεργότητα (επίδραση επί των μηχανικών αντοχών, αδιάλυτο υπόλειμμα, απώλεια στην πύρωση)

Οι μεταβολές επομένως ορισμένων χαρακτηριστικών των τεφρών είναι μεγάλες ακόμη και για τις Ιπτάμενες Τέφρες των ίδιων των Σταθμών. Έτσι η οποιαδήποτε χρήση των Τεφρών σαν πρώτο βήμα θα πρέπει να αποσκοπεί στον περιορισμό της διαφοροποίησης των συστατικών τους. Μέτρα που θα βοηθούσαν σ' αυτό θα μπορούσαν να είναι τα παρακάτω

- Γνώση των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι τέφρες κάθε ΑΗΣ
- Επιλεκτική τροφοδότηση με λιγνίτη ορισμένων μονάδων ΑΗΣ από ορισμένα ορυχεία.
- Ανάμιξη και ομοιογενοποίηση τεφρών σε επιμέρους διατάξεις
- Μεταφορά εμπειρίας και παροχή τεχνολογίας από τις Ελληνικές Τσιμεντοβιομηχανίες.



### 3.5. Μειονεκτήματα Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας

Τα παρακάτω πέντε ασθενή σημεία των Ελληνικών Τεφρών είναι αυτά που, μη ελεγχόμενα, βοηθούσαν από τεχνική άποψη στην περιθωριοποίησή τους, τουλάχιστον όσον αφορά την χρήση τους σαν ξεχωριστό πρόσθετο στο σκυρόδεμα. Η χρήση τους από τις τσιμεντοβιομηχανίες στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων εξαφάνιζε αυτά τα ασθενή σημεία μέσα από τα κριτήρια συμμορφώσεως του τελικού προϊόντος των που είναι το σύνθετο τσιμέντο.

**Πίνακας 6:** Μειονεκτήματα ελληνικής ιπτάμενης τέφρας

|   |   |
|---|---|
| 1 | Μεγάλη διακύμανση στην χημική και ορυκτολογική σύσταση των τεφρών |
| 2 | Υψηλό ποσοστό SO <sub>3</sub>                                     |
| 3 | Υψηλό ποσοστό CaO   |
| 4 | Υψηλό ποσοστό CaO <sub>f</sub>                                    |
| 5 | Υψηλό ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού R <sub>45</sub>                 |

Το υψηλό ποσοστό θεικών (σαν SO<sub>3</sub>) είναι ανεπιθύμητο διότι θεωρείται δυνητική αιτία δημιουργίας διογκωτικών ενώσεων (αλάτων) μέσα στο σκυρόδεμα (π.χ. δημιουργία θειοαργλικών ενώσεων - εντρινγκίτης) άρα και αιτία δυνητικής φθοράς του ιστού του σκυροδέματος.

Το υψηλό ποσοστό ελεύθερου ασβεστίου (CaO<sub>f</sub>) μπορεί να επιφέρει με την ενυδάτωσή του πάλι προβλήματα διογκώσεων όπως επίσης επιφέρει και σημαντική έκλυση θερμότητας που είναι ανεπιθύμητη (π.χ. γρήγορη σκλήρυνση, ανάπτυξη θερμικών τάσεων στην μάζα του σκυροδέματος κ.λ.π.).

Όσο πιο υψηλό είναι το ποσοστό ασβεστίου (CaO) τόσο μεγαλύτερες ποσότητες CaO<sub>f</sub> περιέχονται και δεύτερον τόσο πιο εύκολη γίνεται η πιθανότητα δημιουργίας θειοαργλικών ενώσεων σαν τον εντρινγκίτη (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O).

Όσο πιο υψηλό ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού υπάρχει στην τέφρα τόσο οι ποζολανικές και υδραυλικές της ιδιότητες δεν ελευθερώνονται. Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι οι Ελληνικές Ιπτάμενες Τέφρες διαφοροποιούνται από τις άλλες Ιπτάμενες Τέφρες σε αρκετά χαρακτηριστικά τους.

### 3.6. Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή

Οι ιπτάμενες τέφρες διακρίνονται ανάλογα με τη σύσταση τους σε πυριτικές (με ποζολανικές ιδιότητες – low calcium fly ash) και ασβεστοπυριτικές και ασβεστούχες (πλούσιες σε ασβέστιο-high calcium fly ash ή calcareous fly ash) με ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες. Οι Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία των ασβεστοπυριτικών και πλουσίων σε ασβέστιο τεφρών.

Η καταλληλότητα των πυριτικών ιπτάμενων τεφρών για τη χρήση τους στο σκυρόδεμα προσδιορίζεται στο πλαίσιο του EN 206-1 από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 450-1. Για τις ασβεστούχες τέφρες δεν υπάρχει Ευρωπαϊκό Πρότυπο και η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους μπορεί να διασφαλισθεί μόνο βάσει της σχετικής Εθνικής Τεχνικής Προδιαγραφής που προσαρμόζεται στο EN 206-1.

Η αναγκαιότητα της σύστασης εθνικού πλαισίου κανονισμών ή διατάξεων για τη χρήση των ελληνικών ιπταμένων τεφρών σε σκυρόδεμα και προϊόντα σκυροδέματος προκύπτει από τα παρακάτω δεδομένα:

- Έχει συσσωρευτεί ερευνητική εμπειρία μισού αιώνα από τη χρήση των Ελληνικών τεφρών στο σκυρόδεμα.
- Έχει κατασκευασθεί και λειτουργεί από δεκαετίας το Φράγμα της Πλατανόβρυσης με κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC), στο οποίο η συνδετική κονία αποτελούνταν από 80% κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας και 20% τσιμέντο Ι 45.
- Έχουν γίνει αρκετές επιτυχείς πιλοτικές εφαρμογές όπως κατασκευή οδοστρωμάτων και προκατασκευασμένων προϊόντων σκυροδέματος
- Διατίθεται (από επένδυση που έγινε στη διάρκεια κατασκευής του φράγματος Πλατανόβρυσης) υποδομή (συγκρότημα άλεσης και επεξεργασίας – εργαστήρια και σύστημα ελέγχου ποιότητας) για την παραγωγή ιπτάμενων τεφρών, με χημική σύσταση εντός ορίων.
- Έχει γίνει η προαπαιτούμενη πειραματική εργασία τύπου round robin test στο πλαίσιο έργου που χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Βιομηχανίας και ανέλαβε το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης / Ινστιτούτο Τεχνολογίας\_\_ και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (ΕΚΕΤΑ/Ι.Τ.Ε.ΣΚ.).
- Έχει εκπονηθεί Μελέτη Σκοπιμότητας - Βιωσιμότητας του Εργοστασίου Επεξεργασίας Ιπτάμενης Τέφρας (Σεπτέμβριος 1998) ΑΝΚΟ, ΚΤΕΣΚ, ΙΝΤΕΛΕΚ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε.

Εδώ και τριάντα ένα χρόνια, οι ιπτάμενες τέφρες προστίθενται κατά την τελική άλεση στο τσιμέντο Portland για την παραγωγή blended type τσιμέντων. Η προσθήκη αυτή προβλεπόταν στο ΠΔ του 1980 που αναφερόταν στο τσιμέντο και βεβαίως προβλέπεται από το πρότυπο EN 197-1, το οποίο εφαρμόζεται στην χώρα από τις αρχές του 2002.

- Υπάρχει δεδηλωμένο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της τέφρας στη δόμηση από χρήστες/κατασκευαστές δομικών έργων και προϊόντων σκυροδέματος
- Υπάρχει η συγκυρία της κατασκευής μεγάλων έργων υποδομής στην Ελλάδα (έργα οδοποιίας και παράλληλα έργα) στα επόμενα χρόνια

Η χρήση ιπταμένων τεφρών στο δομικό τομέα αποφέρει οικονομία και ενισχύει την πολιτική περιβαλλοντικής μέριμνας που υπαγορεύεται από τις αρχές της αειφόρου και βιώσιμης ανάπτυξης (sustainable – development). Λόγω της μη επαρκούς εμπειρίας στον Ελληνικό χώρο σε έργα με χρήση της τέφρας με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (ασβεστούχος τέφρα) στο σκυρόδεμα, εκτιμάται ότι απαιτείται κάποιος χρόνος εξοικείωσης του τεχνικού κόσμου με την χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως δομικής κονιάς για την παραγωγή σκυροδέματος. Με το δεδομένο αυτό η Επιτροπή, η οποία ορίστηκε από σχετική απόφαση της Δ.Ε. του Τ.Ε.Ε., αποφάσισε ομόφωνα όπως, οι τύποι της τέφρας που προδιαγράφονται στο παρούσα Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή, χρησιμοποιηθούν για χρονική περίοδο (έως δέκα χρόνια) σε εφαρμογές αόπλου σκυροδέματος, καθώς επίσης σε κονιάματα και ενέματα.

Ενδεικτικά αναφέρονται εφαρμογές στις οποίες θα εύρισκαν άμεση εφαρμογή οι Ελληνικές τέφρες, εφόσον καλύπτονται από την παρούσα Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή:

- Σκυροδέματα μαζικών κατασκευών π.χ. φράγματα, τεχνητοί ογκόλιθοι λιμενικών έργων, τοίχοι βαρύτητας.
- Σκυροδέματα οδοστρωμάτων ή δαπέδων.
- Στοιχεία σκυροδέματος όπως New Jersey, τριγωνικές τάφροι ή άλλα σχετικά στοιχεία που απαιτούνται στην οδοποιία.
- Προκατασκευασμένα προϊόντα σκυροδέματος όπως κυβόλιθοι, πλάκες επίστρωσης, τσιμεντόλιθοι, άοπλοι σωλήνες, στύλοι περίφραξης, γλάστρες καθώς και άλλα παρεμφερή προϊόντα.
- Εκτοξευόμενα σκυροδέματα για την στήριξη πρανών.

- Στηρίξεις αναχωμάτων με διάφορες τεχνικές.
- Διαφραγματικοί τοίχοι ή κατασκευές πασσάλων με χρήση ενεμάτων για βελτίωση ιδιοτήτων εδάφους.
- Σταθεροποίηση εδαφών και βάσεων, υποβάσεων οδοστρωσίας

Στην Τεχνική Προδιαγραφή καθορίζονται οι απαιτήσεις ή τα όρια που θα πληρούνται από τις ασβεστούχες ελληνικές τέφρες για τη χρήση τους ως ποζολανικά πρόσθετα με υδραυλικές ιδιότητες τύπου II (κατά EN 206-1, 2000 § 3.1.23 και 5.2.5) σε σκυρόδεμα (χυτό ή προκατασκευασμένο), καθώς επίσης και σε κονιάματα (EN 998-1), σε συνεργασία με τσιμέντο CEM I, σύμφωνα με ότι ορίζει το EN 206-1.

Το ποσό προσθήκης ή αντικατάστασης του τσιμέντου καθορίζεται βάσει των μεθόδων k-value ή equivalent performance που προδιαγράφονται στο EN 206-1, § 5.2.5, για την περίπτωση δε ειδικών σκυροδεμάτων, βάσει ειδικής Τεχνικής Προδιαγραφής που να έχει συνταχθεί μετά από πειραματική μελέτη και να έχει γίνει αποδεκτή από αρμόδιο φορέα αξιολόγησης.

Σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής, εφαρμογής, συντήρησης των σκυροδεμάτων με ΙΤ ακολουθούνται οι κατά περίπτωση ισχύουσες Τεχνικές Προδιαγραφές.

Πεδίο εφαρμογής αποτελούν οι κατασκευές με φέρον σκυρόδεμα ή και προϊόντα σκυροδέματος στα οποία η αντικατάσταση του τσιμέντου αποφέρει οικονομικά και τεχνικά οφέλη. Η ταυτόχρονη προσθήκη ΙΤ και άλλων πρόσθετων υλικών στο σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland δεν αποκλείεται, αλλά δεν αποτελεί αντικείμενο του παρόντος.

### **3.7. Χρήση Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας στην Παραγωγή Σκυροδέματος**

Εδώ και μερικά χρόνια οι Ιπτάμενες Τέφρες χρησιμοποιούνται διεθνώς και σαν πρόσθετο υλικό κατ' ευθείαν στο σκυρόδεμα. Η χρήση αυτή υπονοεί: πρώτον ότι η Ιπτάμενη Τέφρα αντικαθιστά τμήμα του απαιτούμενου τσιμέντου και δεύτερον ότι το χρησιμοποιούμενο τσιμέντο είναι καθαρό τσιμέντο Portland (δεν έχει δηλαδή εμπλουτισθεί με Ιπτάμενη Τέφρα ή άλλο Ποζολανικό υλικό κατά την παραγωγή του). Η χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας σαν πρόσθετο υλικό κατ' ευθείαν στο σκυρόδεμα (η τέφρα τότε αναφέρεται και σαν τέταρτο συστατικό σκυροδέματος πλέον του τσιμέντου

του νερού και των αδρανών) καλύπτεται σήμερα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο από ανάλογους κανονισμούς.

Η χρησιμοποίηση των ιπταμένων τεφρών στην παραγωγή σκυροδέματος ξεκίνησε στα μέσα του 20ου αιώνα, τη δεκαετία 1950-1960 στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες. Παράλληλα η αξιοποίηση των ιπταμένων τεφρών υψηλού CaO ξεκίνησε στα μέσα του 1970 καταρχήν για την κατασκευή οδοστρωμάτων, πεζοδρόμων και χώρων σταθμεύσεως από σκυρόδεμα (Dakota, U.S.A.), στη συνέχεια για παραγωγή ετοιμού σκυροδέματος, αντικαθιστώντας μερικώς τα τσιμέντα (π.χ. Καταλωνία), για ενέματα (Milwaukee, U.S.A.) και για προκατασκευασμένα προϊόντα σκυροδέματος.

Παρόλη την, εδώ και πολλά χρόνια, τεκμηρίωση των τεχνολογικών και οικονομικών οφελών από την προσθήκη της τέφρας στο σκυρόδεμα, στην Ελλάδα η προσθήκη της ως τέταρτου

συστατικού του σκυροδέματος σε αντικατάσταση του τσιμέντου, έχει καθυστερήσει αρκετά και αυτό οφείλεται:

- Στην ανομοιογένεια της χημικής και ορυκτολογικής σύστασής της, η οποία είναι εγγενής της ιδιότητα λόγω του γεγονότος ότι οι τέφρες είναι παραπροϊόντα διεργασίας που στοχεύει στην παραγωγή ενέργειας αδιαφορώντας για την ποιότητα της τέφρας. Η ανομοιογένεια αυτή είναι συνάρτηση κυρίως του ορυχείου του λιγνίτη, του τρόπου απολαβής του καθώς και των συνθηκών καύσης.
- Στην ανάγκη για συμπληρωματική άλεση της τέφρας προκειμένου να εκδηλωθούν καλύτερα οι ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητές της.
- Στο υψηλό ποσοστό CaO (ελεύθερο) που περιέχει η ενυδάτωση του οποίου εκτός από προβλήματα διογκώσεων επιφέρει και σημαντικές αυξήσεις στη θερμοκρασία του σκυροδέματος
- Στο υψηλό ποσοστό SO<sub>3</sub> που εμφανίζεται κατά καιρούς και το οποίο έχει αντίστοιχη με το τσιμέντο δυσμενή επίπτωση.

### **3.8. Χρήση Ελληνικής Ιπτάμενης Τέφρας στην Οδοποιία**

Η ιπτάμενη τέφρα αν και έχει εκτεταμένη εφαρμογή στην κατασκευή οδοστρωμάτων στις χώρες του εξωτερικού και ιδιαίτερα στη Γαλλία και στην Ινδία όπου υπάρχουν προδιαγεγραμμένοι τύποι οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν

στρώσεις από σταθεροποιημένα με ιπτάμενη τέφρα υλικά και καλύπτουν διάφορες περιπτώσεις κυκλοφορίας και φέρουσας ικανότητας εδάφους στην Ελλάδα το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της ΙΤ αρχίζει να εκδηλώνεται κυρίως στα μέσα της δεκαετίας του 1970, με τις πρώτες επιστημονικές δημοσιεύσεις και δοκιμαστικές χρήσεις, και φθάνει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο έρευνας στην αρχή της δεκαετίας του 1980.

Η σταθεροποίηση των υλικών οδοποιίας με ιπτάμενη τέφρα εξαρτάται από τη χημική σύσταση και τη λεπτότητα της ιπτάμενης τέφρας και έχει στόχους όπως: να προσδώσει αντοχή (θλιπτική, εφελκυστική) σε υλικά που στη φυσική τους κατάσταση δεν είχαν τη δυνατότητα να παραλάβουν μεγάλα φορτία, αυξάνοντας έτσι τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης και να χρησιμοποιήσει "περιθωριακά" και αρχικά "ακατάλληλα υλικά" που δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια σε στρώσεις οδοποιίας, όπως ισόκοκκοι άμμοι, ιλυώδεις άμμοι κλπ.

Στα οδοστρώματα έχουμε τις παρακάτω συστάσεις:

- Την επιφανειακή στρώση, που κύριο σκοπό έχει την εξασφάλιση ομαλότητας για την κύλιση των τροχών και την ανάπτυξη επαρκών δυνάμεων με το λάστιχο. Συνήθως είναι ένα μίγμα ασφάλτου πάχους 3 έως και 5 cm.
- Τη στρώση βάσης, που έχει ως κύριο σκοπό την ανάληψη συγκεντρώσεων φορτίων των τροχών και την κατανομή τους σε μεγαλύτερες επιφάνειες στις υποκείμενες στρώσεις, και για αυτό και ονομάζεται φέρουσα στρώση. Το πάχος της μπορεί να κυμαίνεται από 10 ως και 30 cm και εξαρτάται από την ένταση της κυκλοφορίας (πυκνότητα και μέγεθος φορτίων) και τον τύπο κατασκευής, σε συνδυασμό με το είδος του στρώματος υποβάσεως.
- Τη στρώση υπόβασης που είναι αναγκαία για τη διανομή των φορτίων σε μεγαλύτερη επιφάνεια του υποκείμενου φυσικού εδάφους. Σε περίπτωση ισχυρού υπεδάφους μπορεί να παραλείπεται (πάχος 0) ενώ σε πολύ ασθενή υπεδάφη μπορεί να έχει πάχος έως και 1 m. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται ως ενισχυτικό στις δύο τελευταίες στρώσεις.

Από έρευνες που έγιναν με τη χρήση της τέφρας σαν συνδετικό υλικό για την κατασκευή οδοστρωμάτων, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ανάμιξη της τέφρας με διάφορα υλικά βελτιώνει τα φυσικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως την αντοχή σε θλίψη, την πλαστικότητα και την κοκκομετρική διαβάθμιση.
- Ο βαθμός βελτίωσης των χαρακτηριστικών εξαρτάται από τη λεπτότητα της χρησιμοποιούμενης ιπτάμενης τέφρας και της χημικής της σύστασης. Από πειραματική εφαρμογή της ιπτάμενης τέφρας σε οδόστρωμα, διαπιστώθηκε ότι είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση κατάλληλου κατασκευαστικού εξοπλισμού (όπως χρήση ελαστικοφόρου οδοστρωτήρα) και η πιστή τήρηση των κανόνων ορθής κατασκευής (καλή άλεση των υλικών).
- Θεωρείται αναγκαία η σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών για τη χρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην οδοποιία καθώς επίσης και ο σωστός προγραμματισμός έργων που να επιτρέπει την προμήθεια του απαραίτητου μηχανικού εξοπλισμού.
- Θα πρέπει να βρεθεί η έκταση της εφαρμογής της ιπτάμενης τέφρας καθώς και η οικονομική ακτίνα χρήσης της, σε συνάρτηση με αναζήτηση μεθόδων μαζικής μεταφοράς της που θα μειώνει το κόστος μεταφοράς, που είναι το βασικό μειονέκτημα των ιπτάμενων τεφρών σε σχέση με τη χρήση της στην οδοποιία.
- Πολύ συχνά το πέτρωμα του υπεδάφους ενισχύεται ύστερα από όργωμα και ανάμιξη τσιμέντου ή υδρασβέστου ή ποζολανικής κονίας και νερού, με επακολουθούσα συμπίεση με οδοστρωτήρα ή δονητικές πλάκες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται "σταθεροποίηση του εδάφους" και αποτελεί μια δυνατότητα εκτεταμένων εφαρμογών του μίγματος ιπτάμενης τέφρας-υδρασβέστου.

Γενικά κρίνεται ότι είναι δυνατή η χρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε στρώσεις οδοποιίας, με την επιφύλαξη όμως ότι θα πρέπει κάθε φορά να γίνεται ειδική μελέτη για την εύρεση της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής της που εξαρτάται από τη σύστασή της.

### **3.9. Παραγωγή και Κατανάλωση Ιπτάμενων Τεφρών στην Ελλάδα**

Όπως έγινε σαφές παραπάνω, το 2003 στην Ελλάδα καταγράφηκαν τα ποσοστά της παραγωγής και της κατανάλωσης των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών. Η

παραγωγή τους προσέγγισε τα 12 εκατομμύρια, σε αντίθεση με την κατανάλωση που πλησίασε το ένα εκατομμύριο.

*Πίνακας 7: Ιστορική εξέλιξη αξιοποίησης ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα*

|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>1962</b>        | Κ. Λιάτη «Η ιπτάμενη τέφρα και η Χρησιμοποίηση της εις τας υδραυλικάς κονιάς» Τεχνικά Χρονικά. Δεκέμβριος 1962  |
| <b>1975</b>        | ΔΕΗ «Έρευνα επί της Αξιοποίησης της Ιπτάμενης Τέφρας Ατμοηλεκτρικού σταθμού Πτολεμαΐδας» Αθήναι, 1975 υπό Α.Δ. Παπαδόπουλου, Ε. Δογάνη, Β. Ζλατάνου.  |
| <b>1975 – 1981</b> | Δημοσιεύσεις ερευνητικών αποτελεσμάτων από Α.Π.Θ., Ε.Μ.Π., Παν/μιο Πατρών   |
| <b>1981</b>        | Νέος Κανονισμός Τσιμέντων όπου συμπεριλαμβάνεται και η χρήση τέφρας στην παραγωγή blended type τσιμέντου  |
| <b>1981 – 1989</b> | -Αναγνωρίζεται η καταλληλότητα ως πρόσθετου στην παραγωγή τσιμέντου blended type σε ευρωπαϊκό επίπεδο<br>- Δραστηριοποιείται το ΤΕΕ με διοργάνωση ενημερωτικών ημερίδων<br>- Συνεχίζεται η παραγωγή ερευνητικών αποτελεσμάτων Α.Π.Θ., Ε.Μ.Π., το ΚΕΔΕ, Εργαστήρια ΔΕΗ, Δημοκρίτειο Παν/μιο, ΙΓΜΕ, Εργαστήρια Τσιμεντοβιομηχανιών. Παρουσιάζονται αποτελέσματα εφαρμοσμένης έρευνας σε διάφορους χώρους (όπως γεωτεχνικά έργα) |
| <b>1989</b>        | - Λαμβάνεται απόφαση κατασκευής Φράγματος Πλατανόβρυσης. Ξεκινά η μελέτη σχεδιασμού μίγματος RCC από Α.Π.Θ.   |
| <b>1995 – 1997</b> | - Κατασκευή Φράγματος Πλατανόβρυσης. Τεχνικές προδιαγραφές για τη χρήση υλικού<br>- Υπουργείο Ανάπτυξης. Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας ΚΤΕΣΚ. Έργο Επιτροπής Σύνταξης Κανονισμών για Χρήση ΙΤ στο Σκυρόδεμα.  |
| <b>1998</b>        | ΚΤΕΣΚ, ΑΝ.ΚΟ. ΑΕ.: Μελέτη Σκοπιμότητας. Βιωσιμότητας Εργοστασίου Επεξεργασμένης Ιπτάμενης Τέφρας.   |



|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>1998 – 2001</b> | Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας :<br>ΕΠΕΤ: Πιλοτικές Εφαρμογές κατεργασμένης Ιπτ. Τέφρας:<br>Κατασκευή άκαμπτου οδοστρώματος και υπόβασης<br>Κατασκευή New Jersey, Τριγωνικοί τάφροι<br>Σταθεροποίηση υποστρώματος αμμώδους εδάφους.<br>Παραγωγή Σωλήνων μεγάλης διανομής (Α.Π.Θ., ΑΕΓΕΚ, ΔΕΗ) |
| <b>2002 – 2005</b> | ΤΕΕ Δυτικής Μακεδονίας «Πρόταση Σχεδίου Εθνικών Προδιαγραφών για τη Χρήση Ιπτάμενης Τέφρας Υψηλής Περιεκτικότητας σε Ασβέστιο στο Σκυρόδεμα»   |

## 4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Η ενότητα αυτή δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην παραγωγή και την κατανάλωση των ιπτάμενων τεφρών, σε ελληνικό και γενικότερα ευρωπαϊκό επίπεδο.

### 4.1. Παραγωγή και Κατανάλωση Ιπτάμενων Τεφρών στην Ευρώπη

Πιο συγκεκριμένα, το έτος 2001 στην Ευρώπη πραγματοποιήθηκε παραγωγή ιπτάμενων τεφρών 37,144 εκατομμύρια, ενώ η κατανάλωση τους πλησίασε τα 18,2 εκατομμύρια. Απεναντίας, με καταγραφή που πραγματοποιήθηκε το 2003 στην Ελλάδα, η παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας – σύμφωνα με τα στοιχεία του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού ΔΕΗ – έφτασαν τα 12 εκατομμύρια, ενώ η κατανάλωσή της το ένα εκατομμύριο από την τσιμεντοβιομηχανία. Συνεπώς, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η Ευρώπη εκμεταλλεύτηκε το 50% των ιπτάμενων τεφρών, ενώ η Ελλάδα μόνο το 8%.

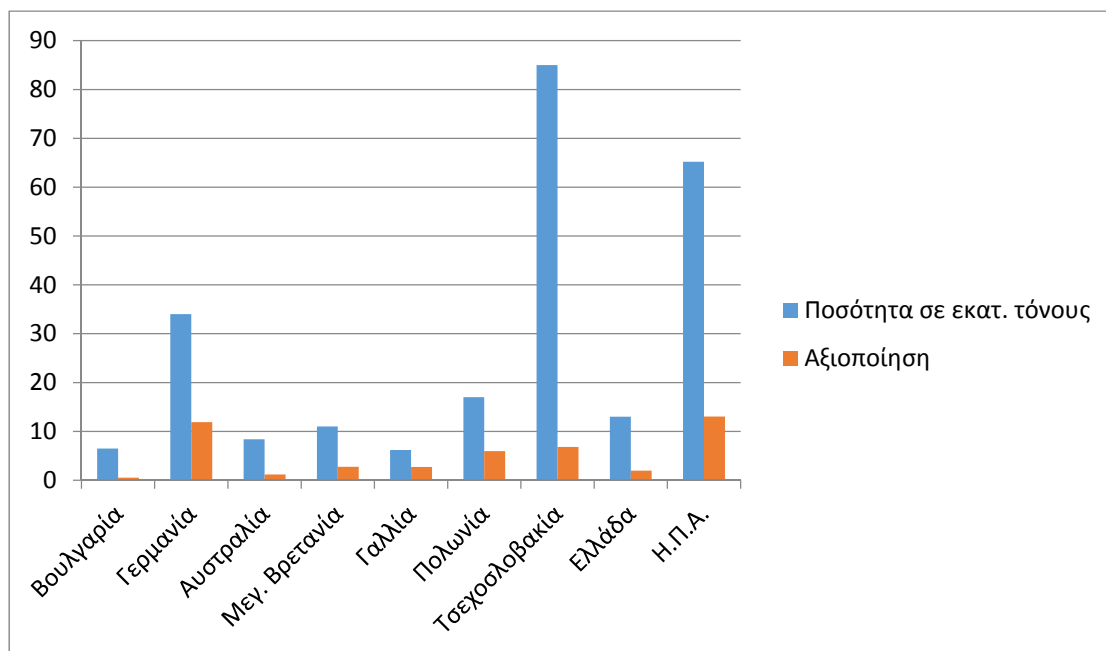
Πίνακας 8: Χρονολόγιο: Αξιοποίηση Ιπταμένων Τεφρών στο Διεθνή χώρο

|  |  |
|--|--|
| 1940's   | Πρώτες εφαρμογές Fly Ash σε δομικά έργα.<br>Εμπορική εκμετάλλευση ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ |
| ASTM C 350-54T (1953-55)   | Προδιαγραφές Fly Ash ως αδρανές  |
| Revised C 350-54T (1960)   | Προδιαγραφές Fly Ash ως pozzolan   |
| ASTM C 618 (1968)  | Προδιαγραφές Fly Ash as mineral admixture  |
| ASTM C 311 (1968)  | Μέθοδοι ελέγχου καταλληλότητας τέφρας.   |
| Revised ASTM C-618 (1977)  | Συμπεριλαμβάνονται οι Class C Fly Ashes  |
| AASHTO M295 (American Assoc. for State Highway & Transportation Officials) | Προδιαγραφές χρήσης Fly Ash στην κατασκευή οδοστρωμάτων                          |
| CAN/CSA A235-M86   | Κανονισμός που καλύπτει χρήση Fly Ash στο σκυρόδεμα                              |

|  |  |
|--|--|
| Έκτοτε   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Γίνονται συνεχείς αναθεωρήσεις που αποσκοπούν στην με ασφάλεια διεύρυνση της χρήσης Fly Ash στο σκυρόδεμα.</li> <li>- Θεσπίζονται κανονιστικές διατάξεις για επιμέρους χρήσης Fly Ash (Grouting, Σταθεροποιήσεις εδαφών)</li> </ul> |
| Δημιουργούνται κέντρα προώθησης έρευνας και εφαρμογών                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ACAA American Coal Ash Association</li> <li>- EPRI Electric Power research institute</li> <li>- CANMET Canada Centre for Mineral and Energy Technology</li> </ul>   |
| 1980's   | Αναπτύσσεται και εφαρμόζεται το σκυρόδεμα υψηλής περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα.  |
| BS 3892 (1982)   | <p>Part 1: part of cement</p> <p>Part: 2A, As pozzolan</p> <p>2B, As pozzolana/fine aggregates</p>   |
| 1991   | UNE 83420 Concrete Additions, Fly Ashes specification for Fly Ashes with CaO content in excess of 10%  |
| 90's – 2002  | <p>EN 450 Ενοποιημένη Προδιαγραφή που αφορά τη χρήση ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ (low calcium) στο σκυρόδεμα.</p> <p>Manual of Practice Concrete: Part1 Specification, Production, Performance and Conformity</p>   |
| Δημιουργείται Ευρωπαϊκή μη κερδοσκοπική εταιρεία για την προώθηση παραπροϊόντων. | ECOBA European Association for Use of By-Products of Coal-Fired Power Stations.  |

Πίνακας 9: Ποσά παραγόμενης τέφρας και περιοχές αξιοποίησής της σε διάφορες χώρες (σε 10<sup>6</sup> t)

| Χώρα          | Έτος | Ποσότητα σε εκατ. τόνους | Αξιοποίηση (%) |
|---------------|------|--------------------------|----------------|
| Βουλγαρία     | 1998 | 6,5                      | 8              |
| Γερμανία      | 1999 | 34,0                     | 35             |
| Αυστραλία     | 2000 | 8,4                      | 14             |
| Μεγ. Βρετανία | 2000 | 11,0                     | 25             |
| Γαλλία        | 1998 | 6,2                      | 44,5           |
| Πολωνία       | 1997 | 17,0                     | 35             |
| Τσεχοσλοβακία | 1998 | 85,0                     | 8              |
| Ελλάδα        | 2001 | 13,0                     | 15             |
| Η.Π.Α.        | 1999 | 65,2                     | 20             |



Διάγραμμα 1: Παραγωγή και αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας ανά χώρα.

#### 4.2. 4.2 Οικονομικά Οφέλη από την Χρήση Ιπτάμενης Τέφρας

Όλες οι χώρες που χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες) έχουν καταβληθεί έντονες προσπάθειες για την αξιοποίηση της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας. Αυτό οφείλεται αφενός μεν στην αύξηση του κόστους απόρριψης και στην

έλλειψη κατάλληλων επιφανειών απόθεσης, αφετέρου δε στο οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την χρησιμοποίησή της. Παρά τις προσπάθειες αυτές όμως και παρά την συνεχώς αυξανόμενη πίεση το πρόβλημα της συνολικής απορρόφησης της ιπτάμενη τέφρα, δεν έχει λυθεί.

Σε αντίθεση με την ιπτάμενη τέφρα, τα παραπροϊόντα θερμικών διεργασιών που παράγονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όπως π.χ. σκωρίες υψικαμίνων το πρόβλημα θεωρείται λυμένο και αυτό οφείλεται στον υψηλό δείκτη ομοιομορφίας αυτών των υλικών. (πλήρης τήξη του υλικού, σταθερή χημική σύνθεση, υαλώδης υφή). Έτσι λοιπόν, το ποσοστό της αξιοποιούμενης ιπτάμενης τέφρας δεν ξεπερνά το 20% της παγκοσμίως παραγόμενης.

Αναφορικά με τις τεχνολογικές εφαρμογές της αξιοποιούμενης σήμερα ιπτάμενης τέφρας, το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροφάται στον κατασκευαστικό τομέα και ιδιαίτερα όπως αναγράφεται και στον ακόλουθο πίνακα στις εξής περιοχές :

- Προσθήκη στο μπετόν ως αδρανές.
- Στις τσιμεντοβιομηχανίες, ως πρόσθετο υλικό του τσιμέντου,
- Στην οδοποιία, ως υλικό επίστρωσης

Εκτός από τις προαναφερθείσες, υπάρχει και ένα πλήθος άλλων εφαρμογών όπου η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται ή θα μπορούσε με επιτυχία να χρησιμοποιηθεί. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Στην σταθεροποίηση και στεγανοποίηση εδαφών
- Ως υλικό πλήρωσης κενών σε διάφορα έργα
- Ως υδραυλικό συνδετικό υλικό σε μίγμα με CaO
- Στην κατασκευή ελαφροβαρών τσιμεντολίθων και αδρανών
- Στο αερομπετόν και ασφαλτομπετόν
- Στην κεραμική και πλινθοποιία
- Στην γεωργία και εξουδετέρωση όξινων εδαφών
- Στην εξυγίανση βιομηχανικών αποβλήτων
- Στην ανάκτηση ιχνοστοιχείων
- Στη χημεία για προσροφητικές και καταλυτικές δράσεις
- Στη βιομηχανία πλαστικών (υλικό πλήρωσης PVC, πολυστυρολίου και αφρωδών υλικών)

- Στη βιομηχανία χρωμάτων
- Στην κατασκευή κυλινδρούμενου σκυροδέματος
- Στην απορρύπανση
- Στον εμπλουτισμό εδαφών σε ιχνοστοιχεία

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, φαίνεται ότι έχει διαπιστωθεί μεγάλο εύρος τεχνικών δυνατοτήτων αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας, και έτσι σήμερα οι ερευνητικές προσπάθειες στρέφονται περισσότερο προς την αξιοποίηση των ήδη γνωστών και λιγότερο στην εξεύρεση νέων εφαρμογών.

Στην Ελλάδα η ετήσια παραγωγή ιπτάμενης τέφρας υπολογίζεται (2001) σε 13 εκατ. τόνους και σε σύγκριση με την μέση παραγωγή της δεκαετίας του 80 ( περ. 5-6 εκατ. τόνους ) και του 90 (περ. 7-10 εκατ. τόνους), παρουσιάζει μεγάλη αύξηση.

Οι προσπάθειες για την αξιοποίηση των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών και των δύο πεδίων ξεκίνησαν την δεκαετία του '70 . Οι ερευνητικές προσπάθειες από τότε μέχρι σήμερα σε μεγάλο βαθμό αφορούν την αξιοποίηση των ιπτάμενων τεφρών των ενεργειακών σταθμών της Δυτικής Μακεδονίας η ποσότητα των οποίων ανήλθε σε  $9.5 \times 10^6$  τόνους ετησίως (2001).

Οι προτάσεις για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας αφορούν στη χρησιμοποίησή της σαν υδραυλικό υλικό σε πρόσμιξη με κλίνκερ τσιμέντου εφ' όσον έχει λόγο  $\text{CaO/SiO}_2 \geq 1$  και συνεπώς παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες . Επίσης χρησιμοποιήθηκε (1995-1997) σαν κυλινδρούμενο σκυρόδεμα στην κατασκευή από τη Δ.Ε.Η. του φράγματος της Πλατανόβρυσης (Δράμα).

Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν ανακοινωθεί προτάσεις χωρίς να έχουν ακόμη εφαρμοστεί και οι οποίες αφορούν στην αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας ως:

- Υλικό εμποτισμού εδαφών
- Υλικό οδοστρωσίας
- Υλικό εξυγίανσης υδατικών βιομηχανικών αποβλήτων.

Χαρακτηριστικό του ενδιαφέροντος που υπάρχει και της βαρύτητας που δίδεται στην αξιοποίηση της ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας είναι ότι στην τελευταία (1997) διημερίδα για την χρήση της ιπτάμενης τέφρας οι είκοσι μία (21) ανακοινώσεις ήταν μελέτες – έρευνες- προτάσεις που αφορούσαν στην χρήση της ιπτάμενης τέφρας

Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου και, Δύο (2) ανακοινώσεις αναφέρονταν στην αξιοποίηση τεφρών άλλων χωρών.

Για την αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης δεν υπήρξε καμία ανακοίνωση.

#### **4.3. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από την Απουσία Μέτρων**

Η Ιπτάμενη Τέφρα αποτελεί τον μεγαλύτερο ρυπαντή από όσους προέρχονται από άμεσες ανθρωπογενείς πηγές, τουλάχιστον σε ότι αφορά στο ποσό της εκπεμπόμενης στο περιβάλλον μάζας σωματιδίων. Η ποσοστιαία συμμετοχή της, στην εκπομπή σωματιδίων από πηγές του είδους αυτού, ανέρχεται στο 39%. Μόνο στις ΗΠΑ, εκπέμπονται  $2,5 \times 10^6$  τόνοι/έτος Ιπτάμενης τέφρας στην ατμόσφαιρα, παρ' όλο ότι η υπάρχουσα νομοθεσία και ο έλεγχος για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι εξαιρετικά αυστηροί.

Στο σύνολο της εκπεμπόμενης μάζας από (άμεσες ή έμμεσες) ανθρωπογενείς πηγές η ιπτάμενη τέφρα, είναι δεύτερη με ποσοστό συμμετοχής 12% έναντι 50% της πρώτης πηγής που είναι τα θειικά άλατα, τα οποία προέρχονται από SO<sub>2</sub>. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η συνολικά εκπεμπόμενη μάζα ενός ατμοσφαιρικού ρυπαντή δεν είναι το μόνο βασικό κριτήριο για την εκτίμηση της επικινδυνότητας αυτού σε αντίθετη περίπτωση, ο πιο επικίνδυνος ρυπαντής θα ήταν το αλάτι της θάλασσας ή η σκόνη του εδάφους.

Περισσότερο χαρακτηριστικά μεγέθη είναι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του και το σχήμα αυτών (που σχετίζονται ιδιαίτερα με τη δυνατότητα μακροχρόνιου τοπικού πνευμονικού ερεθισμού), η περιεκτικότητα των κόκκων σε στοιχεία ή ενώσεις που χαρακτηρίζονται από ορισμένο βαθμό τοξικότητας και η δυνατότητα έκλυσης των συστατικών αυτών από τα ρευστά των έμβιων όντων και ιδιαίτερα του ανθρώπου.

## 5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποια τα μεγάλα, αλλά και σημαντικά έργα με χρήση μεγάλου ποσοστού ιπτάμενης τέφρας, είτε αυτά είναι στην Ελλάδα είτε στο εξωτερικό.

### 5.1. Το φράγμα της Πλατανόβρυσης, Ελλάδα

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης βρίσκεται επί του ποταμού Νέστου, στο Νομό Δράμας και σε απόσταση 400 χιλιομέτρων περίπου από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Είναι από τα υψηλότερα φράγματα της Ευρώπης (95 m), που είναι κατασκευασμένα με κυλινδρούμενο τεφροσκυρόδεμα και με τόσο υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα (500 kg τσιμέντο και 225 kg ιπτάμενη τέφρα για κάθε  $m^3$ ). Ο συνολικός κύριος όγκος του, μαζί με τον τοίχο αντιστήριξης, είναι  $450.000 m^3$ , ο δε όγκος των στοιχείων όψεως - στην κατασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν  $175 kg/m^3$  ιπτάμενης τέφρας - είναι  $11.330 m^3$ .



*Εικόνα 10: Το φράγμα της Πλατανόβρυσης στον δήμο Δράμας*

Η κατασκευή του ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 1995 και περατώθηκε τον Μάρτιο του 1997. Διάρκεσε δηλαδή περίπου 18 μήνες (συμπεριλαμβανομένων και των διακοπών διάρκειας τεσσάρων μηνών, κυρίως λόγω του θέρους που μεσολάβησε), χρονικό διάστημα που θεωρείται εξαιρετικά σύντομο για την κατασκευή έργων του



μεγέθους και της φύσης αυτής. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν περίπου 110.000 τόνοι κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας, η οποία μεταφέρθηκε από τη μονάδα επεξεργασίας της τέφρας στην Πτολεμαΐδα με ειδικά σιλοφόρα αυτοκίνητα (μέση ημερήσια παραγωγή της μονάδας, περίπου 260 τόνοι).

Το υδροηλεκτρικό έργο της Πλατανόβρυσης αποτελεί το ενδιάμεσο από τα τρία τμήματα του συστήματος των έργων της ΔΕΗ στον ποταμό Νέστο (ΥΗΕ Θησαυρού - Πλατανόβρυσης - Τεμένους).

## 5.2. Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία

Για την κατασκευή του φράγματος Beni Haroun στον ποταμό El Kabir, του πρώτου φράγματος που κατασκευάστηκε στην Αλγερία με τη μέθοδο κυλινδρούμενου σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκε Ιπτάμενη Τέφρα σε ποσοστό 63%. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν  $82 \text{ kg/m}^3$  τσιμέντο Τύπου ΙΙ και  $143 \text{ kg/m}^3$  Ιπτάμενη Τέφρα Τύπου F (πυριτική τέφρα). Κατασκευάστηκε κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς, και η αποπεράτωσή του έγινε το 2000. Έχει ύψος 118 m, ενώ το μήκος του και η χωρητικότητά του ανέρχονται σε 714 m και 963 εκατ.  $\text{m}^3$  αντίστοιχα.



Εικόνα 11: Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία

### 5.3. Αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, Australia

Στα βόρεια της Νέας Νότιας Ουαλίας στην Αυστραλία κατασκευάστηκε ο νέος αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, ο οποίος αποτελείται από 4 λωρίδες δρόμων και 54 γέφυρες, και κατασκευάστηκε κυρίως για την εξοικονόμηση χρόνου μετακίνησης και την βελτίωση της ασφάλειας των μεταφορών.

Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε Ιπτάμενη Τέφρα σε ποσοστό περίπου 30%, και συγκεκριμένα, για την κατασκευή των 28.5 km, απαιτήθηκαν 230,000 κυβικά μέτρα σκυροδέματος, στο οποίο ενσωματώθηκαν 54,000 τόνοι τσιμέντου και 22,000 τόνοι Ιπτάμενης Τέφρας. Η συνεχής και γρήγορη μεταφορά τσιμέντου και Ιπτάμενης Τέφρας επιτεύχθηκε με οδικά και σιδηροδρομικά μέσα.



Εικόνα 12: Αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, Australia

### 5.4. Φράγμα Νέας Βικτωρίας, Αυστραλία

Στην Δυτική Αυστραλία ολοκληρώθηκε το 1991 το φράγμα New Victoria, το οποίο κατασκευάστηκε με την μέθοδο κυλινδρούμενου σκυροδέματος

ενσωματώνοντας 66% Ιπτάμενη Τέφρα. Ειδικότερα, για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε  $79 \text{ kg/m}^3$  τσιμέντο Τύπου I, και  $160 \text{ kg/m}^3$  Ιπτάμενη Τέφρα Τύπου F (πυριτική τέφρα). Το φράγμα που έχει ύψος 52 m, 285 m μήκος και χωρητικότητας 10 εκατ.  $\text{m}^3$ . Η κατασκευή του έγινε με στόχο την υδρονομή της περιοχής.



Εικόνα 13: Φράγμα Νέας Βικτωρίας, Αυστραλία

### 5.5. Φράγμα Salto Caxias, Βραζιλία

Για την κατασκευή φράγματος του Salto Caxias στον Iguacu ποταμό της Βραζιλίας χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με περιεκτικότητα 20% σε Ιπτάμενη Τέφρα. Οι αναλογίες του μείγματος ήταν  $80 \text{ kg/m}^3$  τσιμέντο Τύπου II και  $20 \text{ kg/m}^3$  Ιπτάμενη Τέφρα Τύπου F (πυριτική τέφρα), μειώνοντας έτσι το κόστος της κατασκευής κατά 25% σε σύγκριση με ένα γαιόφραγμα. Συμβατικό σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη της μιας όψης του φράγματος ώστε να παρέχει ένα αδιαπέραστο στεγανωτικό παρέμβυσμα.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα σε στρώσεις μεταξύ στρώσεων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα υπό τη μορφή σκαλοπατιών για την κατασκευή της άλλης όψης του φράγματος. Το φράγμα είναι το όγδοο μεγαλύτερο στον κόσμο, με μήκος 1083 m, ύψος 67 m και χωρητικότητα  $3600 \times 106 \text{ m}^3$  είναι. Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε το 1998.





*Εικόνα 14: Φράγμα Salto Caxias, Βραζιλία*

### 5.6. Σιλό, Βέλγιο

Στον σταθμό παραγωγής ενέργειας Genk-Langerlo στο Βέλγιο, κατασκευάστηκαν 5 σιλό αποθήκευσης Ιπτάμενης Τέφρας χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα που περιείχε Ιπτάμενη Τέφρα. Κάθε σιλό έχει ύψος 43.6 m, διάμετρο 13 m και 0.45 m πάχος τοιχίου. Για την κατασκευή του σκυροδέματος εφαρμόστηκε η μέθοδος "gliding mold", όπου ενσωματώθηκαν 80kg/m<sup>3</sup> Ιπτάμενης Τέφρας. Η συνολική ποσότητα Ιπτάμενης Τέφρας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των τοιχίων, συμπεριλαμβανόμενου των άνω και κάτω ορόφων ήταν περίπου 1500 m<sup>3</sup> ανά σιλό. Η προσθήκη 120



*Εικόνα 15: Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία*

τόνων Ιπτάμενης Τέφρας συντέλεσε στη δημιουργία μιας ομαλής και λείας επιφάνειας στο σκυρόδεμα και η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε και σε αρκετούς άλλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

### 5.7. Φράγμα Puylaurent στη Lozère, Γαλλία

Το φράγμα Puylaurent στη Lozère της Γαλλίας κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα ειδικό μείγμα σκυροδέματος αποτελούμενο από 60% τσιμέντο και 40% Ιπτάμενη Τέφρα, προερχόμενη από έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό της Γαλλίας (συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 10000 τόνοι ιπτάμενης τέφρας). Το περιεχόμενο τσιμέντο καθορίστηκε στα 250kg/m<sup>3</sup>. Είναι ένα από τα μεγαλύτερα κοίλα φράγματα που χτίστηκαν την δεκαετία του '90 στην Γαλλία (ολοκλήρωση κατασκευής το 1995). Το μέγιστο ύψος του φράγματος ανέρχεται στα 73 m και το μήκος του στα 220 m.



Εικόνα 16: Φράγμα Puylaurent στη Lozère, Γαλλία

### 5.8. Ανατολική Γέφυρα, Δανία

Για την σύνδεση της Κοπεγχάγης με την κυρίως χώρα της Δανίας και την Κεντρική Ευρώπη, έγινε το οδικό έργο "Great Belt" που συνδέει το νησί Zealand με το νησί Funen. Μέρος του έργου, αποτελεί και η ανατολική γέφυρα (East Bridge), συνολικού μήκους 6790μ. Πρόκειται για κρεμαστή γέφυρα, και είναι μια από τις γέφυρες με το μεγαλύτερο άνοιγμα από πυλώνα σε πυλώνα, μήκους 1624m. Οι πυλώνες στους οποίους αναρτήθηκε το άνοιγμα έχουν ύψος 254m και



κατασκευάστηκαν με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, το οποίο περιείχε τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα ( $47\text{kg/m}^3$ ) και *microsilica* ως υλικά του σκυροδέματος. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του έργου είναι η ο χαμηλός λόγος νερού – τσιμέντου. Το έργο σχεδιάστηκε για να έχει διάρκεια ζωής 100 χρόνια. Το 1997 έγιναν τα εγκαίνια, ενώ το 1998 δόθηκε στην κυκλοφορία.



*Εικόνα 17: Ανατολική Γέφυρα, Δανία*

### **5.9. Πύργος Ψύξης Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας, Γερμανία**

Στο Niedraubem της Γερμανίας κατασκευάστηκε πύργος ψύξης για τις ανάγκες του νέου ενεργειακού σταθμού χρησιμοποιώντας υψηλής αντοχής σκυρόδεμα με μεγάλη αντίσταση σε οξεία που περιείχε και ποσότητα Ιπτάμενης Τέφρας. Για το σύνολο της κατασκευής του χρειάστηκαν  $32.000 \text{ m}^3$



*Εικόνα 18: Πύργος ψύξης σταθμού παραγωγής ενέργειας, Γερμανία*

σκυροδέματος, εκ των οποίων  $17650 \text{ m}^3$  ήταν υψηλής αντοχής σκυρόδεμα. Πιο αναλυτικά, για την παραγωγή  $1 \text{ m}^3$  σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν περίπου  $230 \text{ kg}$  τσιμέντου Πόρτλαντ,  $65 \text{ kg}$  Ιπτάμενης Τέφρας,  $33 \text{ kg}$  silica fume,  $3200 \text{ kg}$  αδρανών έως  $16 \text{ mm}$  διαμέτρου και  $120$  λίτρα νερού. Ο πύργος έχει συνολικό ύψος  $200 \text{ m}$ , άνω διάμετρο  $86 \text{ m}$  και κάτω διάμετρο  $136 \text{ m}$  και είναι ένας από τους μεγαλύτερους πύργους ψύξης παγκοσμίως.

#### 5.10. Οι πύργοι «Κάστωρ και Πολυδεύκης», Γερμανία

Τυπικό παράδειγμα στην Γερμανία εφαρμογής χρήσης Ιπτάμενης Τέφρας αποτελούν οι δίδυμοι πύργοι Castor & Pollux (Κάστωρ & Πολυδεύκης). Ο ψηλότερος πύργος (Pollux) έχει ύψος  $130 \text{ m}$ , και χτίσθηκαν πάνω σε κοινή βάση θεμελίωσης που περιέχει  $180 \text{ kg}$  τσιμέντου και  $120 \text{ kg}$  Ιπτάμενης Τέφρας/ $\text{m}^3$ . Το επάνω μέρος της βάσης θεμελίωσης σχεδιάστηκε για να έχει μεγάλη αντίσταση σε τριβή και περιέχει  $280 \text{ kg}$  τσιμέντου Portland και  $70 \text{ kg}$  I.T./ $\text{m}^3$ . Οι εσωτερικοί τοίχοι των κτιρίων περιέχουν  $400 \text{ kg}$  τσιμέντου υψηλής αντοχής (B65) και  $100 \text{ kg}$  I.T./ $\text{m}^3$ , ενώ οι κολώνες κατασκευάστηκαν με την χρήση υψηλής αντοχής τσιμέντου B115 και ποσότητας  $470 \text{ kg}$ ,  $120 \text{ kg}$  I.T. και  $35 \text{ kg}$  μικροσιλικά ανά  $\text{m}^3$ . Η αντοχή των κολώνων ξεπερνά τα  $130 \text{ N/mm}^2$  στις 90 μέρες.



Εικόνα 19: Οι πύργοι «Κάστωρ και Πολυδεύκης», Γερμανία

### 5.11. Ο πύργος Πικάσο, Ισπανία

Ιπτάμενη Τέφρα χρησιμοποιήθηκε και για την κατασκευή του πύργου του Πικάσο στην Μαδρίτη. Ο πύργος αυτός έχει ύψος 171 m, είναι ο υψηλότερος πύργος στην Μαδρίτη και ένας από τους υψηλότερους σε όλη την Ισπανία. Κατασκευάστηκε με σκυρόδεμα το οποίο περιέχει διάφορα είδη προσμίκτων, τσιμέντου, και Ιπτάμενης Τέφρας. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 11.000 m<sup>3</sup> σκυροδέματος.

Η συγκέντρωση των προσμίκτων στο σκυρόδεμα διαφέρει ανάλογα με το ύψος στο οποίο χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν πριν την κατασκευή του πύργου, έδειξαν ότι οι κυριότεροι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να εξασφαλίσουν ικανοποιητική άντληση του σκυροδέματος και να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή, είναι η ποσότητα της περιεχόμενης ιπτάμενη τέφρας, τα ειδικά πρόσθετα και ο ρυθμός ενυδάτωσης των ελαφρών αδρανών.



Εικόνα 20: Ο πύργος Πικάσο, Ισπανία

### 5.12. Φράγμα Klong Tha Dan, Ταϊλάνδη

Το φράγμα Klong Tha Dan στον Nakon Nayok ποταμό της Ταϊλάνδης είναι το μεγαλύτερο παγκοσμίως φράγμα σε όγκο. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν 5 εκατ. m<sup>3</sup> κυλινδρούμενου σκυροδέματος που περιείχε 52% Ιπτάμενη Τέφρα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν 90 kg/m<sup>3</sup> τσιμέντο και 100 kg/m<sup>3</sup> Ιπτάμενη Τέφρα Τύπου F (πυριτική τέφρα).

Το έργο αποτελείται από 2 RCC φράγματα, ύψους 93 m και μήκους 2720 m, και η συνολική του χωρητικότητα ανέρχεται στα 224 εκατ. m<sup>3</sup>. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2004, έχοντας σαν συνολικό κόστος 143 εκατ. Δολάρια.





*Εικόνα 21: Φράγμα Klong Tha Dan, Ταϊλάνδη*

### **5.13. Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, ΗΠΑ**

Το νοσοκομείο Boulder Community Foothills στο Κολοράντο, είναι το πρώτο νοσοκομείο στις Η.Π.Α στο οποίο απονεμήθηκε πιστοποίηση LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) για τις περιβαλλοντικές καινοτομίες που διαθέτει.



*Εικόνα 22: Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, ΗΠΑ*

Κατά την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε Ιπτάμενη τέφρα στο σκυρόδεμα με σκοπό την αντοχή μεγάλης διάρκειας και την βελτίωση της αποδοτικότητας του κτιρίου. Συγκεκριμένα, στο σκυρόδεμα προστέθηκε Ιπτάμενη τέφρα, το ποσοστό της οποίας κυμαινόταν μεταξύ 0%-25%, που εκτός των άλλων, βοήθησε και στην έγκαιρη αποπεράτωση των εργασιών που προέβλεπε ο χρονικός προγραμματισμός του έργου. Το 60 κλινών νοσοκομείο με εμβαδόν ~18580 m<sup>2</sup> και 14.02 m ύψους ολοκληρώθηκε το 2003 με κόστος 53 εκατ. Δολαρίων.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη επικεντρώθηκε στο ζήτημα της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας τόσο στην Ελλαδικό χώρο όσο και στον υπόλοιπο κόσμο.

Ιστορικά μπορούμε να πούμε πως η αξιοποίηση των παραπροϊόντων καύσης από κάρβουνο ξεκίνησε από την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας, λόγω των περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργήθηκαν από την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων που παράγονται ετησίως κατά την καύση των στερεών καυσίμων. Έτσι, η επιστημονική κοινότητα σε παγκόσμιο επίπεδο προέβη στην αναζήτηση διαφόρων χρήσεων, έτσι ώστε να αξιοποιείται η μεγαλύτερη δυνατόν παραγόμενη ποσότητα.

Από την δεκαετία του 1930 η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιήθηκε στην Αμερική ως ορυκτό στα ασφαλικά μίγματα. Από τότε έως σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως σε διάφορες εφαρμογές, ενώ έχουν θεσπιστεί κανονισμοί σε πολλές χώρες για την χρήση της.

Στόχος της εργασίας αποτέλεσε η ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών της ιπτάμενης τέφρας (ιδιαιτερότητες, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα) και η καταγραφή παραδειγμάτων των χρήσεων της.

Από την έως τώρα ανάλυση προέκυψαν συμπεράσματα τα οποία καταστούν αναγκαία την ολοκληρωμένη αξιοποίηση των τεχνητών και ανακυκλωμένων αδρανών υλικών, εκτός της εξοικονόμησης πόρων, θα μπορούσε να επιτρέψει και μια καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων ανάλογα με τις διαφορετικές χρήσεις.

Η μέθοδος της ανάκτησης αποβλήτων που λαμβάνει χώρα επί τόπου παρουσιάζει ένα πλεονέκτημα που προέρχεται από τον μηδενισμό του κόστους μεταφοράς, τόσο για τα απόβλητα όσο και για τα αδρανή υλικά. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να διασφαλίσουμε την ποιότητα και το σήμα CE του προϊόντος, με ενδεχόμενη αύξηση του κόστους κατεδάφισης και της επιτόπιας διαχείρισης των αποβλήτων.

Για να βελτιωθεί η αγορά των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών, η τιμή τους θα πρέπει να διατηρηθεί τουλάχιστον 20% χαμηλότερα σε σύγκριση με την τιμή των φυσικών αδρανών προκειμένου να ξεπεραστεί η προκατάληψη της αγοράς, η οποία, επί του παρόντος, θεωρεί υποδεέστερα τα αδρανή που παράγονται από απόβλητα. Αυτή η διαφορά της τιμής δεν οφείλεται σε χαμηλότερη ποιότητα των ανακυκλωμένων

αδρανών υλικών, αλλά στη νοοτροπία της αγοράς, η οποία έχει την τάση να υποβαθμίζει τα αδρανή υλικά που προέρχονται από τα απόβλητα.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η υψηλή ζήτηση αδρανών υλικών για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλότερης ποιότητας υλικά. Υπολογίζεται ότι περίπου το 40% της συνολικής ζήτησης για αδρανή υλικά στην Ευρώπη αφορά τέτοιου είδους εφαρμογές. Αυτό αφορά ιδιαίτερα τις διάφορες εφαρμογές στην κατασκευή και τη συντήρηση των υποδομών. (Νικολουτσόπουλος Ν., 2013)

Η προκατάληψη της αγοράς στη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών, λόγω της προέλευσής τους, είναι ένα από τα κύρια εμπόδια για την ανάπτυξη της βιομηχανίας ανακύκλωσης των αποβλήτων από κατασκευές και κατεδαφίσεις. Προκειμένου να εξαιρεθούν όλες οι προκαταλήψεις των χρηστών, είναι απαραίτητο να καθοριστούν το συντομότερο δυνατόν τα κριτήρια, σύμφωνα με την Οδηγία 2008/98/EK, για τον προσδιορισμό του σημείου κατά το οποίο τα απόβλητα παύουν να θεωρούνται απόβλητα και μετατρέπονται σε υλικά (αποχαρακτηρισμός αποβλήτων).

Στα ως άνω δεν θα πρέπει να παραβλεφθεί πως η χρήση των εναλλακτικών, φιλικών προς το περιβάλλον, υλικών ως αντικατάσταση των φυσικών αδρανών στην κατασκευή οδικών έργων, θα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς στόχους όπως οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των νέων υλικών να είναι συμβατές με το περιβάλλον, να μην εμφανίζονται προβλήματα τοξικότητας ή υψηλής διαλυτότητας στο νερό, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών να είναι συμβατές με τις ιδιότητες των αδρανών

Επιπρόσθετα θα πρέπει να συνυπολογιστεί πως η ποσότητα των υλικών να είναι επαρκής και ο ρυθμός παραγωγής των σταθερός. Ένας ρυθμός παραγωγής του παραπροϊόντος τουλάχιστον της τάξεως του 50.000 τόνου/έτος εξασφαλίζει μία ποσότητα για ευρείας κλίμακας τεχνική εφαρμογή.

Η παρούσα βιβλιογραφική εργασία αποτέλεσε μια προσπάθεια συγκέντρωσης πληροφοριών, στατιστικών αναλύσεων και αποτελέσματα προγενέστερων ερευνητικών μελετών σχετικά με το ζήτημα της αξιοποίησης των τεχνητών αδρανών υλικών.

Ο ρυθμός έρευνας της IT ακολουθεί διεθνώς μία εκθετική ανάπτυξη που γίνεται εκρηκτική στο τέλος της δεκαετίας του 1970 και την αρχή της δεκαετίας του 1980. Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατόν να ερμηνευθεί από τις δύο πετρελαϊκές κρίσεις

(Οκτώβριος 1973 και Ιούνιος 1979), που είχαν διπλά ευεργετικό αποτέλεσμα για την ανάπτυξη της έρευνας της. Ιδιαίτερα έντονο εκδηλώνεται το ενδιαφέρον για την Ι.Τ. στις χώρες που παράγουν και καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες άνθρακα ή λιγνίτη. Γεγονός είναι ότι οι χώρες που είχαν και έχουν ακόμη μεγάλα φυσικά αποθέματα άνθρακα (ΗΠΑ, ΕΣΣΔ, Αγγλία, Γερμανία, Γαλλία) είναι και οι περισσότερο προηγμένες βιομηχανικά χώρες που έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στην Τεχνολογία και χρηματοδότησαν προγράμματα Έρευνας και Ανάπτυξης για την χρήση της παραγόμενης Ι.Τ.. Αυτό δικαιολογεί και το σημαντικό αριθμό επιστημονικών δημοσιευμάτων.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Komnitsas K. «*Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers*» [Βιβλίο]. - Chania : journal homepage: [www.elsevier.com/locate/apt](http://www.elsevier.com/locate/apt), 2014.
- Βογιατζάκης και Χρηστάκη-Παπαγεωργίου «*Etude sur les cendres volantes des lignites grecs-Utilization dans le ciment-Region de Ptolemaide*». [Βιβλίο]. - [s.l.] : Rev. Mat. Constr. 703, 6, pp 341-4, 1976.
- Γκερέκος και Καλογέρας «*Εναλλακτικές Πρώτες Ύλες Στην Τσιμεντοβιομηχανία*» [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.], 2009.
- ΕΘΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.], 2007.
- ΕΛΟΤ 408 «*Θραυστά αδρανή δια συνήθη σκυροδέματα*» [Βιβλίο].
- ΕΛΟΤ EN12620 «*Αδρανή για Σκυρόδεμα*» [Βιβλίο].
- Κόλια, Χριστούλα και Μαρσέλλος «*Χρήση της Ι.Τ. στην οδοποιία*» [Βιβλίο]. - Αθήνα : Δελτίον Κ.Ε.Δ.Ε. τεύχη 3-4, 1986.
- Μάτης και Δεληγιάννη-Γιαννακουδάκη «*Τσιμέντο Portland με Ι.Τ. λιγνιτών. Χημικά Χρονικά*» [Βιβλίο]. - [s.l.] : Γενική έκδοση Τόμος 48. Σ. 39-44, 52, 1983.
- Νικολαΐδης και Ζαγορησίου-Βέττα «*Ποζολανικότητα Ιπτάμενης Τέφρας σε συνάρτηση με την λεπτότητα και μεταβολή της αντοχής με το χρόνο, μιγμάτων τσιμέντου. Πόρτλαντ με Ι.Τ. ειδικών επιλογών.*» [Βιβλίο]. - [s.l.] : Δημερίδα Πτολεμαΐδας ΔΕΗ., 1983.
- Νικολουτσόπουλος Ν. «*Εφαρμογή γεωπολυμερισμού για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος*». [Βιβλίο]. - Αθήνα : ΕΜΠ Εργαστήριο Ανόργανης & Αναλυτικής Χημείας, 2013.
- Παπαγιάννη «*Κανονισμοί για την χρήση ιπτάμενων τεφρών στο σκυρόδεμα και ελληνικές ιπτάμενες τέφρες*» [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.].
- Παπαγιάννη-Παπαδοπούλου «*Η τέφρα Πτολεμαΐδας στο χώρο των δομικών υλικών*» [Βιβλίο]. - [s.l.] : Δημερίδα Πτολεμαΐδας. Δ.Ε.Η., 1983.
- Σακελλαρίου «*Ελληνικές Τέφρες Πτολεμαΐδας: ένα ποζολανικό πρόσθετο σκυροδέματος με λανθάνοντα υδραυλικά χαρακτηριστικά.*» [Βιβλίο].
- Στιβανάκης, Γαλανούλης και Νικολόπουλος «*Μελέτη συνεργασίας της Ι.Τ.Μ. με τσιμέντα Portland*» [Βιβλίο].
- Τάσιος και Οικονόμου «*Ελληνικές Ι.Τ. στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα*» [Βιβλίο]. - Αθήνα : Δημερίδα Πτολεμαΐδας ΔΕΗ, 1983.

- Τριανταφύλλου «Δομικά υλικά» [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.], 2008.
- Bickley J.A, «*The variability of pullout tests and in place concrete strength*», *Concr Int*, 1992 /04, 44- 51
- Δ. Καλλιάνης Γ. Μαθιουδάκης Νομοθεσία – Νομολογία – «*Ευρωπαϊκές Οδηγίες σε σχέση με την ποιότητα – Ο ρόλος των Μηχανικών*» [Εργασία]. - [s.l.] : ΤΕΕ, 2008.
- Δημούδη Α. «*Οικοδομικά υλικά*» [Βιβλίο]. - Ξάνθη : [s.n.], 2006.
- Κ. Χρυσομαλλίδου Ν. Θεοδοσίου Θ. Τσικαλουδάκη «*Αειφόρος Ανάπτυξη Ελεύθερων Χώρων σε Αστικό Περιβάλλον*» [Βιβλίο]. - [s.l.] : Α.Π.Θ..
- «*Κατεδάφιση και Ανακύκλωση*» [Ηλεκτρονικό] // [www.staywithclay.com](http://www.staywithclay.com).
- Κούκης και Σαμπατακάκης «*Γεωλογία Τεχνικών Έργων*» [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.], 2007.
- Λάζαρη Ε. «*Βιοκλιματικός Σχεδιασμός στην Ελλάδα: Ενεργειακή Απόδοση και Κατευθύνσεις Εφαρμογής*» [Βιβλίο]. - Αθήνα : ΚΑΠΕ , 2002.
- Μαντζόρος Ν. «*Steel Constructions*» [Ηλεκτρονικό] // [www.steel-structures.eu](http://www.steel-structures.eu).
- Νικολαΐδης Αθ. Φ. «*Οδοποιία , οδοστρώματα – υλικά, έλεγχος ποιότητας*» [Εργασία].
- Σιούτα Ν. Γιαννακούλης Λ. Περιβάλλον, «*Κατασκευή, ΣΠΔ και Βιώσιμη Κατασκευή, Πρώτη Εφαρμογή του EMAS στην Κατασκευή της Ελλάδας*» [Βιβλίο]. - [s.l.] : ΑΚΤΩΡ, 2010.
- Τουμπανιάρη Σ. «*Αστικό Παρατηρητήριο στη περιοχή των Μεγάρων*» [Βιβλίο]. - Πειραιάς : Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, 2011.