



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Μελέτη της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας ως βιομηχανικό απόβλητο ή
παραπροϊόν”**

ΤΣΑΚΟΥΡΙΔΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

A.M.: 3020069

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΑΡΙΣΑ, 2025

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

.....
.....
.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας ως δευτερογενούς υλικού στον κατασκευαστικό τομέα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε τεχνικό, περιβαλλοντικό και οικονομικό επίπεδο. Τεχνικά, η τέφρα ενισχύει τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα, την αντίσταση σε περιβαλλοντικές επιδράσεις και τη μακροχρόνια απόδοση των κατασκευών. Στον τομέα της οδοποιίας, προσφέρει σταθεροποίηση των υπεδαφών και βελτίωση της φέρουσας ικανότητας, συμβάλλοντας σε ασφαλή και μακροχρόνια έργα υποδομής. Περιβαλλοντικά, η χρήση της τέφρας μειώνει τις εκπομπές CO₂ λόγω της αντικατάστασης μέρους του τσιμέντου, ενώ ενισχύει την κυκλική οικονομία μέσω της ανακύκλωσης ενός αποβλήτου. Οικονομικά, η τέφρα μειώνει το κόστος κατασκευής και συντήρησης, προσφέροντας φθηνότερες λύσεις χωρίς εκπτώσεις στην ποιότητα. Παρά τα πλεονεκτήματα, η έλλειψη θεσμικών πλαισίων και η διστακτικότητα των μηχανικών αποτελούν εμπόδια για την ευρεία εφαρμογή της. Με την κατάλληλη υποστήριξη και εκπαίδευση, η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μετάβαση προς βιώσιμες και αποδοτικές κατασκευές, μειώνοντας τα περιβαλλοντικά αποτυπώματα και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των έργων.

Λέξεις κλειδιά: Ιπτάμενη τέφρα, ποζολανικά υλικά, σκυρόδεμα, βιώσιμη κατασκευή, οδοποιία, περιβαλλοντική επίδραση, ανθεκτικότητα, κυκλική οικονομία, υποδομές, ενεργειακή αποδοτικότητα

SUMMARY

The use of fly ash as a secondary material in the construction sector offers significant technical, environmental, and economic advantages. Technically, ash enhances the mechanical behavior of concrete, improving its durability, resistance to environmental influences, and long-term performance. In road construction, it stabilizes subsoil and improves bearing capacity, contributing to safe and long-lasting infrastructure projects. Environmentally, the use of ash reduces CO₂ emissions by replacing part of the cement, while strengthening the circular economy through the recycling of waste. Economically, ash reduces construction and maintenance costs, offering cheaper solutions without compromising on quality. Despite its advantages, the lack of institutional frameworks and the reluctance of engineers are obstacles to its widespread application. With the right support and training, fly ash can play an important role in the transition to sustainable and efficient construction, reducing environmental footprints and enhancing the resilience of projects.

Keywords: Fly ash, pozzolanic materials, concrete, sustainable construction, road construction, environmental impact, resilience, circular economy, infrastructure, energy efficiency

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χριστοδούλου Δημήτριο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος, για την καθοδήγηση, την πολύτιμη βοήθεια, τις παρατηρήσεις και τη διαρκή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, τους/τις καθηγητές/τριες του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις γνώσεις και την έμπνευση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη, την υπομονή και την πίστη τους σε μένα, χωρίς την οποία τίποτα από αυτά δεν θα ήταν δυνατό.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και συμφοιτητές μου για τη συνεργασία, την παρέα και την ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	12
ΠΟΖΟΛΑΝΕΣ	12
1.1 Φυσικές ποζολάνες	13
1.2 Τεχνητές ποζολάνες	15
1.3 Σκωρίες	17
1.4 Ιπτάμενη Τέφρα	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	21
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	21
2.1.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	21
2.1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ	22
2.1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ	23
2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΕΦΡΑΣ	25
2.3 ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ – ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ	27
2.4 ΕΥΡΩΠΑΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	30
2.4.1 ΕΥΡΩΠΑΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ	30
2.4.2 ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	34
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	34
3.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ	34
3.2 ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	35

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	37
3.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ.....	40
3.5 ΕΘΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ.....	42
3.6 ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	44
3.7 Η ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΟΔΟΠΟΙΑ	47
3.8 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	51
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ	51
4.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	51
4.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ.....	53
4.3 ΠΕΡΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΥΣΙΑ ΜΕΤΡΩΝ	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	60
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ.....	60
5.1 Τα σημαντικότερα κατασκευαστικά έργα με χρήση της ιπτάμενης τέφρας.....	60
5.2 Περιορισμοί και προκλήσεις.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	66
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ηφαιστειακή τέφρα φυσικής προέλευσης – Πάτρα.....	13
Εικόνα 2: Ιπτάμενη τέφρα - παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη με ποζολανικές ιδιότητες.	19
Εικόνα 3: Δείγματα ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικές κοκκομετρίες.....	28
Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση της ποζολανικής αντίδρασης με παραγωγή συγκολλητικών ενώσεων (C-S-H).	29
Εικόνα 5:.....	36
Εικόνα 6: Διαδικασία ανάμειξης των ECC (Engineered Cementitious Composites): α) ξηρή ανάμειξη τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας και λεπτού αδρανούς υλικού, β) προσθήκη νερού στο μείγμα, γ) ανάμειξη των συστατικών για άλλα δύο λεπτά, δ) προσθήκη ινών PVA και ανάμειξη για άλλα δύο λεπτά.....	45
Εικόνα 7: Κάποιες από τις κύριες εφαρμογές ιπτάμενης τέφρας.....	52
Εικόνα 8: Ο ουρανοξύστης Burj Khalifa, όπου χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας για μείωση θερμότητας ενυδάτωσης και αυξημένη αντοχή.	60

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Υποθέσεις

Al ₂ O ₃ : Οξείδιο του αργιλίου.....	15
CaCO ₃ : Ανθρακικό ασβέστιο	35
C–A–H : Calcium–Aluminate–Hydrate	16
CaO : Οξείδιο του ασβεστίου	15
CaSO ₄ : Θεικο ασβεστιο.....	35
CEM II : Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ, τα οποία είναι το τσιμέντο Πόρτλαντ-ασβεστόλιθου, το τσιμέντο Πόρτλαντ-σκωρίας και το τσιμέντο Πόρτλαντ-τάφρου	47
CEM IV : Είναι το ποζολανικό τσιμέντο	47
cm ³ : Κυβικό εκατοστόμετρο	36
CO ₂ : Διοξείδιο του άνθρακα.....	17
C–S–H : Calcium–Silicate–Hydrate	16
Fe ₂ O ₃ : οξείδιο του σιδήρου	17
g : γραμμάριο.....	36
GGBFS : Η αλεσμένη κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου	17
GIS: Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....	59
Green Deal : Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία	50
K ₂ O : Οξείδιο του καλίου	15
kg : Χιλιόγραμμα.....	23
LOI : Περιοριστικός δείκτης οξυγόνου	28
m ² : Τετραγωνικό μέτρο	23
MgO : Οξείδιο του μαγνησίου	15
mm : Χιλιοστό	22
MPa : Μεγαπασκάλ	22
Na ₂ O : Οξείδιο του νατρίου.....	15
pH : δυναμικό υδρογόνου.....	40
SiO ₂ : Διοξείδιο του πυριτίου	15
SO ₃ : Τριοξείδιο του θείου	41
XRD : Κρυσταλλογραφία ακτίνων Χ.....	25
ΔΕΗ : Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού	43
E.E. : Ευρωπαϊκή Ένωση	53

Ε.Τ.Ε.Π. : Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή	43
ΕΛΟΤ : Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης	32
μm : Μικρόμετρο.....	22

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βιομηχανικού υποπροϊόντος, το οποίο, ενώ αρχικά θεωρούνταν απόβλητο, σήμερα αναγνωρίζεται ως πολύτιμο υλικό για διάφορες τεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Παράγεται κατά την καύση του άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, κυρίως από την καύση λιγνίτη, και συλλέγεται από τα φίλτρα κατακράτησης καυσαερίων. Το υλικό αυτό αποτελείται από εξαιρετικά λεπτά, κονιοποιημένα σωματίδια, τα οποία σχηματίζονται κατά τη φάση της καύσης μέσω της τήξης των ανόργανων συστατικών του άνθρακα και της επακόλουθης ταχείας ψύξης τους. Η χημική του σύσταση περιλαμβάνει βασικά συστατικά όπως το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), το τριοξείδιο του αλουμινίου (Al_2O_3), το τριοξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3), και σε μικρότερες αναλογίες, οξείδια του ασβεστίου (CaO) και του μαγνησίου (MgO) (Mathapati et al. 2022).

Σ επιστημονικό πλαίσιο, η σημασία της ιπτάμενης τέφρας σχετίζεται με τις ποζολανικές της ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, ως τεχνητή ποζολάνη, είναι ικανή να αντιδρά με υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) με την παρουσία νερού και να σχηματίζει ενώσεις παρόμοιες με αυτές του τσιμέντου. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για χρήση στην παρασκευή σκυροδέματος, καθώς συμβάλλει στη βελτίωση της αντοχής, της εργασιμότητας και της ανθεκτικότητας του τελικού προϊόντος. Παράλληλα, μειώνει την απαίτηση για κλίνκερ και συνεπώς την περιβαλλοντική επιβάρυνση που σχετίζεται με την παραγωγή τσιμέντου, όπως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Papadakis, 2000).

Ο θεωρητικός αυτός προσανατολισμός μπορεί να θεωρηθεί σημαντικός για την κατανόηση του διττού ρόλου της ιπτάμενης τέφρας: αφενός ως απόβλητο με πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αφετέρου ως δευτερογενές υλικό με προστιθέμενη αξία. Πράγματι, αν και η τέφρα μπορεί να περιέχει ιχνοστοιχεία δυνητικά επικίνδυνα, όπως αρσενικό, μόλυβδο ή υδράργυρο, η ορθολογική διαχείριση και επεξεργασία της επιτρέπει την ασφαλή αξιοποίησή της. Η ταξινόμησή της εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η προέλευση του άνθρακα, οι τεχνολογίες καύσης, οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και η μέθοδος αποθήκευσης και μεταφοράς (Mathapati et al., 2022).

Ο σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι να διερευνήσει συστηματικά τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως βιομηχανικού παραπροϊόντος, με έμφαση τόσο στις τεχνικές δυνατότητες όσο και στις περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές διαστάσεις αυτής της πρακτικής. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στο ελληνικό πλαίσιο, όπου η ιπτάμενη τέφρα που προέρχεται κυρίως από τους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ στη Δυτική Μακεδονία και τη Μεγαλόπολη παρουσιάζει μοναδικά χαρακτηριστικά. Με την απολιγνιτοποίηση να προχωρά, η αξιοποίηση των ήδη παραχθέντων αποθεμάτων ιπτάμενης τέφρας αποκτά στρατηγική σημασία.

Επιπλέον, αυτή η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τη σημασία της ύπαρξης σαφούς κανονιστικού πλαισίου και προτύπων ποιότητας, όπως είναι το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450-1, το οποίο στην Ελλάδα έχει εναρμονιστεί ως ΕΛΟΤ EN 450-1. Η εφαρμογή αυτού του προτύπου είναι υποχρεωτική για την παραγωγή και χρήση της τέφρας σε κατασκευαστικές

δραστηριότητες, διασφαλίζοντας την ποιότητα και την καταλληλότητα του υλικού για τη χρήση σε έργα σκυροδέματος και υποδομών. Μέσω αυστηρών ελέγχων και μηχανισμών πιστοποίησης, ενισχύεται η εμπιστοσύνη στην αξιοποίηση ενός υλικού που μέχρι πρότινος αντιμετωπιζόταν ως πρόβλημα.

Η σημασία της μελέτης δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνική και περιβαλλοντική της διάσταση, αλλά εκτείνεται και στην οικονομική. Η επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, όπως η ιπτάμενη τέφρα, μειώνει το κόστος πρώτων υλών, περιορίζει την ανάγκη για εξόρυξη φυσικών πόρων και ενισχύει την κυκλική οικονομία. Ειδικότερα για την Ελλάδα, όπου το κόστος κατασκευής είναι υψηλό και η ανάγκη για βιώσιμες λύσεις επιτακτική, η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας αποτελεί μια λύση πολλαπλά ωφέλιμη (Papadakis, 1999).

Η δομή της εργασίας έχει διαμορφωθεί, ώστε να παρουσιάζει με συνεκτικό και επιστημονικό τρόπο τα κρίσιμα ζητήματα γύρω από την ιπτάμενη τέφρα. Στο Κεφάλαιο 1 αναλύονται τα ποζολανικά υλικά, με ιδιαίτερη αναφορά στις φυσικές και τεχνητές ποζολάνες, καθώς και στις σκωρίες ψυκαμίνων. Ειδική έμφαση δίνεται στην τεχνητή ποζολάνη της ιπτάμενης τέφρας. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της τέφρας, καθώς και τη διαδικασία παραγωγής, ταξινόμησης και τις αντίστοιχες ευρωπαϊκές και ελληνικές προδιαγραφές.

Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στην ελληνική ιπτάμενη τέφρα, αναλύοντας τη δομή της, την ποιότητά της, τα πιθανά μειονεκτήματα και την εφαρμογή της στη σκυροδεσία και την οδοποιία. Επιπλέον, εξετάζεται η παραγωγή και κατανάλωσή της στο ελληνικό πλαίσιο, στο οποίο η αλλαγή ενεργειακού μείγματος δημιουργεί νέες προκλήσεις. Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει την κατάσταση στην Ευρώπη, αναλύοντας την παραγωγή και χρήση της ιπτάμενης τέφρας στις ευρωπαϊκές χώρες, τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίησή της, καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που ενδέχεται να προκύψουν από την εγκατάλειψή της χωρίς διαχείριση.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται περιπτώσεις κατασκευαστικών έργων που αξιοποίησαν ιπτάμενη τέφρα, παρέχοντας εμπειρικά δεδομένα που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα της χρήσης της. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, που συνοψίζουν τη σημασία της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας, προτείνοντας κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή. Σε γενικές γραμμές, η παρούσα εργασία σκοπεύει να συνεισφέρει στην επιστημονική κατανόηση και τη βιομηχανική αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας, ενισχύοντας τη μετάβαση προς μια πιο βιώσιμη και κυκλική οικονομία στον κατασκευαστικό τομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΟΖΟΛΑΝΕΣ

Οι ποζολάνες είναι φυσικά ή τεχνητά πυριτικά ή πυριτο-αλουμινικά υλικά τα οποία, από μόνα τους, δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες, αλλά, όταν αναμειγνύονται με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), αποκτούν συγκολλητικές ιδιότητες και σχηματίζουν σταθερές ενώσεις, όπως είναι τα πυριτικά και αλουμινικά ασβέστια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ποζολανική αντίδραση και αποτελεί τη βάση για τη χρήση των ποζολανών στην παρασκευή τσιμέντων και κονιαμάτων. Ο όρος ποζολάνη προέρχεται από την ιταλική πόλη Ποτσουνόλι (Pozzuoli) κοντά στη Νάπολη, όπου παρατηρήθηκε πρώτη φορά η χρήση ηφαιστειακής τέφρας στην οικοδομική δραστηριότητα από τους Ρωμαίους (Mathapati et al., 2022).

Οι ποζολάνες διακρίνονται σε φυσικές και τεχνητές. Οι φυσικές περιλαμβάνουν υλικά όπως η ηφαιστειακή τέφρα, ο τραχίτης, ο διατομίτης και ο πούζολαν, ενώ οι τεχνητές προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές διεργασίες, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα από μονάδες καύσης άνθρακα, η σκωρία υψικαμίνων και η πυριτική πούδρα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ιπτάμενη τέφρα, η οποία αποτελεί παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη ή άνθρακα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιπτάμενη τέφρα, λόγω της λεπτόκοκκης υφής της και της χημικής σύστασής της, θεωρείται υψηλής ποιότητας ποζολάνη και χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή σκυροδέματος και τσιμέντου (Ahmaruzzaman, 2010).

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως ποζολανικό υλικό έχει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο από τεχνική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Από τεχνικής πλευράς, η προσθήκη τέφρας στο τσιμέντο βελτιώνει τη μακροχρόνια αντοχή του σκυροδέματος, μειώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης και αυξάνει την ανθεκτικότητα σε θειικά άλατα και άλλες επιθετικές χημικές ουσίες. Παράλληλα, η τέφρα δρα ως πληρωτικό υλικό, βελτιώνοντας την εργασιμότητα του σκυροδέματος και περιορίζοντας τη δημιουργία τριχοειδών πόρων. Από περιβαλλοντικής άποψης, η επαναχρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων, καθώς και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά την παραγωγή τσιμέντου (Ahmaruzzaman, 2010).

Ωστόσο, για την αποτελεσματική χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως ποζολάνη, είναι απαραίτητο να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές ποιότητας, όπως η λεπτομέρεια, η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου και το επίπεδο ακαθαρσιών (Papadakis, 2000).

Ορισμένοι τύποι τέφρας μπορεί να περιέχουν ανεπιθύμητα στοιχεία, όπως θειικά άλατα ή βαρέα μέταλλα, γεγονός που καθιστά αναγκαίο τον προσεκτικό ποιοτικό έλεγχο πριν τη χρήση της σε κατασκευαστικά υλικά. Συνοψίζοντας, οι ποζολάνες, και ειδικότερα, η ιπτάμενη τέφρα, αποτελούν σημαντικό πόρο για τη βιώσιμη ανάπτυξη στον κατασκευαστικό τομέα, προσφέροντας τεχνικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η σωστή αξιοποίηση αυτών των υλικών συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού

αποτυπώματος της βιομηχανίας κατασκευών και ενισχύει τη μετάβαση προς μια πιο κυκλική οικονομία (Xu et al., 1995).

1.1 Φυσικές ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι φυσικά ή τεχνητά πυριτικά ή πυριτο-αλουμινικά υλικά, τα οποία, από μόνα τους, δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες, αλλά όταν αναμειγνύονται με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), αποκτούν συγκολλητικές ιδιότητες και σχηματίζουν σταθερές ενώσεις, όπως είναι τα πυριτικά και αλουμινικά ασβέστια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ποζολανική αντίδραση και αποτελεί τη βάση για τη χρήση των ποζολανών στην παρασκευή τσιμέντων και κονιαμάτων. Οι φυσικές ποζολάνες περιλαμβάνουν υλικά όπως η ηφαιστειακή τέφρα, ο τραχίτης και ο διατομίτης, ενώ οι τεχνητές προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές διεργασίες, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα από μονάδες καύσης άνθρακα, η σκωρία υψικαμίνων και η πυριτική πούδρα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ιπτάμενη τέφρα, η οποία αποτελεί παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη ή άνθρακα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Papadakis, 2000).



Εικόνα 1: Ηφαιστειακή τέφρα φυσικής προέλευσης – Πάτρα.

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως ποζολανικό υλικό έχει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο από τεχνική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Από τεχνικής πλευράς, η προσθήκη τέφρας στο τσιμέντο βελτιώνει τη μακροχρόνια αντοχή του σκυροδέματος, μειώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης και αυξάνει την ανθεκτικότητα σε θειικά άλατα και άλλες επιθετικές χημικές ουσίες. Παράλληλα, η τέφρα δρα ως πληρωτικό υλικό, βελτιώνοντας την εργασιμότητα του σκυροδέματος και περιορίζοντας τη δημιουργία τριχοειδών πόρων (Ahmaruzzaman, 2010).

Από περιβαλλοντικής άποψης, η επαναχρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων, καθώς και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του

άνθρακα κατά την παραγωγή τσιμέντου. Ωστόσο, για την αποτελεσματική χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως ποζολάνη, είναι απαραίτητο να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές ποιότητας, όπως η λεπτομέρεια, η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου και το επίπεδο ακαθαρσιών (Wattimena et al., 2017).

Ορισμένοι τύποι τέφρας μπορεί να περιέχουν ανεπιθύμητα στοιχεία, όπως θειικά άλατα ή βαρέα μέταλλα, γεγονός που καθιστά αναγκαίο τον προσεκτικό ποιοτικό έλεγχο πριν τη χρήση της σε κατασκευαστικά υλικά. Σε γενικές γραμμές, οι ποζολάνες – και ειδικότερα η ιπτάμενη τέφρα – αποτελούν σημαντικό πόρο για τη βιώσιμη ανάπτυξη στον κατασκευαστικό τομέα, προσφέροντας τεχνικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η σωστή αξιοποίηση αυτών των υλικών συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της βιομηχανίας κατασκευών και ενισχύει τη μετάβαση προς μια πιο κυκλική οικονομία (Xu et al., 1995).

Οι φυσικές ποζολάνες αποτελούν μία από τις αρχαιότερες και πιο διαδεδομένες μορφές δευτερευόντων συγκολλητικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή δομικών έργων, ιδιαίτερα στην αρχαιότητα. Πρόκειται για φυσικά υλικά ηφαιστειακής ή ιζηματογενούς προέλευσης τα οποία περιέχουν πυριτικά και αλουμινοπυριτικά συστατικά και αποκτούν συγκολλητικές ιδιότητες, όταν αναμειγνύονται με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου, δημιουργώντας σταθερές ενώσεις μέσω της λεγόμενης ποζολανικής αντίδρασης. Οι φυσικές ποζολάνες διακρίνονται κυρίως σε υλικά ηφαιστειακής και ιζηματογενούς προέλευσης (Papadakis, 2000). Οι πιο γνωστοί τύποι είναι η ηφαιστειακή τέφρα, ένα λεπτόκοκκο υλικό που παράγεται από ηφαιστειακές εκρήξεις και περιέχει άμορφο διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), αλουμίνα (Al_2O_3), καθώς και οξείδια ασβεστίου, μαγνησίου και άλλων στοιχείων. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζουν ο τραχίτης και ο ανδεσίτης, πυριτικά πετρώματα ηφαιστειακής προέλευσης, τα οποία όταν υποστούν θερμική ή μηχανική επεξεργασία αποκτούν ποζολανικές ιδιότητες, ο διατομίτης, ιζηματογενές πέτρωμα με υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου από τα κελύφη μικροσκοπικών οργανισμών, ο μπεντονίτης και ο καολίνης, ορυκτά της ομάδας των αργίλων που μετά από θερμική επεξεργασία αποκτούν ποζολανικές ιδιότητες (Wattimena et al., 2017).

Σημαντική θεωρείται και η φυσική ποζολάνη που βρίσκεται κυρίως στη νότια Ιταλία και την Ελλάδα, και αποτελεί ηφαιστειακό υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε άμορφο SiO_2 και Al_2O_3 . Οι φυσικές ποζολάνες χαρακτηρίζονται από υψηλό ποσοστό πυριτικών και αλουμινοπυριτικών ενώσεων. Η χημική τους σύσταση ποικίλει αλλά συνήθως περιλαμβάνει διοξείδιο του πυριτίου σε ποσοστά 45–70%, οξείδιο του αργιλίου 10–20%, οξείδιο του σιδήρου 5–15% και άλλα οξείδια (CaO , MgO , Na_2O , K_2O) σε μικρότερες ποσότητες. Ο βαθμός ποζολανικής δραστηριότητας εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητα του υλικού σε άμορφο πυριτικό και αλουμινοπυριτικό υλικό, καθώς και από τη λεπτότητα και την ειδική επιφάνειά του (Wattimena et al., 2017).

Η ποζολανική αντίδραση λαμβάνει χώρα, όταν το ποζολανικό υλικό αναμειγνύεται με υδροξείδιο του ασβεστίου και νερό. Το $\text{Ca}(\text{OH})_2$, το οποίο προκύπτει κατά την ενυδάτωση του κλίνκερ στο τσιμέντο Portland, αντιδρά με τα αμμόδη πυριτικά και αλουμινοπυριτικά

συστατικά της ποζολάνης, σχηματίζοντας σταθερά προϊόντα όπως C–S–H (Calcium–Silicate–Hydrate) και C–A–H (Calcium–Aluminate–Hydrate), τα οποία προσδίδουν μηχανική αντοχή και χημική σταθερότητα (Xu et al., 1995).

Οι φυσικές ποζολάνες χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή υδραυλικών κονιαμάτων και τσιμέντων, όπου η προσθήκη ποζολάνης βελτιώνει τη χημική αντοχή, μειώνει τη διαπερατότητα και καθυστερεί την ανάπτυξη θερμότητας κατά την ενυδάτωση. Χρησιμοποιούνται επίσης σε παραδοσιακά και οικολογικά κονιάματα, κυρίως στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική και στην αποκατάσταση μνημείων, όπου η ποζολάνη αναμειγνύεται με ασβέστη για την παραγωγή φυσικών, ανθεκτικών και αναπνεύσιμων κονιαμάτων, καθώς και σε σκυροδέματα ειδικών απαιτήσεων, όπως για υποθαλάσσιες κατασκευές, φράγματα και περιοχές με χημική επιθετικότητα, όπου η αντοχή σε θειικά και η μειωμένη διαπερατότητα είναι κρίσιμα χαρακτηριστικά. (Akbulut et al., 2024).

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση φυσικών ποζολανών περιλαμβάνουν την αντοχή σε χημικά, τη συμβολή στη βιώσιμη ανάπτυξη ως φιλικά προς το περιβάλλον υλικά με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα, τη βελτίωση της μικροδομής με μείωση των τριχοειδών πόρων και αύξηση της συνοχής του σκυροδέματος, και την αυξημένη διάρκεια ζωής των κονιαμάτων και τσιμέντων με ποζολάνη (Papadakis, 2000).

Παρόλα αυτά, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί, όπως η μειωμένη αρχική αντοχή των ποζολανικών μιγμάτων σε σύγκριση με το καθαρό τσιμέντο Portland, η ανάγκη ενεργοποίησης ορισμένων ποζολανών μέσω θερμικής ή χημικής επεξεργασίας και η μεταβλητή ποιότητα των φυσικών ποζολανών λόγω ανομοιογένειας της σύστασης, γεγονός που απαιτεί ενδεδειγμένους ποιοτικούς ελέγχους. Συμπερασματικά, οι φυσικές ποζολάνες αποτελούν έναν πολύτιμο και ιστορικά σημαντικό πόρο για τη δόμηση, με σημαντικά τεχνικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Η χρήση τους συνάδει με τις αρχές της βιώσιμης δόμησης και της κυκλικής οικονομίας, προσφέροντας ταυτόχρονα λύσεις για έργα υψηλών απαιτήσεων αλλά και για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς. Τέλος, θεωρείται ότι η αξιοποίησή τους στην παραγωγή οικοδομικών υλικών πρέπει να συνεχίσει να ενισχύεται, με ταυτόχρονη ανάπτυξη μεθόδων πιστοποίησης, επεξεργασίας και τυποποίησης, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερή και ποιοτική ενσωμάτωσή τους σε σύγχρονες και παραδοσιακές εφαρμογές (Gianoncelli et al., 2013).

1.2 Τεχνητές ποζολάνες

Οι τεχνητές ποζολάνες αποτελούν σημαντική κατηγορία δευτερευόντων συγκολλητικών υλικών, τα οποία προκύπτουν από θερμικές, χημικές ή βιομηχανικές διεργασίες και διαθέτουν ποζολανικές ιδιότητες, δηλαδή την ικανότητα να αντιδρούν με υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) παρουσία νερού και να σχηματίζουν σταθερά προϊόντα ενυδάτωσης, όπως είναι τα πυριτικά και αλουμινικά ασβέστια (C–S–H και C–A–H). Η χρήση των τεχνητών ποζολανών στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος αποτελεί πλέον καθιερωμένη πρακτική, καθώς προσφέρουν σημαντικά τεχνικά, περιβαλλοντικά και

οικονομικά οφέλη, ιδίως στη σύγχρονη εποχή, όπου οι απαιτήσεις για βιώσιμη και ανθεκτική δόμηση είναι υψηλές (Papadakis, 2000).

Όπως και οι φυσικές ποζολάνες, οι τεχνητές ποζολάνες είναι υλικά πλούσια σε άμορφα πυριτικά και αλουμινοπυριτικά συστατικά, που αποκτούν συγκολλητικές ιδιότητες όταν αντιδρούν με το Ca(OH)_2 . Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε ενεργό SiO_2 και Al_2O_3 σε μορφή μη κρυσταλλική (άμορφη), καθώς και η λεπτομερώς κονιοποιημένη υφή, η οποία ευνοεί τη χημική δραστηριότητα και την αποτελεσματική συμμετοχή τους στην ποζολανική αντίδραση. Οι τεχνητές ποζολάνες προκύπτουν κυρίως από βιομηχανικά παραπροϊόντα, θερμικά επεξεργασμένα φυσικά ορυκτά και συνθετικά υλικά ειδικής παραγωγής (Papadakis, 1999).

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί το πιο διαδεδομένο είδος τεχνητής ποζολάνης και προέρχεται από την καύση λιγνίτη ή ανθρακίτη σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Συλλέγεται από τα φίλτρα των καμινάδων με ηλεκτροστατικά ή μηχανικά μέσα και περιέχει άμορφο SiO_2 , Al_2O_3 και μικρές ποσότητες CaO , Fe_2O_3 , καθώς και άλλα οξείδια. Διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους: ο τύπος F, που προέρχεται από καύση ανθρακίτη και περιέχει χαμηλό ποσοστό CaO (συνήθως κάτω από 10%) και παρουσιάζει καθαρά ποζολανική δράση, και ο τύπος C, που προέρχεται από καύση λιγνίτη και περιέχει υψηλότερο CaO (15–30%), παρουσιάζοντας και υδραυλική και ποζολανική δράση. Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας στο τσιμέντο αυξάνει τη μακροχρόνια αντοχή, μειώνει τη θερμοκρασία ενυδάτωσης και βελτιώνει τη χημική ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (Wttime et al., 2017).

Η σκωρία υψικαμίνου (GGBFS) αποτελεί παραπροϊόν της παραγωγής χυτοσιδήρου σε υψικάμινους. Το λιωμένο υπόλειμμα ψύχεται απότομα με νερό και στη συνέχεια κονιοποιείται, αποκτώντας υψηλή περιεκτικότητα σε CaO , SiO_2 , Al_2O_3 και MgO . Σε αντίθεση με τις άλλες ποζολάνες, παρουσιάζει υδραυλική συμπεριφορά, που ενεργοποιείται παρουσία αλκαλίων ή άλλων ενεργοποιητών. Όταν συνδυάζεται με τσιμέντο Portland, η σκωρία αυξάνει την αντοχή, βελτιώνει τη χημική αντίσταση και μειώνει τις εκπομπές CO_2 από την παραγωγή κλίνκερ. Η πυριτική πούδρα είναι ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό που προέρχεται από τη βιομηχανία παραγωγής πυριτίου ή φεροπυριτίου. Έχει πολύ υψηλό ποσοστό άμορφου SiO_2 (έως 90–98%) και τεράστια ειδική επιφάνεια (άνω των 20.000 m^2/kg). Αποτελεί εξαιρετικά δραστική ποζολάνη και χρησιμοποιείται κυρίως σε σκυροδέματα υψηλών επιδόσεων, όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα, ανθεκτικότητα σε χημική διάβρωση και πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή (Xu et al., 1995).

Ο καλσινωμένος καολίνης (μετακαολίνης) προέρχεται από τη θερμική κατεργασία του καολίνη, ενός φυσικού αργιλικού ορυκτού. Όταν θερμανθεί στους 600–800°C, χάνει τα δομικά του υδροξύλια και μετατρέπεται σε άμορφη και δραστική ποζολάνη. Είναι ιδιαίτερα καθαρό υλικό, με σταθερή σύνθεση και υψηλή δραστικότητα. Χρησιμοποιείται σε τσιμέντα και κονιάματα υψηλής ποιότητας, ειδικά σε έργα συντήρησης μνημείων, λόγω της λευκής του απόχρωσης και της υψηλής χημικής καθαρότητας (Gianoncelli et al., 2013).

Αυτά απαιτούν συνήθως περαιτέρω επεξεργασία για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών, όπως βαρέα μέταλλα, αλλά μπορούν να παρουσιάσουν αξιοσημείωτη ποζολανική συμπεριφορά (Xu et al., 1995).

Η χρήση τεχνητών ποζολανών προσφέρει πολλαπλά τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Τεχνικά, επιτυγχάνεται αυξημένη τελική αντοχή, μειωμένη διαπερατότητα, αυξημένη ανθεκτικότητα σε επιθετικά χημικά περιβάλλοντα και καλύτερη εργασιμότητα. Περιβαλλοντικά, μειώνονται οι εκπομπές CO₂ λόγω της μείωσης του κλίνκερ, αξιοποιούνται βιομηχανικά απόβλητα και περιορίζεται η απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής. Σε οικονομικό πλαίσιο, μειώνεται το κόστος παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος μέσω χρήσης παραπροϊόντων (Papadakis, 1999). Οι τεχνητές ποζολάνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε έργα όπως φράγματα, γέφυρες, λιμενικές εγκαταστάσεις, βιομηχανικά δάπεδα, υπόγειες και υποθαλάσσιες κατασκευές. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και προκλήσεις, όπως η διακύμανση στην ποιότητα και σταθερότητα των υλικών ανάλογα με την πηγή και τη μέθοδο παραγωγής, οι απαιτήσεις προεπεξεργασίας για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών ή την κατάλληλη άλεση, καθώς και η έλλειψη εναρμονισμένων προτύπων και προδιαγραφών σε πολλές χώρες (Papadakis, 2000).

Κατά συνέπεια, οι τεχνητές ποζολάνες αποτελούν σημαντική παράμετρο για τη σύγχρονη βιώσιμη δόμηση και την παραγωγή προηγμένων υλικών. Η αξιοποίησή τους όχι μόνο προσφέρει υψηλές τεχνικές επιδόσεις, αλλά συμβάλλει επίσης στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της τσιμεντοβιομηχανίας και στη μετατροπή αποβλήτων σε πολύτιμους πόρους. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την ενίσχυση των κανονισμών, η χρήση τους αναμένεται να επεκταθεί περαιτέρω, υποστηρίζοντας τη μετάβαση προς πιο πράσινες και ανθεκτικές δομές (Wttimea et al., 2017).

1.3 Σκωρίες

Οι σκωρίες υψικαμίνων αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά παραπροϊόντα που προκύπτουν από τη διαδικασία παραγωγής χυτοσιδήρου σε υψικαμίνους. Πρόκειται για υλικά που σχηματίζονται κατά την τήξη σιδηρομεταλλεύματος, όταν προστίθενται στη διαδικασία ασβεστόλιθος και λιθανάθρακας. Ο ασβεστόλιθος δρα ως ροητικό υλικό, δεσμεύοντας τις προσμίξεις του μεταλλεύματος όπως το πυρίτιο, το αργίλιο, το μαγνήσιο και το ασβέστιο, και σχηματίζει τη λεγόμενη σκωρία, η οποία λόγω της μικρότερης πυκνότητάς της διαχωρίζεται από τον υγρό χυτοσίδηρο και απομακρύνεται ξεχωριστά. Ανάλογα με τον τρόπο ψύξης της σκωρίας, προκύπτουν διαφορετικοί τύποι, με κυριότερους την κρυσταλλική σκωρία που ψύχεται αργά και την κοκκοποιημένη υαλώδη σκωρία που ψύχεται ταχέως με νερό. Η δεύτερη μορφή, η κοκκοποιημένη, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη βιομηχανία δομικών υλικών λόγω των ποζολανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων της (Akbulut et al., 2024).

Η χημική σύσταση της σκωρίας υψικαμίνου ποικίλλει, αλλά κυριαρχείται από πυριτικά άλατα, οξείδια ασβεστίου, αλουμινίου και μαγνησίου. Η φυσικοχημική της συμπεριφορά

την καθιστά σταθερή, αδρανή και φιλική προς το περιβάλλον. Χάρη στην υαλώδη της φύση, αντιδρά με υλικά που περιέχουν ασβέστη σχηματίζοντας ενώσεις με συνδετικές ιδιότητες, αντίστοιχες με αυτές του τσιμέντου. Η πιο κοινή εφαρμογή της σκωρίας υψικαμίνων είναι ως υποκατάστατο του τσιμέντου Portland. Χρησιμοποιείται είτε με ανάμειξη κατά την παραγωγή σύνθετων τύπων τσιμέντου, είτε ως προσμείκτης σε σκυροδέματα. Η ενσωμάτωσή της μειώνει την ανάγκη παραγωγής κλίνκερ, που αποτελεί το κύριο συστατικό του τσιμέντου αλλά και τον βασικότερο παράγοντα εκπομπών CO₂ στη βιομηχανία δομικών υλικών. Έτσι, η χρήση της σκωρίας συμβάλλει στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος. Παράλληλα, προσδίδει στο τελικό προϊόν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και αυξημένη ανθεκτικότητα έναντι διαβρωτικών παραγόντων (Xu et al., 1995).

Εκτός από την παραγωγή τσιμέντου, η σκωρία υψικαμίνου βρίσκει εφαρμογές στην οδοποιία, είτε ως υλικό βάσης είτε ως προσθήκη σε ασφαλτομίγματα. Χρησιμοποιείται επίσης στην παρασκευή μονωτικών υλικών και σε γεωτεχνικές εφαρμογές ως υλικό πλήρωσης, λόγω της σταθερότητας και της καλής συμπεριφοράς της υπό φορτίο. Σε πολλές περιπτώσεις αντικαθιστά φυσικά αδρανή υλικά, μειώνοντας την εξόρυξη πρώτων υλών (Akbulut et al., 2024).

Η περιβαλλοντική σημασία της επαναχρησιμοποίησης των σκωριών είναι εξαιρετικά σημαντική. Εκτός από τη μείωση των εκπομπών CO₂, αποφεύγεται η συσσώρευση αποβλήτων και η περιβαλλοντική όχληση που προκαλεί η απόθεσή τους. Παράλληλα, η χρήση τους ενισχύει τη βιωσιμότητα της κατασκευαστικής βιομηχανίας, ενώ προσφέρει και οικονομικά οφέλη, καθώς μειώνει το κόστος πρώτων υλών (Papadakis, 2000).

Ωστόσο, η αξιοποίηση των σκωριών δεν είναι απρόσκοπτη. Η ποιότητα της σκωρίας ενδέχεται να παρουσιάζει μεταβολές ανάλογα με την προέλευση του μεταλλεύματος και τις μεταλλουργικές συνθήκες, γεγονός που απαιτεί συστηματικό έλεγχο και προτυποποίηση. Επίσης, για την επεξεργασία και αποθήκευση των σκωριών απαιτούνται επενδύσεις σε κατάλληλες υποδομές. Επιπλέον, υπάρχει συχνά επιφυλακτικότητα από τους επαγγελματίες του κλάδου σχετικά με την αποδοτικότητα των εναλλακτικών υλικών, κάτι που επιβραδύνει την ευρύτερη υιοθέτησή τους (Papadakis, 1999).

Παράλληλα, θεωρείται ότι οι σκωρίες υψικαμίνων αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υλικού που ενώ προκύπτει ως παραπροϊόν της βαριάς βιομηχανίας, έχει τη δυνατότητα να επαναχρησιμοποιηθεί με τρόπο αποδοτικό και περιβαλλοντικά υπεύθυνο. Η χρήση τους στη βιομηχανία δομικών υλικών αποτελεί σημαντικό βήμα προς μια κυκλική οικονομία, μειώνοντας την εξάρτηση από μη ανανεώσιμους πόρους και συμβάλλοντας στον μετριασμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Με την κατάλληλη τεχνογνωσία, τις επενδύσεις και την κανονιστική υποστήριξη, οι σκωρίες μπορούν να διαδραματίσουν κομβικό ρόλο στην πράσινη μετάβαση της βιομηχανίας (Xu et al., 1995).

1.4 Ιπτάμενη Τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα βιομηχανικά παραπροϊόντα που προκύπτουν από την καύση άνθρακα σε θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διαδικασία καύσης του κονιορτοποιημένου άνθρακα, οι μη καύσιμες

ανόργανες ύλες ανεβαίνουν με τα καυσαέρια και στη συνέχεια συλλέγονται από τα φίλτρα ηλεκτροστατικής κατακράτησης ή σακκόφιλτρα. Αυτό το λεπτόκοκκο, γκριζόχρωμο υλικό είναι η ιπτάμενη τέφρα. Η σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας εξαρτάται από το είδος του άνθρακα που καίγεται, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ποικιλομορφία στη χημική και ορυκτολογική της σύσταση (Papadakis, 2000).



Εικόνα 2: Ιπτάμενη τέφρα - παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη με ποζολανικές ιδιότητες.

Συνήθως, περιέχει διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), οξείδια του αλουμινίου (Al_2O_3), του σιδήρου (Fe_2O_3), του ασβεστίου (CaO) και του μαγνησίου (MgO), καθώς και ίχνη βαρέων μετάλλων. Ανάλογα με τη χημική της σύσταση, η ιπτάμενη τέφρα κατατάσσεται σε δύο βασικούς τύπους: τύπου F (χαμηλό ασβέστιο) και τύπου C (υψηλό ασβέστιο). Η ιπτάμενη τέφρα, αν και αρχικά θεωρούνταν απόβλητο, αναγνωρίστηκε τα τελευταία χρόνια ως πολύτιμος δευτερογενής πόρος, κυρίως λόγω των ποζολανικών και εν μέρει υδραυλικών της ιδιοτήτων. Αυτές οι ιδιότητες της επιτρέπουν να αντιδρά με υδραυλικό ασβέστη ή/και νερό, δημιουργώντας σταθερές ενώσεις με συνδετική ικανότητα, καθιστώντας την κατάλληλη για χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος και άλλων δομικών υλικών (Papadakis, 1999).

Η πιο συνηθισμένη και ευρέως διαδεδομένη χρήση της είναι ως πρόσμεικτο στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα. Με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας, το τσιμέντο αποκτά βελτιωμένες ιδιότητες, όπως αυξημένη μακροχρόνια αντοχή, μειωμένη διαπερατότητα, αυξημένη αντοχή σε θειικά άλατα και καλύτερη εργασιμότητα. Επιπλέον, μειώνεται η θερμοκρασία ενυδάτωσης, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μαζικά έργα από σκυρόδεμα. Από περιβαλλοντικής άποψης, η χρήση τέφρας μειώνει την κατανάλωση πρώτων υλών και την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζεται με την παραγωγή του κλίνκερ. Εκτός από τον τομέα των κατασκευών, η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται σε έργα οδοποιίας, ως σταθεροποιητής εδαφών, σε αποθέσεις ορυχείων, καθώς και σε εφαρμογές περιβαλλοντικής αποκατάστασης, π.χ. για την επένδυση χώρων υγειονομικής ταφής (Xu et al., 1995).

Παρά τα οφέλη, η χρήση της ιπτάμενης τέφρας συνοδεύεται και από προκλήσεις. Η ποιότητά της δεν είναι πάντα σταθερή, κάτι που απαιτεί αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους.

Επιπλέον, η παρουσία βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων εγείρει προβληματισμούς σχετικά με την περιβαλλοντική ασφάλεια της μακροχρόνιας χρήσης της, ειδικά όταν αυτή χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες ή σε εφαρμογές με έκθεση στο νερό. Συνοψίζοντας, η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υλικού που από βιομηχανικό απόβλητο μετατρέπεται σε χρήσιμο δευτερογενές υλικό με πολλαπλές τεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές (Mathapati et al., 2022).

Η αξιοποίησή της αποτελεί σημαντικό βήμα για την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της βιομηχανίας παραγωγής ενέργειας και δομικών υλικών. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν εκτενέστερα οι ιδιότητες, οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα της χρήσης της στην πράξη (Xu et al., 1995).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

2.1.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Όσον αφορά τη χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας είναι 50% SiO_2 , 30% Al_2O_3 , 2% CaO , 5% αλκάλια και 7% Fe_2O_3 . Δύο μεγάλες κατηγορίες είναι οι πυριτικές και ασβεστολιθικές τέφρες, η καθεμία με ξεχωριστές ιδιότητες και βιομηχανικές εφαρμογές. Από τη μία πλευρά, η πυριτική ιπτάμενη τέφρα αποτελείται κυρίως από ενεργό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), με μικρότερες ποσότητες οξειδίου του σιδήρου (Fe_2O_3) και άλλων ενώσεων. Είναι μια λεπτή σκόνη που αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια και διαθέτει ποζολανικές ιδιότητες, δηλαδή αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου παρουσία νερού και σχηματίζει τσιμεντοειδείς ενώσεις. Ωστόσο, η περιεκτικότητά του σε ενεργό οξείδιο του ασβεστίου πρέπει να παραμένει κάτω από 10% κατά μάζα και η περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστιο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% (Papadakis, 2000).

Σε περιπτώσεις όπου η περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστιο είναι ελαφρώς υψηλότερη (1,0-2,5%), η ιπτάμενη τέφρα μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί, υπό την προϋπόθεση ότι η σταθερότητα του όγκου της παραμένει εντός αποδεκτών ορίων. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε ενεργό διοξείδιο του πυριτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 25% για να εξασφαλιστεί επαρκής αντιδραστικότητα (Αθανασόπουλος και συν., χ.χ). Από την άλλη, η ασβεστολιθική ιπτάμενη τέφρα περιέχει τόσο ποζολανικές όσο και υδραυλικές ιδιότητες, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να σκληρυνθεί ανεξάρτητα όταν αναμιγνύεται με νερό. Αποτελείται κυρίως από ενεργό οξείδιο του ασβεστίου (CaO), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), με ελάχιστη περιεκτικότητα σε ενεργό οξείδιο του ασβεστίου 10%. Εάν η περιεκτικότητα αυτή κυμαίνεται μεταξύ 10% και 15%, το υλικό πρέπει να περιέχει τουλάχιστον 25% ενεργό διοξείδιο του πυριτίου, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αντιδραστικότητα (Papadakis, 1999).

Όταν η περιεκτικότητα σε ενεργό οξείδιο του ασβεστίου υπερβαίνει το 15%, η αντοχή σε θλίψη της ιπτάμενης τέφρας πρέπει να φθάνει τουλάχιστον τα 10 MPa μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης. Για να εξασφαλιστεί η σωστή απόδοση, το υλικό πρέπει να αλέθεται σε καθορισμένη λεπτότητα, με 10-30% της μάζας του να συγκρατείται σε κόσκινο 40 μm . Ισχύουν επίσης απαιτήσεις σταθερότητας όγκου, διασφαλίζοντας ότι η διαστολή δεν υπερβαίνει τα 10 mm κατά την ανάμιξη με τσιμέντο CEM I (Xu et al, 1995).

Και οι δύο τύποι ιπτάμενης τέφρας πρέπει να πληρούν αυστηρά χημικά και φυσικά κριτήρια για να είναι κατάλληλοι για χρήση στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε θειικά άλατα (SO_3) πρέπει να παρακολουθείται προσεκτικά, καθώς οι υπερβολικές ποσότητες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση του τσιμέντου (Αθανασόπουλος και συν., χ.χ.).

Σύμφωνα με τους Mathapati et al. (2022), η ιπτάμενη τέφρα ως παραπροϊόν της καύσης άνθρακα σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διαθέτει αρκετές αξιοσημείωτες φυσικές ιδιότητες που την καθιστούν πολύτιμη σε διάφορες εφαρμογές. Πρώτον, το χρώμα της κυμαίνεται από λευκό γκρι έως πιο σκούρες αποχρώσεις, ανάλογα με την περιεκτικότητά της σε άνθρακα και τον τύπο του άνθρακα που χρησιμοποιείται. Η πυκνότητα της ιπτάμενης τέφρας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,54 και 0,86 g/cm³, υποδεικνύοντας την ελαφριά φύση της. Έχει υψηλή ειδική επιφάνεια, γενικά μεταξύ 300 έως 500 m²/kg, η οποία ενισχύει την αντιδραστικότητά της σε διάφορες εφαρμογές. Η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται κυρίως από σωματίδια σφαιρικού ή ακανόνιστου σχήματος, με μέσο μέγεθος σωματιδίων μεταξύ 10 μm και 50 μm. Αυτή η λεπτή σωματιδιακή φύση της επιτρέπει να γεμίζει κενά στο σκυρόδεμα και σε άλλα υλικά, συμβάλλοντας στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.

Η παρουσία άκαυστου άνθρακα μπορεί να επηρεάσει τον χρωματισμό του υλικού, ενώ η ποικίλη ορυκτολογική σύνθεση επηρεάζει τα φυσικά χαρακτηριστικά του. Στις κατασκευές, η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται ευρέως ως μερικό υποκατάστατο του τσιμέντου τύπου Πόρτλαντ, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και την αντοχή του σκυροδέματος και μειώνοντας παράλληλα το συνολικό βάρος. Οι ποζολανικές ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας επιτρέπουν να αντιδρά με υδροξείδιο του ασβεστίου παρουσία νερού, σχηματίζοντας έτσι πρόσθετες ενώσεις που βελτιώνουν τη δομική ακεραιότητα. Επιπλέον, η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται στη σταθεροποίηση του εδάφους, σε ελαφριά αδρανή και ως συστατικό σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας και γεωπολυμερή, αναδεικνύοντας περαιτέρω την ευελιξία της. Η ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας όχι μόνο βοηθά στη διαχείριση των αποβλήτων, αλλά συμβάλλει επίσης στις βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα που συνδέεται με την παραγωγή τσιμέντου.

2.1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Η ιπτάμενη τέφρα επίσης ταξινομείται σε κλάσης C και κλάσης F. Είναι δύο τύποι ιπτάμενης τέφρας, η οποία αποτελεί υποπροϊόν της καύσης κονιοποιημένου άνθρακα σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταξινόμηση της ιπτάμενης τέφρας βασίζεται κυρίως στη χημική της σύνθεση και στον τύπο του άνθρακα από τον οποίο παράγεται. Η ιπτάμενη τέφρα της κλάσης C παράγεται από την καύση λιγνίτη ή υποβιτουμινούχου άνθρακα και έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO), που συνήθως υπερβαίνει το 20%. Αυτή η υψηλότερη περιεκτικότητα σε ασβέστιο προσδίδει στην ιπτάμενη τέφρα κλάσης C αυτοτσιμεντοποιητικές ιδιότητες, που σημαίνει ότι μπορεί να αντιδράσει με το νερό για να σχηματίσει υλικά που μοιάζουν με τσιμέντο χωρίς να χρειάζεται να αναμιχθεί με τσιμέντο Πόρτλαντ.

Ως αποτέλεσμα, η ιπτάμενη τέφρα κλάσης C μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μερική αντικατάσταση του τσιμέντου στο σκυρόδεμα, ενισχύοντας την αντοχή, την ανθεκτικότητα και την επεξεργασιμότητα του υλικού. Είναι γνωστή για την ικανότητά της να παρέχει πρόωμη αντοχή σε μίγματα σκυροδέματος, καθιστώντας την πλεονεκτική σε

κατασκευαστικές εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη πήξη. Από την άλλη πλευρά, η ιπτάμενη τέφρα κλάσης F προέρχεται από την καύση ασφαλτούχου ή ανθρακικού άνθρακα, ο οποίος συνήθως έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου, συνήθως κάτω από 20%. Η ιπτάμενη τέφρα κλάσης F δεν διαθέτει σημαντικές ιδιότητες αυτοτσιμεντοποίησης- αντίθετα, βασίζεται στην παρουσία υδροξειδίου του ασβεστίου (Ca(OH)_2) από το τσιμέντο Πόρτλαντ για την έναρξη της ποζολανικής αντίδρασης.

Η αντίδραση αυτή λαμβάνει χώρα όταν η ιπτάμενη τέφρα κλάσης F αντιδρά με υδροξείδιο του ασβεστίου παρουσία νερού, σχηματίζοντας πρόσθετες τσιμεντοειδείς ενώσεις που συμβάλλουν στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου. Η ιπτάμενη τέφρα κλάσης F χρησιμοποιείται συχνά στο σκυρόδεμα για τη βελτίωση της επεξεργασιμότητας, τη μείωση της διαπερατότητας και την ενίσχυση της μακροπρόθεσμης αντοχής του υλικού. Τόσο η ιπτάμενη τέφρα κλάσης C όσο και η ιπτάμενη τέφρα κλάσης F έχουν ποζολανικές ιδιότητες, δηλαδή μπορούν να αντιδράσουν με τον ασβέστη (υδροξείδιο του ασβεστίου) για να σχηματίσουν ενώσεις που συμβάλλουν στη συνολική αντοχή του σκυροδέματος.

Η αντίδραση αυτή είναι επωφελής, καθώς ενισχύει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, μειώνει τη διαπερατότητά του και βελτιώνει την αντοχή σε χημικές επιθέσεις, αυξάνοντας έτσι την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Η επιλογή μεταξύ ιπτάμενης τέφρας κλάσης C και κλάσης F εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων αξίζει να αναφερθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του μίγματος σκυροδέματος, η διαθεσιμότητα των υλικών και οι τοπικές περιβαλλοντικές προδιαγραφές και περιβαλλοντικοί κανονισμοί. Η ιπτάμενη τέφρα κλάσης C προτιμάται συχνά για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη αύξηση της αντοχής, ενώ η ιπτάμενη τέφρα κλάσης F μπορεί να επιλεγεί για την ανώτερη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη αντοχής και τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Akbulut et al., 2024).

Η ενσωμάτωση ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα ως συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Με την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου Πόρτλαντ με ιπτάμενη τέφρα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που συνδέονται με την παραγωγή τσιμέντου μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Η τσιμεντοβιομηχανία συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές CO_2 , αντιπροσωπεύοντας περίπου το 8% των συνολικών εκπομπών. Η χρήση ιπτάμενης τέφρας όχι μόνο εξοικονομεί φυσικούς πόρους, αλλά προωθεί επίσης την ανακύκλωση και τη μείωση των αποβλήτων με τη χρήση ενός υποπροϊόντος που διαφορετικά θα απαιτούσε απόρριψη (Gianoncelli et al., 2013).

2.1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Οι Wattimena et al. (2017) εξηγούν ότι ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας επηρεάζονται από ένα συνδυασμό της χημικής σύνθεσης, των φυσικών χαρακτηριστικών, των ορυκτολογικών ιδιοτήτων και των συνθηκών υπό τις οποίες παράχθηκε. Η κατανόηση αυτών των

παραγόντων είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας στη σύνθεση γεωπολυμερών, καθώς υπαγορεύουν την απόδοση και την ποιότητα των υλικών που προκύπτουν. Αναλυτικά, στη μελέτη τους εξετάζουν διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τη σύνθεση και την απόδοση των γεωπολυμερών με βάση την ιπτάμενη τέφρα. Πρώτον, η χημική σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας παίζει καθοριστικό ρόλο. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C618, η ιπτάμενη τέφρα ταξινομείται σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση τα χημικά συστατικά της (Papadakis, 1999)

Η ιπτάμενη τέφρα της κλάσης F, που όπως αναφέρθηκε παράγεται συνήθως από την καύση ανθρακίτη ή ασφαλούχου άνθρακα, περιέχει τουλάχιστον 70% συνδυασμένο οξείδιο του πυριτίου (SiO_2), οξείδιο της αλουμίνας (Al_2O_3) και οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3). Αντίθετα, η ιπτάμενη τέφρα της κλάσης C, που προέρχεται από λιγνίτη ή υποβιτουμενικό άνθρακα, απαιτεί μόνο το 50% αυτών των οξειδίων. Η περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO) είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη, η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ασβέστιο στην ιπτάμενη τέφρα κλάσης F προτιμάται γενικά για τη σύνθεση γεωπολυμερών, καθώς τα υψηλότερα επίπεδα ασβεστίου μπορεί να παρεμποδίσουν τη διαδικασία πολυμερισμού και να αλλοιώσουν τη μικροδομή του υλικού που προκύπτει. Δεύτερον, οι φυσικές ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας, όπως η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων και η ειδική επιφάνεια, είναι ουσιώδεις για τον καθορισμό της αντιδραστικότητας και της αποτελεσματικότητάς της ως γεωπολυμερές υλικό (Xu et al, 1995).

Ένα λεπτότερο μέγεθος σωματιδίων συνήθως ενισχύει την αντιδραστικότητα της ιπτάμενης τέφρας, καθώς αυξάνει τη διαθέσιμη επιφάνεια για έκπλυση και επακόλουθη ενεργοποίηση κατά τη σύνθεση του γεωπολυμερούς. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα λεπτότερα σωματίδια ιπτάμενης τέφρας συμβάλλουν σε υψηλότερη αντοχή σε θλίψη στα γεωπολυμερή προϊόντα λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας που διευκολύνει την αποτελεσματικότερη διάλυση του διοξειδίου του πυριτίου και της αλουμίνας. Η ορυκτολογική σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας επηρεάζει επίσης τις ιδιότητές της. Η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται κυρίως από υαλώδη σωματίδια που σχηματίζονται κατά την ταχεία ψύξη της λιωμένης τέφρας άνθρακα. Η παρουσία κρυσταλλικών φάσεων εντός της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να επηρεάσει την αντιδραστικότητά της και την απόδοσή της σε εφαρμογές γεωπολυμερών. Η συνολική ορυκτολογική συμπεριφορά αξιολογείται συχνά με τεχνικές όπως η περίθλαση ακτίνων X (XRD), η οποία βοηθά στην κατανόηση της σύνθεσης των φάσεων που συμβάλλουν στην αντιδραστικότητα της ιπτάμενης τέφρας (Papadakis & Tsimas, 2002).

Επιπλέον, οι συνθήκες παραγωγής της ιπτάμενης τέφρας, όπως ο τύπος του άνθρακα που χρησιμοποιείται και οι διαδικασίες καύσης, επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά της. Οι διαφοροποιήσεις στη χημεία του άνθρακα οδηγούν σε διαφορές στις χημικές και φυσικές ιδιότητες της προκύπτουσας ιπτάμενης τέφρας. Η θερμοκρασία καύσης, η διάρκεια και ο ρυθμός ψύξης παίζουν επίσης ρόλο στον καθορισμό των υαλωδών και κρυσταλλικών φάσεων που υπάρχουν στην ιπτάμενη τέφρα (Xu et al, 1995).

Επιπλέον, οι Wattimena et al. (2017) υπογραμμίζουν τη σημασία του αλκαλικού ενεργοποιητή που χρησιμοποιείται στη σύνθεση γεωπολυμερών. Ο τύπος και η συγκέντρωση του υδροξειδίου των αλκαλικών μετάλλων, όπως το υδροξείδιο του νατρίου ή του καλίου, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος γεωπολυμερούς. Για παράδειγμα, οι διακυμάνσεις στη συγκέντρωση και τον τύπο του αλκαλικού διαλύματος μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα έκπλυσης ιόντων αργιλίου και πυριτίου από την ιπτάμενη τέφρα, η οποία επηρεάζει άμεσα τον σχηματισμό πηκτής και, κατά συνέπεια, τις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου γεωπολυμερούς.

2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΕΦΡΑΣ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα από τα βασικότερα παραπροϊόντα της καύσης άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Πρόκειται για ένα κονιορτοποιημένο, λεπτόκοκκο υλικό, που συλλέγεται από τα καυσαέρια που παράγονται κατά την καύση κονιορτοποιημένου λιθάνθρακα ή λιγνίτη. Η διαδικασία παραγωγής της τέφρας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη λειτουργία των θερμοηλεκτρικών μονάδων και παρουσιάζει σημαντικό τεχνολογικό, περιβαλλοντικό και ενεργειακό ενδιαφέρον (Papadakis, 2000). Κατά την καύση του άνθρακα, τα οργανικά συστατικά του καίγονται και μετατρέπονται σε θερμική ενέργεια, ενώ τα ανόργανα συστατικά, τα οποία δεν καίγονται, θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, φτάνοντας ακόμα και τους 1500°C. Υπό αυτές τις συνθήκες, τα ανόργανα υλικά μερικώς λιώνουν και αποκτούν μια υαλώδη ή ημι-κρυσταλλική μορφή. Ένα μέρος αυτών των υλικών ανεβαίνει μαζί με τα καυσαέρια στην έξοδο του λέβητα, σχηματίζοντας την ιπτάμενη τέφρα, ενώ το υπόλοιπο κατακάθεται στον πυθμένα του λέβητα και σχηματίζει την πυθμενική τέφρα (Ahmaruzzaman, 2010).

Η συλλογή της ιπτάμενης τέφρας πραγματοποιείται με την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού των καυσαερίων. Τα πιο συνήθη μέσα συλλογής είναι οι ηλεκτροστατικοί συλλέκτες, οι οποίοι βασίζονται στην αρχή της ηλεκτρικής φόρτισης των σωματιδίων, τα οποία στη συνέχεια έλκονται και προσκολλώνται σε μεταλλικές επιφάνειες που φέρουν αντίθετο φορτίο (Papadakis, 199).

Τα σακκόφιλτρα, από την άλλη πλευρά, αποτελούν ένα είδος μηχανικού φίλτρου που παγιδεύει τα σωματίδια της τέφρας σε υφασμάτινες επιφάνειες. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η εκπομπή σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και επιτυγχάνεται η ανάκτηση της τέφρας για περαιτέρω χρήση ή διάθεση. Η ποσότητα της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του άνθρακα, το μέγεθος του σταθμού παραγωγής, η θερμοκρασία καύσης και η απόδοση των φίλτρων. Για παράδειγμα, η καύση λιθάνθρακα παράγει διαφορετική ποιότητα και ποσότητα τέφρας σε σχέση με την καύση λιγνίτη, ο οποίος περιέχει περισσότερη τέφρα ανά τόνο καυσίμου. Σε γενικές γραμμές, από την καύση ενός τόνου λιγνίτη προκύπτουν περίπου 100-200 κιλά ιπτάμενης τέφρας (Xu et al, 1995).

Η χημική σύσταση της τέφρας ποικίλλει, αλλά συνήθως περιέχει σε υψηλά ποσοστά διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), αλουμίνα (Al₂O₃), οξείδιο του σιδήρου (Fe₂O₃), ασβέστιο

(CaO) και μαγνήσιο (MgO). Η περιεκτικότητα των συστατικών αυτών καθορίζει και τις ιδιότητες της τέφρας, όπως τη δραστικότητα, την ποζολανική συμπεριφορά, τη σταθερότητα και τη δυνατότητα αξιοποίησης της. Η τέφρα με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (τύπου C) παρουσιάζει πιο έντονη υδραυλική συμπεριφορά, ενώ η τέφρα με χαμηλό ασβέστιο (τύπου F) έχει κυρίως ποζολανικές ιδιότητες. Η μορφολογία της ιπτάμενης τέφρας έχει εξίσου μεγάλη σημασία. Τα σωματίδια είναι κατά κύριο λόγο σφαιρικά και έχουν μέγεθος μικρότερο των 100 μικρομέτρων. Αυτή η σφαιρική μορφή προσδίδει ευκολία στην ανάμειξη με άλλα υλικά και βελτιώνει τη ρεολογία των μιγμάτων στα οποία ενσωματώνεται, όπως το σκυρόδεμα ή τα κονιάματα (Ahmaruzzaman, 2010).

Η μη ορθή απόρριψη ή αποθήκευση της τέφρας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ρύπανσης του εδάφους και των υδάτων, λόγω της ενδεχόμενης έκπλυσης βαρέων μετάλλων και τοξικών στοιχείων. Επιπλέον, η διάχυση τέφρας στον αέρα χωρίς φιλτράρισμα συμβάλλει στη ρύπανση της ατμόσφαιρας με αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία έχουν συνδεθεί με προβλήματα υγείας. Για τον λόγο αυτό, η νομοθεσία επιβάλλει αυστηρούς κανονισμούς τόσο για την εκπομπή σωματιδίων όσο και για την τελική διάθεση ή αξιοποίηση της τέφρας. Η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας συνιστά μια σημαντική περιβαλλοντική και οικονομική πρακτική. Αντί να απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής, η τέφρα μπορεί να αξιοποιηθεί ως δευτερογενές υλικό σε διάφορες εφαρμογές, κυρίως στον κλάδο των δομικών υλικών (Papadakis, 2000).

Η χρήση της ως υποκατάστατο του τσιμέντου σε σκυροδέματα και τσιμεντοκονίες συμβάλλει στη μείωση του κόστους παραγωγής, στην εξοικονόμηση πρώτων υλών και στη μείωση των εκπομπών CO₂. Επιπλέον, η τέφρα χρησιμοποιείται στην οδοποιία, στην αποκατάσταση εδαφών, στην κατασκευή φραγμάτων τέφρας και ως υλικό πλήρωσης σε έργα πολιτικού μηχανικού (Ahmaruzzaman, 2010).

Η παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας είναι στενά συνδεδεμένη με τη χρήση του άνθρακα για παραγωγή ενέργειας. Καθώς όμως πολλές χώρες στρέφονται πλέον σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και απομακρύνονται από τα ορυκτά καύσιμα, η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζει μείωση. Το γεγονός αυτό έχει διπλή ανάγνωση: αφενός συντελεί στη μείωση των ρύπων, αφετέρου όμως περιορίζει τη διαθεσιμότητα ενός δευτερογενούς υλικού που έχει ενσωματωθεί σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό, ερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης αποθεμάτων τέφρας που βρίσκονται ήδη αποθηκευμένα σε τέφροσωρούς (Papadakis, 1999).

Συνοψίζοντας, η παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας είναι μια σύνθετη διαδικασία που συνδυάζει τη θερμική μετατροπή του άνθρακα με τεχνολογίες καθαρισμού των καυσαερίων. Το υλικό που παράγεται διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και πολλαπλές δυνατότητες εφαρμογής, γεγονός που το καθιστά πολύτιμο βιομηχανικό παραπροϊόν. Η ορθή διαχείριση και αξιοποίηση της τέφρας, σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική ευθύνη, συμβάλλει τόσο στην αειφόρο ανάπτυξη όσο και στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος της ενεργειακής παραγωγής. (Papadakis & Tsimas, 2002)

2.3 ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ – ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Η ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα είναι ένα παραπροϊόν που προκύπτει από την καύση κονιοποιημένου άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Συλλέγεται κυρίως μέσω ηλεκτροστατικών φίλτρων, πριν τα αέρια εκπομπής απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Σε αντίθεση με την κατεργασμένη μορφή, η ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα δεν υφίσταται καμία περαιτέρω φυσική ή χημική επεξεργασία μετά τη συλλογή της, γεγονός που καθορίζει τις ιδιότητες και τους περιορισμούς της. Το κύριο χαρακτηριστικό της ακατέργαστης τέφρας είναι η μεγάλη ετερογένεια στη χημική της σύσταση και στη μορφολογία των σωματιδίων (Papadakis, 2000).

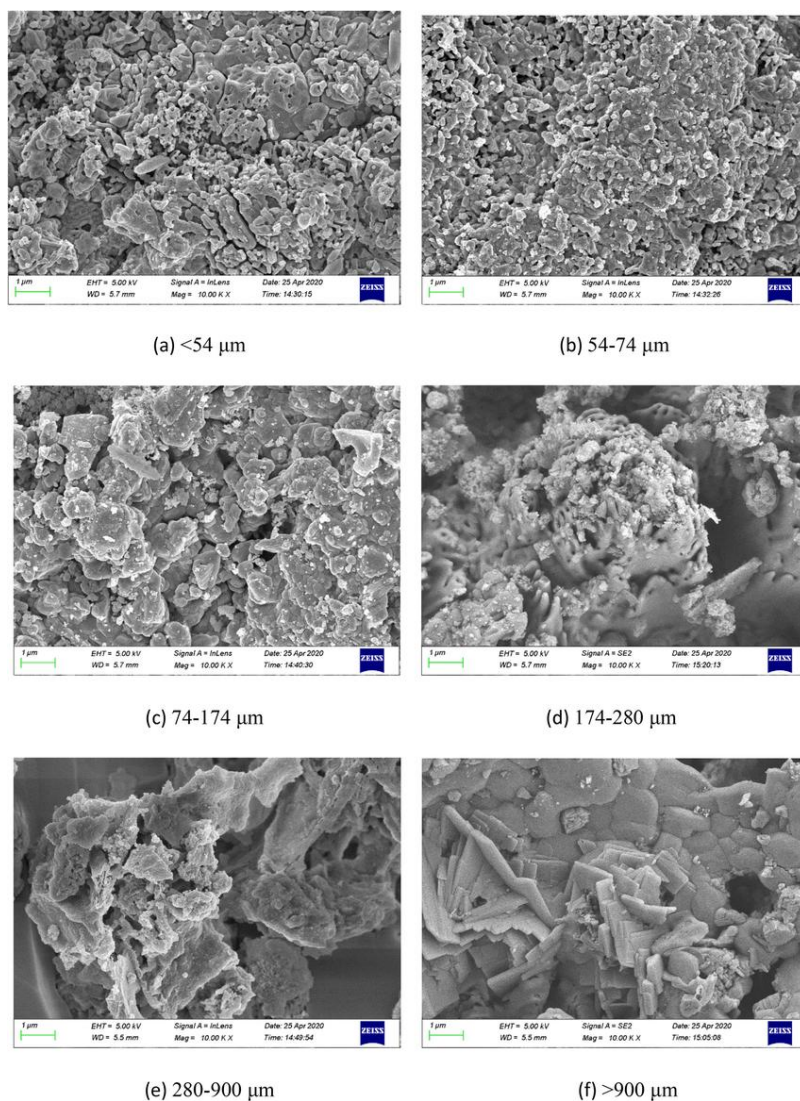
Συχνά περιέχει σημαντικά ποσοστά άκαυστων οργανικών υλικών, κυρίως υπό μορφή λεπτών σωματιδίων άνθρακα, τα οποία εκφράζονται ως ποσοστό απώλειας κατά την πυρά. Υψηλές τιμές LOI μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την εργασιμότητα και τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, κυρίως εξαιτίας της απορρόφησης νερού. Επιπλέον, η κοκκομετρική κατανομή της ακατέργαστης τέφρας είναι συχνά ακανόνιστη, με την παρουσία χονδρόκοκκων ή και πορώδων σωματιδίων που δεν συμβάλλουν στην ποζολανική δραστηριότητα και μπορεί να λειτουργήσουν ως αδρανή στο μείγμα του σκυροδέματος. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε σωματίδια με χαμηλό βαθμό υάλωσης περιορίζει τη δυνατότητα συμμετοχής της τέφρας σε ποζολανικές αντιδράσεις με το υδροξείδιο του ασβεστίου, οι οποίες είναι σημαντικές για τη μακροχρόνια ενίσχυση της αντοχής του σκυροδέματος (Xu et al, 1995).

Παρά τα μειονεκτήματά της, η ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, κυρίως σε δευτερεύουσες ή μη φέρουσες κατασκευές, όπου δεν απαιτείται υψηλή αντοχή ή ανθεκτικότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να αποτελέσει χρήσιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή άλλων δομικών προϊόντων, όπως π.χ. σε συμπίεσμένα πλινθώματα, προκατασκευασμένα στοιχεία μικρής αντοχής ή ως υλικό για αποκατάσταση εδαφών. Ωστόσο, η χρήση της ακατέργαστης τέφρας απαιτεί ιδιαίτερο έλεγχο και αξιολόγηση, τόσο από πλευράς φυσικοχημικών χαρακτηριστικών όσο και από πλευράς επιδόσεων στο τελικό προϊόν. Είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται δοκιμές προσδιορισμού της ποζολανικής δραστηριότητας, του LOI, της κοκκομετρίας, καθώς και της παρουσίας ανεπιθύμητων στοιχείων, όπως βαρέων μετάλλων. Ορισμένες φορές, η ακατέργαστη τέφρα υφίσταται περιορισμένη επεξεργασία, ώστε να βελτιωθούν ορισμένες ιδιότητες χωρίς να καταταγεί τυπικά ως κατεργασμένη (Papadakis & Tsimas, 2002).

Σε γενικές γραμμές, η ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα αποτελεί μια οικονομικά ελκυστική λύση, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει τεχνικές προκλήσεις λόγω της αστάθειας στη σύστασή της και της περιορισμένης αντιδραστηριότητάς της. Η χρήση της είναι εφικτή σε επιλεγμένες περιπτώσεις, πάντα με βάση την τεκμηριωμένη αξιολόγηση των ιδιοτήτων της και σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής (Ahmaruzzaman, 2010).

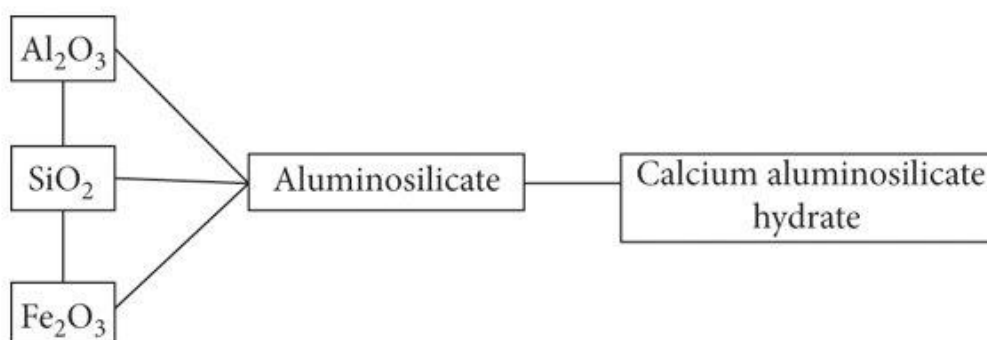
Αντίθετα με την ακατέργαστη μορφή, η κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα αποτελεί προϊόν, που έχει υποστεί σειρά φυσικών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, χημικών επεξεργασιών με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας και της καταλληλότητάς της για χρήση σε δομικά υλικά

και κυρίως στο σκυρόδεμα. Οι επεξεργασίες αυτές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την κοσκίνιση, για την απομάκρυνση των χονδρόκοκκων σωματιδίων, την ταξινόμηση κατά μέγεθος, ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη κοκκομετρία, και την απομάκρυνση ακαθαρσιών, όπως άκαυστοι άνθρακες ή άλλα ανεπιθύμητα υλικά που μειώνουν την ποιότητα του προϊόντος. Σε πολλές περιπτώσεις, εφαρμόζεται και θερμική ή φυσικοχημική επεξεργασία για τη μείωση του ποσοστού του άκαυστου άνθρακα (LOI), το οποίο επηρεάζει αρνητικά τη συμβατότητα με χημικά πρόσμικτα και την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Η ελαχιστοποίηση του LOI είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής απαίτησης, όπου απαιτείται προβλεψιμότητα και σταθερότητα στη συμπεριφορά του σκυροδέματος (Papadakis, 2000).



Εικόνα 3: Δείγματα ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικές κοκκομετρίες.

Ως αποτέλεσμα αυτών των επεμβάσεων, η κατεργασμένη τέφρα αποκτά ομοιογενή φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά, κάτι που την καθιστά υλικό υψηλής ποιότητας. Η χημική της σύσταση σταθεροποιείται και οι ποζολανικές της ιδιότητες ενισχύονται, δηλαδή η ικανότητά της να αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου και να σχηματίζει δευτερογενείς φάσεις τσιμέντου (π.χ. C-S-H) που αυξάνουν τη μακροχρόνια αντοχή και πυκνότητα του σκυροδέματος. Παράλληλα, επιτυγχάνεται βελτιωμένη εργασιμότητα, μείωση της υδατοπερατότητας, αυξημένη χημική ανθεκτικότητα (π.χ. σε θειικά) και καλύτερη αντοχή σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις (Αγαθαγγελίδης, 1999).



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση της ποζολανικής αντίδρασης με παραγωγή συγκολλητικών ενώσεων (C-S-H).

Η κατεργασμένη τέφρα συμμορφώνεται συνήθως με διεθνή πρότυπα όπως το EN 450-1 (για την Ευρώπη) και το ASTM C618 (για τις ΗΠΑ), τα οποία καθορίζουν τις απαιτήσεις σε φυσικοχημικές ιδιότητες, μέγιστα επιτρεπτά όρια LOI, ποσοστά δραστικών συστατικών, αντοχή, και ποιοτικούς ελέγχους. Αυτή η τυποποίηση επιτρέπει την ασφαλή χρήση της σε δομικά έργα μεγάλης σημασίας, όπως γέφυρες, φράγματα, θεμελιώσεις και άλλα έργα υποδομής όπου απαιτείται μακροχρόνια απόδοση και αντοχή. Η συμβολή της κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας στην αειφορία είναι επίσης σημαντική. Ως ανακυκλωμένο υλικό, μειώνει την ανάγκη για τσιμέντο Πόρτλαντ, του οποίου η παραγωγή είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και ρυπογόνια (Xu et al, 1995).

Επιπλέον, η ενσωμάτωσή της σε τσιμεντοειδή προϊόντα επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής των κατασκευών και περιορίζει τις ανάγκες συντήρησης (Xu et al, 1995).

Κατά συνέπεια, η επιλογή μεταξύ κατεργασμένης και ακατέργαστης ιπτάμενης τέφρας εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής. Η κατεργασμένη τέφρα, χάρη στη σταθερότητα, την πιστοποιημένη ποιότητα και την ενισχυμένη ποζολανική δραστηριότητα που διαθέτει, αποτελεί την προτιμώμενη λύση για δομικά έργα υψηλής απαίτησης. Αντιθέτως, η ακατέργαστη τέφρα, παρότι μπορεί να έχει εφαρμογές σε λιγότερο κρίσιμα έργα, παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, και η χρήση της απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση, δοκιμές και έλεγχο. Η τελική απόφαση θα πρέπει να βασίζεται σε τεχνικά κριτήρια, περιβαλλοντικούς στόχους και οικονομικούς παράγοντες (Ahmaruzzaman, 2010).

2.4 ΕΥΡΩΠΑΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

2.4.1 ΕΥΡΩΠΑΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Η ιπτάμενη τέφρα, ως παραπροϊόν της καύσης άνθρακα, έχει αναδειχθεί σε πολύτιμο υλικό στον τομέα των κατασκευών, κυρίως λόγω των ποζολανικών της ιδιοτήτων. Η αξιοποίησή της, ωστόσο, απαιτεί την τήρηση συγκεκριμένων προτύπων για να διασφαλιστεί η ποιότητα και η ασφάλεια των κατασκευών. Στην Ευρώπη, το βασικό πρότυπο που καθορίζει τις απαιτήσεις για την ιπτάμενη τέφρα είναι το EN 450-1:2012, ενώ στην Ελλάδα εφαρμόζεται το αντίστοιχο ΕΛΟΤ EN 450-1. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450-1:2012, με πλήρη τίτλο «Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα – Μέρος 1: Ορισμός, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης», αποτελεί το θεμέλιο πλαίσιο για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως πρόσθετου υλικού στο σκυρόδεμα (Papadakis, 1999).

Το πρότυπο αυτό ενσωματώνει την τεχνική και επιστημονική γνώση που έχει αποκτηθεί με την πάροδο δεκαετιών και διαμορφώνει έναν κοινό κανόνα ποιότητας για τις ευρωπαϊκές χώρες (Xu et al, 1995).

Η εφαρμογή του διασφαλίζει ότι η ιπτάμενη τέφρα πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις, ώστε να είναι ασφαλής και αποτελεσματική για δομικές εφαρμογές, επιτρέποντας ταυτόχρονα την περιβαλλοντικά υπεύθυνη αξιοποίηση ενός βιομηχανικού παραπροϊόντος. Πρωταρχικός στόχος του EN 450-1:2012 είναι η διασφάλιση της ομοιομορφίας και της αξιοπιστίας της ιπτάμενης τέφρας που προορίζεται για χρήση στο σκυρόδεμα. Ειδικότερα, το πρότυπο καλύπτει τη σιλιούχα ιπτάμενη τέφρα, δηλαδή εκείνη που προέρχεται από την καύση λιγνίτη ή λιθάνθρακα και περιέχει υψηλά ποσοστά διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Αυτό το είδος τέφρας εμφανίζει αξιοσημείωτες ποζολανικές ιδιότητες, δηλαδή αντιδρά χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστίου που απελευθερώνεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, δημιουργώντας επιπλέον ενώσεις με συγκολλητικές ικανότητες, οι οποίες ενισχύουν τη μηχανική αντοχή και τη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος (Gianoncelli et al., 2013).

Το EN 450-1:2012 προβλέπει ένα σύνολο χημικών και φυσικών απαιτήσεων που πρέπει να πληρούνται από την ιπτάμενη τέφρα ώστε να είναι κατάλληλη για χρήση. Σε χημικό επίπεδο, το άθροισμα των τριών βασικών οξειδίων – SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 – πρέπει να είναι τουλάχιστον 70% κατά βάρος. Επιπλέον, το περιεχόμενο σε θειικό ανυδρίτη (SO_3) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3%, ενώ η περιεκτικότητα σε μη καμένο άνθρακα, η οποία προσδιορίζεται μέσω της απώλειας κατά την πυρά (LOI), πρέπει να είναι μικρότερη από 5%. Η χαμηλή τιμή LOI διασφαλίζει ότι η τέφρα δεν περιέχει σημαντικά ποσά οργανικών υπολειμμάτων, τα οποία θα μπορούσαν να παρεμποδίσουν τη φυσική και χημική σταθερότητα του σκυροδέματος (Ahmaruzzaman, 2010).

Στο πεδίο των φυσικών ιδιοτήτων, το πρότυπο απαιτεί μεταξύ άλλων τον προσδιορισμό της λεπτότητας, της ειδικής πυκνότητας, της δραστηρότητας και της σταθερότητας της τέφρας. Η λεπτότητα της τέφρας, που σχετίζεται άμεσα με την επιφάνεια επαφής των κόκκων με το νερό και το τσιμέντο, έχει καθοριστική σημασία για τη συνολική δραστηρότητα του μίγματος (Xu et al., 1995).

Ένας ακόμη σημαντικός δείκτης είναι ο δείκτης ποζολανικής δραστηριότητας, ο οποίος προσδιορίζεται εργαστηριακά μέσω δοκιμών πίεσης κονιαμάτων με και χωρίς τέφρα, και χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση ότι η τέφρα προσφέρει ουσιαστική συμβολή στη μακροχρόνια αντοχή του σκυροδέματος (Mathapati et al., 2022).

Το EN 450-1 δεν περιορίζεται μόνο στις προδιαγραφές υλικών, αλλά προχωρά ένα βήμα παραπέρα, απαιτώντας την εγκαθίδρυση συστημάτων ποιοτικού ελέγχου και τεκμηρίωσης από τους παραγωγούς. Ο ποιοτικός έλεγχος βασίζεται στην αρχή του αυτοελέγχου, όπου κάθε παραγωγική μονάδα είναι υποχρεωμένη να διενεργεί τακτικούς ελέγχους στις παρτίδες τέφρας που παράγει. Αυτοί οι έλεγχοι περιλαμβάνουν δειγματοληψία, χημική ανάλυση, φυσικομηχανικές δοκιμές και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα προκαθορισμένα όρια του προτύπου. Η τεκμηρίωση της συμμόρφωσης κάθε παρτίδας είναι υποχρεωτική, και η διάθεση στην αγορά προϊόντων που δεν πληρούν τις απαιτήσεις απαγορεύεται αυστηρά (Ahmaruzzaman, 2010).

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η σύνδεση του EN 450-1 με το πρότυπο EN 206, το οποίο καθορίζει τις γενικές απαιτήσεις για το σκυρόδεμα. Μέσω αυτής της διασύνδεσης, διασφαλίζεται η συνοχή ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των επιμέρους συστατικών και τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος, δημιουργώντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου ποιότητας. Το EN 450-1 λειτουργεί ως το πρότυπο αναφοράς για την αποδοχή της ιπτάμενης τέφρας ως πρόσθετου τύπου II στο σκυρόδεμα, επιτρέποντας την ευρύτερη αξιοποίησή της με εγγυήσεις ασφαλείας και απόδοση (Ahmaruzzaman, 2010). Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρότυπο EN 450-1 έχει συμβάλει σημαντικά στη βιώσιμη διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων, προωθώντας την κυκλική οικονομία στον κατασκευαστικό τομέα. Μέσω της ενσωμάτωσης της τέφρας σε μίγματα σκυροδέματος, μειώνεται η ανάγκη για πρωτογενείς πρώτες ύλες, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται η ποσότητα των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Με αυτόν τον τρόπο, το EN 450-1 δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνικό εγχειρίδιο προδιαγραφών, αλλά ένα εργαλείο βιώσιμης ανάπτυξης (Mathapati et al., 2022).

Επιπλέον, υποστηρίζεται ότι η εφαρμογή του EN 450-1:2012, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο (όπως συμβαίνει με την υιοθέτησή του στην Ελλάδα μέσω του ΕΛΟΤ), ενισχύει την εμπιστοσύνη των φορέων της αγοράς και των τελικών χρηστών (Wattimena et al., 2017).

Οι σαφείς απαιτήσεις, οι αυστηροί έλεγχοι και η τεκμηρίωση συμμόρφωσης διαμορφώνουν ένα αξιόπιστο περιβάλλον για την ασφαλή ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας σε σύγχρονες, τεχνικά απαιτητικές και περιβαλλοντικά υπεύθυνες εφαρμογές. Με βάση τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι το EN 450-1:2012 δεν περιορίζεται σε θεωρητικές προσεγγίσεις, αλλά προσφέρει ένα απόλυτα εφαρμόσιμο πλαίσιο για την ασφαλή, αποδοτική και οικολογική αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην κατασκευή σκυροδέματος, συμβάλλοντας ενεργά στην επίτευξη υψηλής ποιότητας και βιώσιμης δόμησης.

Η ιπτάμενη τέφρα, παραπροϊόν της καύσης άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, έχει αναδειχθεί σε πολύτιμο υλικό στον τομέα των κατασκευών, κυρίως λόγω των ποζολανικών της ιδιοτήτων. Η αξιοποίησή της, ωστόσο, απαιτεί την τήρηση συγκεκριμένων προτύπων για να διασφαλιστεί η ποιότητα και η ασφάλεια των κατασκευών. Στην Ευρώπη, το βασικό πρότυπο που καθορίζει τις απαιτήσεις για την ιπτάμενη τέφρα είναι το EN 450-1:2012, ενώ στην Ελλάδα εφαρμόζεται το αντίστοιχο ΕΛΟΤ EN 450-1. Το πρότυπο EN 450-1:2012 απαιτεί την εφαρμογή συστημάτων αυτοελέγχου (autocontrol) από τους παραγωγούς της ιπτάμενης τέφρας. Αυτό περιλαμβάνει τη δειγματοληψία και τον έλεγχο των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της τέφρας σε τακτά χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, απαιτείται η τήρηση αρχείων και η παροχή δηλώσεων συμμόρφωσης για κάθε παρτίδα προϊόντος (Wattimena et al., 2022).

2.4.2 ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Ο ΕΛΟΤ EN 450-1 αποτελεί την ελληνική εναρμόνιση του ευρωπαϊκού προτύπου EN 450-1:2012 και αφορά την "Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα - Ορισμοί, προδιαγραφές και συμμόρφωση". Το πρότυπο αυτό καθορίζει τις τεχνικές απαιτήσεις για την ιπτάμενη τέφρα, ένα υλικό που προέρχεται κυρίως από την καύση λιγνίτη και χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή σκυροδέματος ως ποζολανικό υλικό. Η εφαρμογή του στην Ελλάδα είναι υποχρεωτική, καθώς εξασφαλίζει την ποιότητα και την ασφάλεια των κατασκευών που χρησιμοποιούν σκυρόδεμα. Η ιπτάμενη τέφρα εντάσσεται στα πρόσμικτα του σκυροδέματος, και η σωστή χρήση της βελτιώνει τις ιδιότητες του υλικού, όπως η εργασιμότητα, η ανθεκτικότητα και η μακροχρόνια μηχανική του συμπεριφορά (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Επιπλέον, η χρήση ιπτάμενης τέφρας έχει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς συμβάλλει στην ανακύκλωση βιομηχανικών αποβλήτων και στη μείωση της χρήσης τσιμέντου, του οποίου η παραγωγή συνεπάγεται υψηλές εκπομπές CO₂. Για να αποδώσει τα προσδοκώμενα οφέλη, όμως, η τέφρα πρέπει να πληροί συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 450-1. Το πρότυπο ορίζει φυσικοχημικές παραμέτρους όπως η περιεκτικότητα σε πυριτικό και αργιλικό οξύ, η απώλεια κατά την πύρωση, η περιεκτικότητα σε θειικά και η ενεργότητα του υλικού. Επιπλέον, καθορίζονται μέθοδοι ελέγχου και απαιτήσεις για την ομοιογένεια του προϊόντος, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή ποιότητα καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγής του. Οι παραγωγοί ιπτάμενης τέφρας είναι υποχρεωμένοι να εφαρμόζουν σύστημα εσωτερικού ελέγχου παραγωγής, ενώ παράλληλα διενεργούνται τακτικοί εξωτερικοί έλεγχοι από αρμόδιους φορείς (Papadakis, 2000).

Στην Ελλάδα, η αρμοδιότητα εποπτείας της εφαρμογής του ΕΛΟΤ EN 450-1 ανήκει σε κρατικούς και διαπιστευμένους φορείς, όπως ο ΕΛΟΤ και το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών. Οι έλεγχοι αυτοί διασφαλίζουν ότι η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιείται πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές και ότι το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με αυτή έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αντοχής και ανθεκτικότητας. Επιπλέον, οι μηχανικοί και

τα τεχνικά γραφεία είναι υποχρεωμένοι να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις του προτύπου κατά τη μελέτη και κατασκευή τεχνικών έργων (Papadakis & Tsimas, 2002) Η υποχρεωτική εφαρμογή του ΕΛΟΤ EN 450-1 αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας στον τομέα των κατασκευών στην Ελλάδα. Συνδυάζει την τεχνική επάρκεια με την περιβαλλοντική ευθύνη, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των έργων και την ορθολογική αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Μέσα από τη συνεχή παρακολούθηση και τις διαδικασίες συμμόρφωσης, το πρότυπο αυτό συντελεί ουσιαστικά στην αναβάθμιση της κατασκευαστικής δραστηριότητας στη χώρα, προστατεύοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον και το δημόσιο συμφέρον (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Πρέπει να επισημανθεί ότι η τήρηση των ευρωπαϊκών και ελληνικών προτύπων για την ιπτάμενη τέφρα θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των κατασκευών (Papadakis & Tsimas, 2002).

Η συμμόρφωση με τα πρότυπα EN 450-1:2012 και ΕΛΟΤ EN 450-1 διασφαλίζει ότι η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, συμβάλλοντας έτσι στη βιώσιμη και ασφαλή ανάπτυξη του κατασκευαστικού τομέα (Αγαθαγγελίδης, 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

3.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ

Η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας, που παράγεται στην Ελλάδα, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αξιοποίησή της σε δομικές εφαρμογές, ιδιαίτερα ως ποζολανικό υλικό στο σκυρόδεμα. Η τέφρα αυτή προέρχεται κυρίως από την καύση λιγνίτη σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, όπως αυτοί της Πτολεμαΐδας και της Μεγαλόπολης, και παρουσιάζει χαρακτηριστικά που την καθιστούν κατάλληλη για χρήση σε τσιμεντοειδή προϊόν. Η ελληνική ιπτάμενη τέφρα χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) και οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3). Συγκεκριμένα, το SiO_2 κυμαίνεται μεταξύ 35% και 60%, το Al_2O_3 μεταξύ 15% και 30%, και το Fe_2O_3 μεταξύ 5% και 15% (Paya et al., 2001).

Αυτά τα οξείδια συμβάλλουν στις ποζολανικές ιδιότητες της τέφρας, επιτρέποντας την αντίδρασή της με το υδροξείδιο του ασβεστίου κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπλέον συγκολλητικών ενώσεων που ενισχύουν τη μηχανική αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον, η τέφρα περιέχει σημαντικά ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου (CaO), που κυμαίνονται από 10% έως 30%, ανάλογα με την προέλευση του λιγνίτη. Η παρουσία του CaO προσδίδει στην τέφρα υδραυλικές ιδιότητες, ενισχύοντας περαιτέρω τη συμβολή της στη σκλήρυνση του σκυροδέματος (Papadakis, 2000).

Πέραν των κύριων οξειδίων, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα περιέχει και άλλα συστατικά σε μικρότερες ποσότητες, όπως μαγνήσιο (MgO), νάτριο (Na_2O), κάλιο (K_2O) και διοξείδιο του θείου (SO_2). Η περιεκτικότητα σε SO_2 είναι σημαντική, καθώς υψηλά επίπεδα μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, προκαλώντας διαστολές και ρωγμές. Τα ιχνοστοιχεία, όπως αρσενικό (As), χρώμιο (Cr), μόλυβδος (Pb) και υδράργυρος (Hg), βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, συνήθως κάτω από τα επιτρεπτά όρια που καθορίζονται από τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Ωστόσο, η παρουσία τους απαιτεί συνεχή παρακολούθηση, ιδιαίτερα όταν η τέφρα προορίζεται για χρήση σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες εφαρμογές (Wattimena et al., 2017).

Η ορυκτολογική ανάλυση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας αποκαλύπτει την παρουσία κυρίως άμορφου υάλου, που είναι υπεύθυνο για τις ποζολανικές ιδιότητες της τέφρας (Paya et al., 2001).

Επιπλέον, ανιχνεύονται κρυσταλλικά ορυκτά όπως χαλαζίας (SiO_2), αιματίτης (Fe_2O_3), ασβεστίτης (CaCO_3) και ανυδρίτης (CaSO_4). Η αναλογία μεταξύ άμορφου και κρυσταλλικού υλικού επηρεάζει την αντιδραστικότητα της τέφρας και, κατά συνέπεια, την απόδοσή της στο σκυρόδεμα. Η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με την περιοχή παραγωγής. Για παράδειγμα, η τέφρα από την Πτολεμαΐδα είναι πλουσιότερη σε CaO , ενώ αυτή από τη Μεγαλόπολη περιέχει υψηλότερα ποσοστά SiO_2 και Al_2O_3 . Αυτές οι διαφορές οφείλονται στη σύσταση του λιγνίτη

που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, καθώς και στις συνθήκες καύσης στους αντίστοιχους σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Papadakis & Tsimas, 2002).

Η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας επηρεάζει άμεσα τις ιδιότητες του σκυροδέματος στο οποίο ενσωματώνεται. Η υψηλή περιεκτικότητα σε SiO_2 και Al_2O_3 ενισχύει τις ποζολανικές αντιδράσεις, βελτιώνοντας τη μακροχρόνια αντοχή και τη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος. Παράλληλα, το CaO συμβάλλει στην αρχική σκλήρυνση, προσδίδοντας ταχύτερη ανάπτυξη αντοχής. Ωστόσο, η παρουσία ορισμένων ιχνοστοιχείων και η πιθανή αστάθεια ορισμένων συστατικών απαιτούν προσεκτική αξιολόγηση και έλεγχο πριν από τη χρήση της τέφρας σε κατασκευαστικά έργα. Η συμμόρφωση με τα πρότυπα EN 450-1:2012 και ΕΛΟΤ EN 450-1 είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας των κατασκευών (Xu et al., 19950).

Πέρα από αυτά, υποστηρίζεται ότι η ελληνική ιπτάμενη τέφρα, με τη χαρακτηριστική της χημική σύσταση, αποτελεί πολύτιμο υλικό για τη βιομηχανία κατασκευών, προσφέροντας περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη μέσω της ανακύκλωσης ενός βιομηχανικού παραπροϊόντος. Η κατανόηση και ο έλεγχος της χημικής της σύστασης είναι κρίσιμα για την ασφαλή και αποτελεσματική ενσωμάτωσή της σε δομικά υλικά, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος (Papadakis, 1999).

3.2 ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

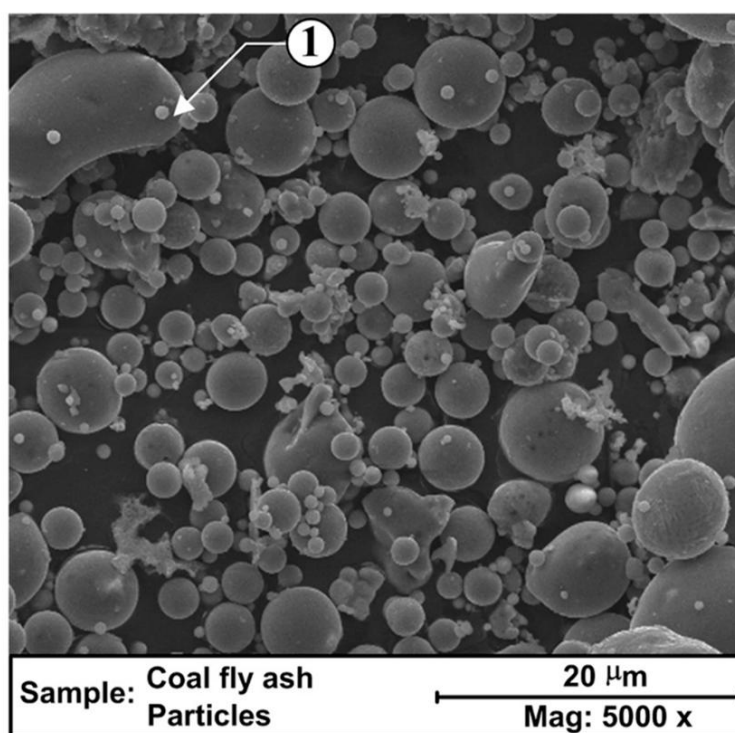
Η φυσική σύσταση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας αποτελεί βασικό παράγοντα που καθορίζει την απόδοσή της σε εφαρμογές δομικών υλικών, ιδιαίτερα στο σκυρόδεμα. Η ιπτάμενη τέφρα παράγεται από τη λεπτή σκόνη που συλλέγεται στα φίλτρα των καμινάδων των θερμοηλεκτρικών σταθμών που χρησιμοποιούν λιγνίτη ως καύσιμο (Li et al., 2000).

Στην Ελλάδα, η κύρια παραγωγή ιπτάμενης τέφρας προέρχεται από τους σταθμούς της Πτολεμαΐδας και της Μεγαλόπολης, όπου το καύσιμο και οι συνθήκες καύσης επηρεάζουν καθοριστικά τα φυσικά χαρακτηριστικά της τέφρας (Papadakis, 1999).

Αρχικά, η κοκκομετρική κατανομή της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζει υψηλή λεπτότητα, με το μέγεθος των σωματιδίων να κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 1 και 100 μικρομέτρων. Η λεπτότητα αυτή είναι σημαντική καθώς επηρεάζει την επιφάνεια επαφής της τέφρας με τα άλλα συστατικά του σκυροδέματος, αυξάνοντας την ποζολανική της δραστηριότητα. Στην πράξη, η λεπτότητα μετριέται με τη χρήση διαφόρων μεθόδων όπως η ανάλυση με κοσκίνισμα και η φασματομετρία λέιζερ (Gianoncelli et al, 2013). Σημειώνεται ότι η ελληνική ιπτάμενη τέφρα χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό σωματιδίων κάτω των 45 μικρομέτρων, γεγονός που προάγει τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Η πυκνότητα της ιπτάμενης τέφρας στη χώρα μας κυμαίνεται γενικά μεταξύ 2,1 και 2,4 γραμμαρίων ανά κυβικό εκατοστό (g/cm^3). Αυτή η φυσική πυκνότητα επηρεάζεται από την ποσοτική αναλογία των συστατικών και τη δομή του υλικού. Η ελληνική τέφρα είναι συνήθως πορώδης με μικρή ειδική επιφάνεια, χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την

ικανότητά της να συγκρατεί νερό και να αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου κατά την ενυδάτωση του σκυροδέματος (Xu et al., 15).

Η υγρασία της ιπτάμενης τέφρας ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες αποθήκευσης και μεταφοράς. Η φυσική υγρασία, δηλαδή το περιεχόμενο σε νερό που υπάρχει μέσα στο υλικό σε φυσική κατάσταση, μπορεί να κυμαίνεται από 1% έως 5%. Αυτή η υγρασία επηρεάζει τη ροή και την εργασιμότητα της τέφρας, καθώς και την ομοιομορφία των μιγμάτων σκυροδέματος όπου ενσωματώνεται. Για τον λόγο αυτό, η σωστή αποθήκευση και ξήρανση της τέφρας πριν από τη χρήση είναι κρίσιμη. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της φυσικής σύστασης της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας είναι η μορφολογία των σωματιδίων. Τα σωματίδια έχουν κυρίως σφαιρικό ή υποσφαιρικό σχήμα, με λεία επιφάνεια, γεγονός που βελτιώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος και μειώνει την τριβή μεταξύ των κόκκων. Αυτό το σφαιρικό σχήμα συμβάλλει, επίσης στη μείωση της απαίτησης σε νερό για την επίτευξη της επιθυμητής συνέπειας του σκυροδέματος, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική ποιότητα του υλικού (Li et al., 2000).



Εικόνα 5: Ηλεκτρονική μικροσκοπική απεικόνιση (SEM) της επιφάνειας της ιπτάμενης τέφρας, όπου διακρίνονται τα χαρακτηριστικά σφαιρικά σωματίδια.

Η ειδική επιφάνεια, που αντιστοιχεί στην συνολική επιφάνεια των σωματιδίων ανά μονάδα μάζας, είναι επίσης κρίσιμη παράμετρος. Στην ελληνική ιπτάμενη τέφρα, η ειδική επιφάνεια κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 200 και 500 m²/kg, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής και το βαθμό άλεσης που έχει υποστεί η τέφρα. Η υψηλή ειδική επιφάνεια συμβάλλει στη μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα και συνεπώς στην καλύτερη ενσωμάτωση της τέφρας στο σκυρόδεμα (Papadakis, 2000).

Η φυσική σύσταση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας περιλαμβάνει, επίσης, την πορώδη δομή της. Ο πορώδης χαρακτήρας του υλικού, που αναφέρεται στο ποσοστό του κενού χώρου μέσα στη μάζα της τέφρας, κυμαίνεται μεταξύ 30% και 50%. Η πορώδης αυτή δομή επηρεάζει την απορρόφηση νερού και την αεροδιαπερατότητα του τελικού μίγματος σκυροδέματος, στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των αναλογιών σκυροδέματος. Η θερμοκρασία τήξης των σωματιδίων της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας είναι σχετικά υψηλή, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θερμική σταθερότητα του υλικού και την καταλληλότητά του για χρήση σε κατασκευές που υπόκεινται σε υψηλές θερμικές καταπονήσεις. Αυτή η θερμική σταθερότητα οφείλεται στην παρουσία ορυκτών όπως ο χαλαζίας και η μαγνητίτης, που συνεισφέρουν στη διατήρηση των φυσικών ιδιοτήτων της τέφρας υπό θερμική καταπόνηση (Li et al., 2000).

Επιπλέον, η πυκνότητα συσκευασίας της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας, δηλαδή η πυκνότητα της τέφρας όταν αυτή συσκευάζεται σε χύδην μορφή, κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,8 και 1,2 g/cm³. Αυτή η παράμετρος είναι σημαντική για τη μεταφορά, αποθήκευση και διαχείριση της τέφρας, καθώς και για την ορθή δόση της κατά την παραγωγή σκυροδέματος. Η φυσική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας επηρεάζει επίσης τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στο οποίο ενσωματώνεται. Η υψηλή λεπτότητα και το σφαιρικό σχήμα των σωματιδίων βελτιώνουν την εργασιμότητα, ενώ η πορώδης δομή και η ειδική επιφάνεια συμβάλλουν στην ποζολανική αντίδραση και στην ανάπτυξη της αντοχής με το χρόνο. Παράλληλα, η θερμική σταθερότητα διασφαλίζει την αντοχή του υλικού σε δύσκολες συνθήκες περιβάλλοντος (Papadakis & Tsimas, 2002).

Επιπρόσθετα, για τη βέλτιστη χρήση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση και έλεγχος των φυσικών της ιδιοτήτων μέσω εργαστηριακών δοκιμών (Li et al., 2000).

Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει τη σταθερότητα των χαρακτηριστικών της και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ποιότητας που απαιτούνται για την κατασκευή ασφαλών και ανθεκτικών έργων. Συνολικά, η φυσική σύσταση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση και την αξιοπιστία της σε εφαρμογές δομικών υλικών, συμβάλλοντας παράλληλα στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα μέσω της επαναχρησιμοποίησης ενός βιομηχανικού παραπροϊόντος υψηλής προστιθέμενης αξίας (Lam et al., 1998).

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά παραπροϊόντα που προκύπτουν από την καύση λιγνίτη και άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Στην Ελλάδα, το υλικό αυτό έχει παραχθεί σε μεγάλες ποσότητες, όπως ήδη επισημάνθηκε, κυρίως στους λιγνιτικούς σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας και της Μεγαλόπολης. Η ανάλυση της δομής της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας και η αξιολόγηση της ποιότητάς της αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη δυνατότητα αξιοποίησής της σε

τεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, ιδίως στον τομέα των κατασκευών και της σκυροδεσίας (Li et al., 1998).

Η δομή της ιπτάμενης τέφρας καθορίζεται τόσο από τις χημικές όσο και από τις φυσικές της ιδιότητες. Από χημική άποψη, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα περιέχει υψηλά ποσοστά διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), τριοξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3), και τριοξειδίου του σιδήρου (Fe_2O_3), ενώ συχνά περιέχει αυξημένες ποσότητες οξειδίου του ασβεστίου (CaO), σε σύγκριση με τέφρες άλλων ευρωπαϊκών χωρών. Η υψηλή περιεκτικότητα σε πυριτικά και αργιλικά άλατα την καθιστά ποζολανικά ενεργή, δηλαδή ικανή να αντιδράσει με υδροξείδιο του ασβεστίου και να σχηματίσει ενώσεις παρόμοιες με εκείνες του τσιμέντου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, όπως η αντοχή, η ανθεκτικότητα σε χημικές προσβολές και η μακροχρόνια συμπεριφορά (Papadakis, 2000).

Η φυσική δομή της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη σφαιρικών σωματιδίων με υαλώδη, άμορφη υφή, αποτέλεσμα της ταχείας ψύξης των λειωμένων ανόργανων υλικών κατά την έξοδό τους από τον φούρνο καύσης (Xu et al., 1995).

Τα σωματίδια αυτά έχουν συνήθως διάμετρο μικρότερη από 75 μικρόμετρα (0,075 mm) και παρουσιάζουν καλή κοκκομετρική κατανομή, γεγονός που βελτιώνει τη συνοχή και τη συμπακνότητα του σκυροδέματος. Η σφαιρικότητα των σωματιδίων συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της εργασιμότητας των μειγμάτων σκυροδέματος, μειώνοντας την ανάγκη για νερό και διευκολύνοντας την άντληση και διάστρωση. Ωστόσο, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας είναι η μεταβλητότητά της. Η σύστασή της επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του καύσιμου (κυρίως λιγνίτης), οι τεχνολογίες καύσης, η θερμοκρασία λειτουργίας των λέβητων και τα μέσα συλλογής και αποθήκευσης της τέφρας. Αυτή η ανομοιογένεια δυσκολεύει τη διασφάλιση σταθερής ποιότητας και απαιτεί την εφαρμογή συγκεκριμένων προδιαγραφών και διαδικασιών ελέγχου (Gianoncelli et al., 2013).

Η ανάλυση της δομής της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας έχει δείξει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται αυξημένες τιμές απώλειας κατά την πύρωση (LOI), δηλαδή την παραμένουσα περιεκτικότητα σε άνθρακα, η οποία επηρεάζει αρνητικά τις ποζολανικές ιδιότητες και την αντίδραση με το τσιμέντο. Επίσης, η παρουσία υδατοδιαλυτών αλάτων, κυρίως θεικών, μπορεί να προκαλέσει διαβρώσεις στα ενσωματωμένα μεταλλικά στοιχεία του σκυροδέματος ή να οδηγήσει σε αποδιοργάνωση της μάζας του υλικού. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται κατεργασία της τέφρας είτε μέσω αποπυρώσεως είτε με ειδικές διεργασίες διαβάθμισης, για τη βελτίωση της ποιότητάς της πριν από τη χρήση (Mathapati et al., 2022).

Η ποιότητα της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας ρυθμίζεται πλέον από συγκεκριμένα πρότυπα. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450-1, που έχει υιοθετηθεί στην Ελλάδα ως ΕΛΟΤ EN 450-1, καθορίζει τις απαιτήσεις για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα. Οι προδιαγραφές αφορούν τη χημική και φυσική σύσταση, το μέγεθος των σωματιδίων, την περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστιο, τη δραστικότητα, καθώς και την περιεκτικότητα σε άνθρακα (μέσω της LOI). Η εφαρμογή αυτών των προτύπων είναι απαραίτητη ώστε η τέφρα

να είναι κατάλληλη για χρήση σε δομικά έργα και να μην εγκυμονεί κινδύνους για την ποιότητα και τη μακροχρόνια σταθερότητα του σκυροδέματος (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η ελληνική ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό ασβεστίου, λόγω της φύσης του λιγνίτη που καίγεται. Αυτό την καθιστά εν μέρει υδραυλικό υλικό, επιτρέποντας τη συμμετοχή της και σε άλλες χημικές αντιδράσεις πέρα από τις ποζολανικές. Η διπλή αυτή χημική συμπεριφορά την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές όπως η παραγωγή τσιμέντου τύπου CEM II ή CEM IV, η χρήση σε κονιάματα και η βελτίωση εδαφών στην οδοποιία (Papadakis & Tsimas, 2002).

Η χρήση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας σε κατασκευαστικά έργα, ιδίως στην παραγωγή σκυροδέματος, προϋποθέτει αυστηρό ποιοτικό έλεγχο. Πολλές μονάδες παραγωγής σκυροδέματος εφαρμόζουν συστηματική αξιολόγηση των ιδιοτήτων της τέφρας που προμηθεύονται, ενώ παράλληλα διεξάγονται έλεγχοι συμμόρφωσης με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της δραστηρότητας της τέφρας, την ανάλυση της περιεκτικότητας σε LOI, την κατανομή μεγέθους κόκκων και τη μέτρηση του pH (Mathapati et al., 2022).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα αντιμετωπίζει και σημαντικά μειονεκτήματα. Το μεγαλύτερο εξ αυτών είναι η έλλειψη σταθερότητας στη σύσταση, που συνδέεται με την περιοδικότητα λειτουργίας των μονάδων και την απουσία συστηματικής επεξεργασίας. Επιπλέον, η έλλειψη επενδύσεων στην αναβάθμιση της ποιότητας της τέφρας μέσω κατεργασίας ή εμπλουτισμού οδηγεί σε περιορισμένη εμπορική αξιοποίηση, ενώ μεγάλες ποσότητες συνεχίζουν να αποθηκεύονται σε λιμνοδεξαμενές ή χώρους απόθεσης, με σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Ahmaruzzaman, 2010).

Ωστόσο, η απολιγνιτοποίηση που βρίσκεται σε εξέλιξη στην Ελλάδα δημιουργεί νέα δεδομένα. Η σταδιακή παύση λειτουργίας των λιγνιτικών μονάδων έχει ως αποτέλεσμα τη διαθεσιμότητα μεγάλων αποθεμάτων ιπτάμενης τέφρας, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν, εφόσον καταστεί δυνατή η κατεργασία και η ποιοτική αναβάθμισή τους. Η εφαρμογή εθνικών τεχνικών προδιαγραφών και κινήτρων για την αξιοποίηση δευτερογενών πρώτων υλών μπορεί να οδηγήσει στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συμπερασματικά, η ανάλυση και η ποιότητα της δομής της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας καταδεικνύουν τη σημαντική δυναμική του υλικού αυτού για πλήθος τεχνικών εφαρμογών (Mathapati et al., 2022).

Παρά τις εγγενείς αδυναμίες, που απορρέουν από τη μεταβλητότητα και την ανεπεξέργαστη φύση της σε αρκετές περιπτώσεις, η σωστή αξιολόγηση, η εφαρμογή διεθνών προτύπων και η επένδυση σε τεχνολογίες επεξεργασίας μπορούν να καταστήσουν την ελληνική τέφρα ένα πολύτιμο εργαλείο για τον βιώσιμο κατασκευαστικό τομέα της χώρας (Ahmaruzzaman, 2010).

3.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Η ιπτάμενη τέφρα, ως υποπροϊόν της καύσης λιγνίτη και άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, έχει αναγνωριστεί διεθνώς για τις ποζολανικές της ιδιότητες και τη δυνατότητα αξιοποίησής της σε ποικίλες τεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, κυρίως στον τομέα των κατασκευών και ειδικά στη σκυροδεσία. Ωστόσο, παρά τις σημαντικές δυνατότητες, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει μια σειρά από μειονεκτήματα που καθιστούν προβληματική τη συστηματική και ευρείας κλίμακας αξιοποίησή της. Τα μειονεκτήματα αυτά αφορούν κυρίως στη χημική και φυσική της σύσταση, την αστάθεια της ποιότητάς της, την ελλιπή κατεργασία, τα περιβαλλοντικά ζητήματα, την απουσία υποδομών και τη χαμηλή εμπορική αξιοποίηση (Akbulut et al, 2024).

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας είναι η υψηλή μεταβλητότητα στη χημική της σύσταση, η οποία αποδίδεται στη φύση και τη σύνθεση του ελληνικού λιγνίτη. Ο λιγνίτης, σε αντίθεση με άλλους τύπους άνθρακα, έχει υψηλή περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά και υγρασία, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τη σύσταση της παραγόμενης τέφρας. Η μεταβλητότητα αυτή αντανακλάται στις συγκεντρώσεις οξειδίων, όπως του ασβεστίου (CaO), του μαγνησίου (MgO), του θείου (SO₃) και άλλων στοιχείων, επηρεάζοντας αρνητικά την ομοιογένεια του υλικού και τη δυνατότητα προβλέψιμης συμπεριφοράς του σε εφαρμογές σκυροδέματος. Συνεπώς, η μεταβλητότητα αυτή δημιουργεί αβεβαιότητα και μειώνει την εμπιστοσύνη των μηχανικών και των παραγωγών σκυροδέματος ως προς τη χρήση της (Ahmaruzzaman, 2010).

Ένα επιπλέον σημαντικό μειονέκτημα είναι η υψηλή τιμή απώλειας κατά την πύρωση (LOI), η οποία αντανακλά την περιεκτικότητα της τέφρας σε μη καύσιμο ή ατελώς καμένο άνθρακα (Papadakis, 2000).

Η υψηλή LOI μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως τη σύνδεση με τα πρόσμικτα, την απορρόφηση νερού, και την τελική αντοχή. Η παραμένουσα οργανική ύλη επίσης μειώνει τη δραστηριότητα της τέφρας ως ποζολάνη και δυσκολεύει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ποιότητας (π.χ. ΕΛΟΤ EN 450-1), αποκλείοντας τη χρήση της σε πιστοποιημένα προϊόντα. Αξιοσημείωτο είναι και το πρόβλημα της υψηλής περιεκτικότητας σε διαλυτό θείο και αλκάλια, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις στο σκυρόδεμα, όπως είναι η αλκαλική αντίδραση με τα αδρανή (alkali-silica reaction – ASR), προκαλώντας ρωγμές και αποδιοργάνωση της δομής με την πάροδο του χρόνου. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σοβαρό σε περιοχές με αυξημένη υγρασία ή κυκλικές εναλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας, όπως συμβαίνει συχνά στο ελληνικό κλίμα (Ahmaruzzaman, 2010).

Ένα άλλο σοβαρό μειονέκτημα είναι η έλλειψη επεξεργασίας και εμπλουτισμού της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας, η οποία διατίθεται σε ακατέργαστη μορφή, συχνά απευθείας από τις λιγνιτικές μονάδες. Η απουσία βιομηχανικής κατεργασίας για τη μείωση της LOI, την απομάκρυνση ανεπιθύμητων αλάτων ή τη βελτίωση της κοκκομετρικής κατανομής καθιστά την τέφρα λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με διεθνώς εμπορεύσιμες τέφρες που

έχουν υποστεί εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας (π.χ. ταξινόμηση, ξήρανση, λείανση). Αυτή η κατάσταση οδηγεί σε χαμηλή προστιθέμενη αξία του υλικού και περιορίζει τη χρήση του σε εφαρμογές χαμηλής τεχνικής απαίτησης ή σε επιχωματώσεις και γεωτεχνικά έργα (Papadakis & Tsimas, 2002).

Πέρα από την τεχνική σύσταση, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει και προβλήματα στη φυσική της δομή, καθώς συχνά περιέχει σωματίδια με ακανόνιστο σχήμα, κοκκώδη ή πορώδη υφή, και χαμηλό βαθμό υαλώδους φάσης. Αυτές οι ιδιότητες μειώνουν τη δραστηριότητα και την ικανότητά της να συμμετάσχει σε ποζολανικές ή υδραυλικές αντιδράσεις. Σε περιπτώσεις ανεπαρκούς σφαιρικότητας και υψηλής περιεκτικότητας σε άμορφες φάσεις, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου, για να επιτευχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αυξάνοντας το κόστος της παραγωγής σκυροδέματος. Ένα άλλο σοβαρό εμπόδιο στην αξιοποίηση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας είναι η περιορισμένη προσβασιμότητα και απουσία οργανωμένων υποδομών συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Στην Ελλάδα, η τέφρα αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες σε λιμνοδεξαμενές ή χώρους απόθεσης δίπλα στους σταθμούς παραγωγής, χωρίς να υπάρχουν μηχανισμοί ανάκτησης, ταξινόμησης ή διάθεσης. Αυτό όχι μόνο αυξάνει την περιβαλλοντική επιβάρυνση, λόγω πιθανής έκπλυσης τοξικών στοιχείων στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα, αλλά περιορίζει και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής της σε κυκλικές παραγωγικές διαδικασίες. Παράλληλα, η χαμηλή εμπορική ζήτηση και η έλλειψη κινήτρων από την πολιτεία ή την αγορά για την αξιοποίηση της τέφρας, έχουν ως αποτέλεσμα την υποεκμετάλλευσή της (Papadakis & Tsimas, 2002)

Η απουσία κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου, που να ενισχύει τη χρήση δευτερογενών υλικών, και η έλλειψη μηχανισμών πιστοποίησης ή ενίσχυσης επιχειρηματικών σχεδίων για την εμπορία επεξεργασμένης τέφρας καθιστούν το προϊόν μη ανταγωνιστικό σε σύγκριση με άλλες πρώτες ύλες. Επιπλέον, το γεγονός ότι η τέφρα αντιμετωπίζεται θεσμικά ως «απόβλητο» και όχι ως «παραπροϊόν» δημιουργεί προσκόμματα στη μεταφορά και την επαναχρησιμοποίησή της. Επιπλέον, σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα προκύπτουν από τη μακρόχρονη αποθήκευση τέφρας σε ανοιχτούς χώρους. Ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει λεπτά σωματίδια και να προκαλέσει προβλήματα στην ποιότητα του αέρα, ενώ η διείσδυση βροχοπτώσεων μπορεί να οδηγήσει στη διάχυση διαλυτών ιόντων και βαρέων μετάλλων στον υδροφόρο ορίζοντα. Οι συνέπειες αυτές απαιτούν αυστηρό έλεγχο, στεγανοποίηση των χώρων απόθεσης και περιβαλλοντική παρακολούθηση, πράγμα που σε πολλές περιπτώσεις δεν εφαρμόζεται με συνέπεια (Αγαθαγγελίδης, 2019)

Πέρα από αυτά, η τεχνολογική και επιστημονική έλλειψη τεκμηρίωσης για τις ποιοτικές παραμέτρους της ελληνικής τέφρας, σε συνδυασμό με την ελλιπή κατάρτιση τεχνικών, εργολάβων και μελετητών για την ενσωμάτωσή της σε τεχνικές μελέτες και έργα, οδηγούν σε γενικευμένη απροθυμία για την υιοθέτησή της. Η γνώση γύρω από τις τεχνικές προδιαγραφές, τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 450-1 και τις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου παραμένει περιορισμένη, ενώ απουσιάζει η εμπειρική τεκμηρίωση της μακροχρόνιας

απόδοσης της τέφρας σε ελληνικά έργα υποδομής. Συμπερασματικά, παρά τις σημαντικές δυνατότητες και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που διαθέτει, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα αντιμετωπίζει σοβαρά μειονεκτήματα που περιορίζουν την αξιοποίησή της (Papadakis & Tsimas, 2002).

Η υψηλή μεταβλητότητα, η απουσία επεξεργασίας, η περιβαλλοντική επιβάρυνση, η έλλειψη θεσμικής υποστήριξης και οι υποδομές υπολείπονται των διεθνών προτύπων. Η υπέρβαση αυτών των αδυναμιών προϋποθέτει συντονισμένες ενέργειες από την πολιτεία, τη βιομηχανία και την επιστημονική κοινότητα με στόχο τη βιώσιμη, περιβαλλοντικά ασφαλή και τεχνικά αξιόπιστη αξιοποίηση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας (Gianoncelli et al., 2013).

3.5 ΕΘΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ

Η ιπτάμενη τέφρα, ως παραπροϊόν της καύσης άνθρακα και κυρίως λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια ως ένα από τα πιο σημαντικά δευτερογενή υλικά που μπορούν να αξιοποιηθούν στη βιομηχανία δομικών υλικών και κατασκευών. Για να καταστεί δυνατή η ασφαλής και ποιοτικά αξιόπιστη χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε έργα σκυροδέματος και τεχνικών υποδομών, κρίθηκε αναγκαία η θέσπιση επίσημων προδιαγραφών, οι οποίες να καθορίζουν τις απαιτήσεις, τις μεθόδους ελέγχου και τα κριτήρια αποδοχής του υλικού. Στην Ελλάδα, οι απαιτήσεις αυτές εκφράζονται μέσα από την Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή (Ε.Τ.Ε.Π.) για την ιπτάμενη τέφρα (Βαντσιώτης κ.α, 2009).

Η Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή αποτελεί ένα θεσμικό εργαλείο που έχει ως στόχο να ρυθμίσει τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας, με τρόπο που να εξασφαλίζει την τεχνική επάρκεια, τη συμμόρφωση με τα ευρωπαϊκά πρότυπα και την προστασία του περιβάλλοντος. Η θεσμοθέτησή της έγινε στο πλαίσιο της εναρμόνισης με τις ευρωπαϊκές οδηγίες για την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη χρήση πόρων. Στο επίκεντρο της Ε.Τ.Ε.Π. βρίσκεται η ανάγκη αξιοποίησης της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας, η οποία λόγω της σημαντικής παραγωγής της, κυρίως από τους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ, αποτελεί έναν εγχώριο πόρο με μεγάλη αναξιοποίητη δυναμική (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Η βασική Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή που σχετίζεται με την ιπτάμενη τέφρα είναι η Ε.Τ.Ε.Π. 15-01-03-00 "Ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη για χρήση σε έργα οδοποιίας", που εγκρίθηκε και εντάχθηκε στο Μητρώο Ε.Τ.Ε.Π. του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Σκοπός της συγκεκριμένης προδιαγραφής είναι να καθορίσει τα χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί η ιπτάμενη τέφρα όταν χρησιμοποιείται σε έργα υποδομής, όπως επιχώματα, τεχνητά πρανή, στρώσεις οδοστρώματος και σταθεροποίηση εδαφών. Η τεχνική αυτή χρήση κρίνεται κρίσιμη, δεδομένου ότι επιτρέπει τη διάθεση μεγάλων ποσοτήτων του υλικού με τρόπο ωφέλιμο και περιβαλλοντικά ασφαλή (Βαντσιώτης κ.α, 2009).

Η προδιαγραφή προβλέπει σειρά απαιτήσεων που αφορούν (Αγαθαγγελίδης, 2019):

- Χημικά χαρακτηριστικά, όπως η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε θειικά, η απώλεια κατά την πύρωση (LOI), και η παρουσία βαρέων μετάλλων και άλλων δυνητικά τοξικών στοιχείων. Αυτά τα κριτήρια διασφαλίζουν ότι το υλικό δεν θα επηρεάσει αρνητικά το περιβάλλον ή την ποιότητα των έργων.
- Φυσικά χαρακτηριστικά, μεταξύ των οποίων η κοκκομετρική κατανομή, η φαινόμενη πυκνότητα, η υγρασία, η πλαστικότητα και ο δείκτης φόρτισης. Αυτά τα στοιχεία είναι κρίσιμα για την καλή συμπεριφορά του υλικού κατά την ενσωμάτωσή του σε οδοκατασκευές.
- Μηχανικές ιδιότητες, όπως η φέρουσα ικανότητα και η συμπιεστότητα, οι οποίες καθορίζουν την καταλληλότητα της τέφρας σε έργα όπου απαιτούνται συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και αντοχές.

Παράλληλα, η προδιαγραφή επιβάλλει συγκεκριμένες μεθόδους ελέγχου, τόσο στο στάδιο της παραγωγής όσο και κατά την παράδοση του υλικού στο έργο. Οι έλεγχοι αυτοί περιλαμβάνουν δειγματοληψία, εργαστηριακές αναλύσεις και δοκιμές πεδίου, ενώ προβλέπεται και σύστημα ποιοτικού ελέγχου από πιστοποιημένους φορείς. Η συμμόρφωση με την Ε.Τ.Ε.Π. είναι υποχρεωτική για την αποδοχή της ιπτάμενης τέφρας σε δημόσια έργα, ενώ παρέχει επίσης κατευθύνσεις και για ιδιωτικά έργα που θέλουν να ενσωματώσουν το υλικό με ασφάλεια. Η σύνδεση της Εθνικής Τεχνικής Προδιαγραφής με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, και ειδικότερα με το EN 450-1, θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικής. Το EN 450-1 καθορίζει τις απαιτήσεις για τη χρήση ιπτάμενης τέφρας ως ποζολανικού πρόσμικτου στο σκυρόδεμα. Η Ε.Τ.Ε.Π. διαφοροποιείται, κυρίως, ως προς το πεδίο εφαρμογής της, καθώς επικεντρώνεται κυρίως στη χρήση τέφρας σε έργα οδοποιίας και επιχωμάτων, δηλαδή σε πιο μαζικές και λιγότερο αυστηρές εφαρμογές, όπου μπορούν να αξιοποιηθούν ακόμη και τέφρες που δεν πληρούν πλήρως τις απαιτήσεις του EN 450-1 (Βαντσιώτης κ.α, 2009).

Η σημασία της Εθνικής Τεχνικής Προδιαγραφής για την ελληνική πραγματικότητα είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Αρχικά, συμβάλλει στην περιβαλλοντική διαχείριση του μεγάλου όγκου της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα κατέληγε σε χώρους απόθεσης, με όλους τους σχετικούς κινδύνους. Επίσης, υποστηρίζει την κυκλική οικονομία και την επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, μειώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη φυσικών αδρανών υλικών και εξοικονομώντας πόρους. Επιπλέον, η Ε.Τ.Ε.Π. ενισχύει την τεχνική αξιοπιστία των έργων, δίνοντας σαφείς κατευθύνσεις για τη σωστή ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας σε δομές και υποδομές, ενώ δημιουργεί και ένα πλαίσιο διαφάνειας και ελέγχου, αποτρέποντας τη χρήση ακατάλληλων ή επιβλαβών υλικών. Η ύπαρξη προδιαγραφών αυξάνει την εμπιστοσύνη των μηχανικών και εργοληπτών προς το υλικό και ενθαρρύνει τη συστηματική του αξιοποίηση (Αγαθαγγελίδης, 2019).

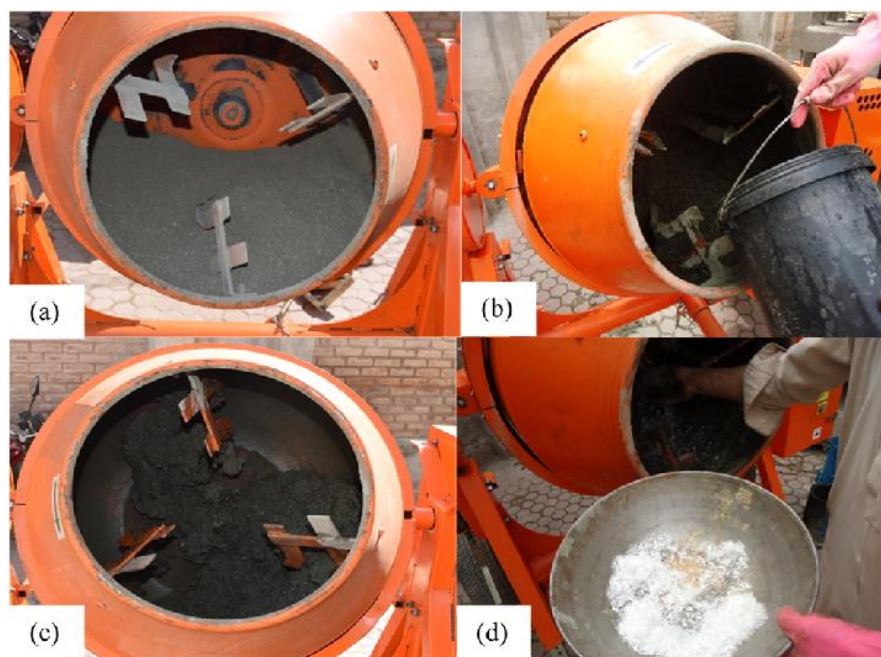
Ωστόσο, παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί με την καθιέρωση της Εθνικής Τεχνικής Προδιαγραφής, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις. Η εφαρμογή της σε όλη την επικράτεια απαιτεί την εκπαίδευση των εμπλεκόμενων φορέων, τη δημιουργία πιστοποιημένων σημείων ελέγχου και την παροχή κινήτρων για την κατεργασία και εμπορική διάθεση της τέφρας. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να υπάρξει επικαιροποίηση και επέκταση των

προδιαγραφών, ώστε να καλυφθούν και άλλες μορφές χρήσης της τέφρας (π.χ. σε γεωτεχνικές εφαρμογές, περιβαλλοντική αποκατάσταση, λιμενικά έργα). Συμπερασματικά, η Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή για την ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την ορθολογική, τεχνικά αποδεκτή και περιβαλλοντικά ασφαλή αξιοποίηση του υλικού στην Ελλάδα. Τέλος, θέτει το απαραίτητο πλαίσιο ποιοτικού ελέγχου και κατευθύνσεων για τη χρήση της τέφρας σε έργα υποδομών, ενισχύοντας τη βιώσιμη κατασκευαστική δραστηριότητα και δίνοντας νέα προοπτική σε έναν μέχρι πρότινος παραμελημένο βιομηχανικό πόρο (Βαντσιώτης κ.α, 2009).

3.6 ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η τέφρα, ως υποπροϊόν της καύσης άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, αποτελεί ένα υλικό που μπορεί να αξιοποιηθεί με αποτελεσματικό τρόπο στη βιομηχανία δομικών υλικών (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Η αξιοποίηση της τέφρας στη σύνθεση σκυροδέματος αποτελεί μια πρακτική που συνδυάζει τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, και έχει ερευνηθεί συστηματικά τα τελευταία χρόνια τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς. Η τέφρα που παράγεται στην Ελλάδα είναι κυρίως ιπτάμενη τέφρα και κατατάσσεται στις ποζολανικές ύλες. Όπως ήδη επισημάνθηκε, οι ποζολανικές ιδιότητες της τέφρας την καθιστούν ικανή να αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου που απελευθερώνεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, σχηματίζοντας πρόσθετες ενώσεις του τύπου C-S-H (, οι οποίες ενισχύουν τη μηχανική αντοχή και τη στεγανότητα του σκυροδέματος. Έτσι, η τέφρα δεν λειτουργεί απλώς ως αδρανές υλικό πλήρωσης, αλλά συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία σκλήρυνσης του σκυροδέματος (Pawel et al., 2015).



Εικόνα 6: Διαδικασία ανάμειξης των ECC (Engineered Cementitious Composites): α) ξηρή ανάμειξη τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας και λεπτού αδρανούς υλικού, β) προσθήκη νερού στο μείγμα, γ) ανάμειξη των συστατικών για άλλα δύο λεπτά, δ) προσθήκη ινών PVA και ανάμειξη για άλλα δύο λεπτά.

Η χρήση ελληνικής τέφρας στο σκυρόδεμα επιφέρει διάφορα πλεονεκτήματα. Αρχικά, υποστηρίζεται ότι η προσθήκη τέφρας μειώνει την απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου Portland, το οποίο είναι ενεργοβόρο στην παραγωγή του και υπεύθυνο για σημαντικές εκπομπές CO₂. Με τον τρόπο αυτό η χρήση τέφρας συμβάλλει στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα του σκυροδέματος. Επιπλέον, η τέφρα βελτιώνει την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος, διευκολύνοντας τη διάστρωση και συμπύκνωση του μείγματος. Σε βάθος χρόνου, το σκυρόδεμα με τέφρα εμφανίζει αυξημένη αντοχή σε χημικές προσβολές, όπως η θειική διάβρωση, και μειωμένη διαπερατότητα, γεγονός που αυξάνει τη διάρκεια ζωής των κατασκευών (Κοντομηνά, 2017).

Παρόλα αυτά, η χρήση τέφρας παρουσιάζει και ορισμένες προκλήσεις. Ένα βασικό πρόβλημα αφορά τη μεταβλητότητα της χημικής σύστασης της ελληνικής τέφρας, ανάλογα με την προέλευση του λιγνίτη και τις συνθήκες καύσης. Η τέφρα από ορισμένες μονάδες περιέχει υψηλά ποσοστά ασβεστίου και άλλων αλάτων, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τη σταθερότητα του σκυροδέματος. Επίσης, η ύπαρξη άκαυστων σωματιδίων ή ακαθαρσιών στην τέφρα απαιτεί ειδική επεξεργασία πριν τη χρήση. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίος ο ποιοτικός έλεγχος και η ταξινόμηση της τέφρας πριν ενσωματωθεί στα σκυροδέματα. Ένα άλλο ζήτημα αφορά τον ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής του σκυροδέματος με τέφρα. Συνήθως, η αντοχή του είναι χαμηλότερη στις πρώτες ημέρες σκλήρυνσης, λόγω της καθυστερημένης ποζολανικής αντίδρασης, γεγονός που καθιστά το υλικό λιγότερο κατάλληλο για έργα όπου απαιτείται ταχεία ανάπτυξη αντοχής (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Ωστόσο, σε βάθος χρόνου, το σκυρόδεμα με τέφρα τείνει να υπερβαίνει σε αντοχή το συμβατικό σκυρόδεμα. Παρά τις προκλήσεις, στην Ελλάδα έχουν γίνει σημαντικά βήματα

προς την ενσωμάτωση της τέφρας σε προϊόντα σκυροδέματος. Ερευνητικά προγράμματα σε συνεργασία με πανεπιστήμια και τη ΔΕΗ έχουν αναδείξει τις δυνατότητες αξιοποίησης της τέφρας σε τσιμέντα τύπου CEM II και CEM IV, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 197-1). Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για τη βελτίωση της ποιότητας της τέφρας μέσω κοσκινίσματος, λείανσης και απομάκρυνσης ανεπιθύμητων στοιχείων (Pawel et al., 2015).

Σε περιβαλλοντικό πλαίσιο, η χρήση τέφρας στο σκυρόδεμα αποτελεί παράδειγμα κυκλικής οικονομίας, καθώς μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη πρώτων υλών, ενώ, επίσης, περιορίζει την απόρριψη της τέφρας σε χώρους υγειονομικής ταφής και μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πολιτικής για την πράσινη μετάβαση και την προώθηση βιώσιμων κατασκευών. Στη συνέχεια σε πρακτικό επίπεδο, η ελληνική κατασκευαστική βιομηχανία εμφανίζει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση σκυροδέματος με προσθήκη τέφρας, ιδίως σε έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας, όπως φράγματα, δρόμοι και θεμελιώσεις. Παράλληλα, η εφαρμογή κανονισμών και προτύπων που επιτρέπουν την αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων στις κατασκευές έχει ενισχύσει την αποδοχή τέτοιων καινοτομιών από τους μελετητές και τους μηχανικούς (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο ότι η χρήση της ιπτάμενης τέφρας συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση του κόστους παραγωγής. Η αντικατάσταση ενός σημαντικού ποσοστού του clinker με τέφρα οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, είτε η τέφρα ενσωματώνεται στο στάδιο της παραγωγής του τσιμέντου, είτε προστίθεται κατά την παρασκευή του σκυροδέματος στο εργοτάξιο, μειώνει τις ανάγκες για πρώτες ύλες και ενέργεια, καθιστώντας την παραγωγική διαδικασία πιο αποδοτική και οικονομική. Επιπρόσθετα, η τέφρα ως παραπροϊόν προσφέρεται σε χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά συστατικά του τσιμέντου, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση πόρων (Κοντομηνά, 2017).

Σε τεχνικό επίπεδο, η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας βελτιώνει σημαντικά τις ιδιότητες του σκυροδέματος και του τσιμέντου (Στιβανάκης, 20030).

Η ποζολανική της δράση συμβάλλει στη μείωση του πορώδους, ενισχύοντας τη συνοχή και την πυκνότητα της δομής του σκυροδέματος. Παράλληλα, βελτιώνεται η ποιότητα της ενδιάμεσης ζώνης μεταξύ αδρανών και τσιμέντου, οδηγώντας σε αυξημένη μηχανική αντοχή και μακροχρόνια σταθερότητα. Επιπλέον, η τέφρα περιορίζει την πιθανότητα ανάπτυξης ρωγμών στο σκυρόδεμα που προκαλούνται από την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου Portland. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το υλικό ιδιαίτερα κατάλληλο για έργα μεγάλου όγκου, όπως φράγματα, θεμελιώσεις και μαζικές κατασκευές, όπου είναι κρίσιμος ο έλεγχος της θερμοκρασίας (Στιβανάκης, 2003).

Εκτός από όλα αυτά, η χρήση ιπτάμενης τέφρας σε κατασκευαστικά υλικά προσφέρει επίσης αξιοσημείωτα περιβαλλοντικά οφέλη. Πρωτίστως, επεκτείνεται η διάρκεια ζωής των κατασκευών, αφού η αυξημένη αντοχή του σκυροδέματος περιορίζει τη φθορά από καιρικές συνθήκες και χημικούς παράγοντες. Επιπλέον, η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με

τέφρα μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση και τις εκπομπές αερίων ρύπων που συνοδεύουν τη διαδικασία παραγωγής του clinker, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο συνδέεται με την υπερθέρμανση του πλανήτη (Pawel et al, 2015). Εκτός από όλα αυτά, η αξιοποίηση της τέφρας ως δευτερογενές υλικό περιορίζει τις ποσότητες των υπολειμμάτων καύσης που διαφορετικά θα οδηγούνταν σε χώρους ταφής, μειώνοντας την επιβάρυνση στο περιβάλλον και προωθώντας την κυκλική οικονομία. Για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι η ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος αποτελεί μια πολυδιάστατη πρακτική με σημαντικά οφέλη. Τέλος, είναι σαφές ότι πρόκειται για μια επιλογή που εναρμονίζεται με τις σύγχρονες απαιτήσεις της βιώσιμης ανάπτυξης, προσφέροντας μια ολιστική προσέγγιση στην αντιμετώπιση τεχνικών και οικολογικών προκλήσεων στον τομέα των κατασκευών (Αγαθαγγελίδης, 2019).

3.7 Η ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΟΔΟΠΟΙΑ

Η συστηματική αξιοποίησή της ιπτάμενης τέφρας θεωρείται ότι μπορεί να προσφέρει λύσεις σε σημαντικά θέματα του τομέα των κατασκευών, και ειδικότερα της οδοποιίας. Η χρήση των ασβεστούχων ιπτάμενων τεφρών, δηλαδή αυτών που περιέχουν υψηλό ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου, για τη σταθεροποίηση στρώσεων βάσης και υπόβασης στις οδικές κατασκευές, έχει ήδη καθιερωθεί σε ευρωπαϊκό επίπεδο, με σαφές πλαίσιο προδιαγραφών μέσα από τα πρότυπα EN 14227 και EN 13286 (Spiekermann & Wegener, 2006).

Η εφαρμογή της ιπτάμενης τέφρας στην οδοποιία αφορά κυρίως την ενίσχυση και βελτίωση της φέρουσας ικανότητας των εδαφών και των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος. Η τέφρα λειτουργεί ως συνδετικό υλικό, αντικαθιστώντας ή συμπληρώνοντας τη χρήση παραδοσιακών σταθεροποιητικών μέσων, όπως η άσβεστος και το τσιμέντο. Ειδικά στις ασβεστούχες τέφρες που παράγονται στις λιγνιτικές περιοχές της Ελλάδας, θεωρείται ότι οι χημικές και φυσικές τους ιδιότητες ενδείκνυνται για τέτοιες γεωτεχνικές εφαρμογές (Papayanni, 1992).

Η χρήση της τέφρας προσφέρει πολλαπλά οικονομικά οφέλη, δίνοντας έμφαση στο ότι η δυνατότητα υποκατάστασης ακριβότερων υλικών με τέφρα μειώνει το συνολικό κόστος κατασκευής των οδοστρώματων. Επιπλέον, η τέφρα διατίθεται τοπικά στις περιοχές παραγωγής της, μειώνοντας τις ανάγκες για μεταφορές αδρανών από μακρινές αποστάσεις. Η μείωση της ανάγκης για εξόρυξη φυσικών αδρανών οδηγεί όχι μόνο σε εξοικονόμηση φυσικών πόρων, αλλά και σε περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τους. Ειδικά στις περιοχές κοντά στους λιγνιτικούς σταθμούς, η χρήση της τέφρας για οδοποιία μπορεί να λειτουργήσει ως μοχλός ανάπτυξης, ενισχύοντας την τοπική οικονομία και δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας (Παπαγιάννη, κ.α, 2009).

Στη συνέχεια, θεωρείται ότι η χρήση της ιπτάμενης τέφρας για σταθεροποίηση επιτυγχάνει αύξηση της μηχανικής αντοχής των στρώσεων και βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των εδαφών. Η τέφρα, χάρη στην ποζολανική και υδραυλική της δράση, δημιουργεί σταθερές δομές με τον χρόνο, προσφέροντας σταθερότητα, περιορίζοντας τη διαβροχή και ελαχιστοποιώντας καθιζήσεις ή αστοχίες του οδοστρώματος. Αυτά τα

χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τις κατασκευές βαριάς κυκλοφορίας, όπως αυτοκινητόδρομοι, οδοί ταχείας κυκλοφορίας, ακόμη και υποδομές αεροδρομίων και βιομηχανικών ζωνών (Spiekermann & Wegener, 2006).

Σε περιβαλλοντικό πλαίσιο, τα οφέλη από τη χρήση ιπτάμενης τέφρας στην οδοποιία είναι σημαντικά. Η χρήση τέφρας μειώνει δραστικά την ανάγκη απόθεσης του υλικού σε χώρους ταφής αποβλήτων, πρακτική που εγκυμονεί κινδύνους για το υπέδαφος και τους υδάτινους πόρους. Ταυτόχρονα, περιορίζονται οι εκπομπές CO₂, καθώς η παραγωγή και μεταφορά παραδοσιακών συνδετικών υλικών (όπως το τσιμέντο) είναι σημαντική πηγή εκπομπών (Parayanni, 1992).

Επιπλέον, η μακροχρόνια βελτίωση της ανθεκτικότητας του οδοστρώματος περιορίζει τις ανάγκες για επισκευές και ανακατασκευές, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τον συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο κατά τον κύκλο ζωής της υποδομής. Παρά τις δυνατότητες αυτές, η πρακτική αξιοποίηση της τέφρας στην οδοποιία στην Ελλάδα παραμένει περιορισμένη. Αν και η τεχνολογία είναι γνωστή ήδη από τη δεκαετία του 1970, κυρίως σε κράτη με προηγμένες υποδομές, στη χώρα μας παρατηρείται δισταγμός στην υιοθέτηση της χρήσης της (Parayanni, 1992). Πιο συγκεκριμένα, πολλοί μελετητές, εργολάβοι και φορείς του δημοσίου εμφανίζουν αντιστάσεις με επιφυλακτικότητα τη χρήση εναλλακτικών υλικών, ακόμη και όταν αυτά πληρούν διεθνείς προδιαγραφές, εξαιτίας της έλλειψης ενημέρωσης και εκπαίδευσης γύρω από τα τεχνικά οφέλη και την ασφαλή εφαρμογή της τέφρας. Ταυτόχρονα, θεωρείται ότι η έλλειψη επίσημου κανονιστικού πλαισίου ή τεχνικών οδηγιών που να βασίζονται σε εμπειρία από την ελληνική πράξη δυσχεραίνει τη συστηματική ενσωμάτωσή της. Επίσης, δεν έχουν θεσπιστεί επαρκή οικονομικά ή θεσμικά κίνητρα από την πολιτεία για την ενθάρρυνση της χρήσης των διαφόρων πράσινων υλικών, με αποτέλεσμα να μην αξιοποιείται επαρκώς ένα υλικό που διατίθεται σε αφθονία (Παπαγιάννη, κ.α., 2009).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η εικόνα είναι πιο αισιόδοξη, καθώς κράτη της Νοτιοανατολικής Ευρώπης ήδη εντάσσουν την τέφρα σε μεγάλα έργα υποδομής, όπως νέους οδικούς άξονες, λιμένες, εμπορευματικά κέντρα και αεροδρόμια. Η χρήση της σε δάπεδα και πλατόρμες βαριάς κυκλοφορίας αποδεικνύει την πρακτική της αποτελεσματικότητα. Στη χώρα μας, για να επιτευχθεί η πλήρης ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας στις γεωτεχνικές και οδοποιητικές κατασκευές, απαιτούνται συγκεκριμένες δράσεις, με πιο σημαντικές τις εξής (Spiekermann & Wegener, 2006):

- Θεσμική ενίσχυση και κανονιστική υποστήριξη
- Εκπαίδευση και κατάρτιση
- Προώθηση μέσω πιλοτικών έργων
- Κίνητρα και επιδοτήσεις

Συμπερασματικά, η χρήση της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας στην οδοποιία είναι μια τεχνικά ώριμη και περιβαλλοντικά επιτακτική επιλογή, καθώς προσφέρει πολυδιάστατα οφέλη, από τη μείωση του κόστους και την αξιοποίηση ενός κατά τα άλλα απορριπτόμενου πόρου, έως τη βιώσιμη αναβάθμιση των οδικών υποδομών (Παπαγιάννη, κ.α., 2009).

Είναι σαφές ότι η πρόκληση δεν είναι τεχνική, αλλά πολιτική και θεσμική: η χώρα καλείται να μετατρέψει έναν περιβαλλοντικό «πονοκέφαλο» σε ευκαιρία βιώσιμης ανάπτυξης (Παπαγιάννη, κ.α, 2009).

3.8 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα κονιορτοποιημένο παραπροϊόν της καύσης άνθρακα, κυρίως λιγνίτη, σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η Ελλάδα, λόγω της μακρόχρονης εξάρτησής της από τον λιγνίτη για την ηλεκτροπαραγωγή, έχει ιστορικά αποτελέσει μία από τις σημαντικότερες ευρωπαϊκές χώρες στην παραγωγή ιπτάμενης τέφρας. Ωστόσο, η αξιοποίηση αυτού του υλικού παραμένει περιορισμένη, παρά τις τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές δυνατότητες της (Akbulut et al., 2024). Η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα ήταν στενά συνδεδεμένη με τη λειτουργία των λιγνιτικών μονάδων της ΔΕΗ. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 2010, η ετήσια παραγωγή ιπτάμενης τέφρας στη χώρα ξεπερνούσε τους 5 εκατομμύρια τόνους. Η σταδιακή απολιγνιτοποίηση της Ελλάδας, στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών περιβαλλοντικών πολιτικών και του Green Deal, οδήγησε σε σταδιακή μείωση αυτής της παραγωγής. Η παύση λειτουργίας λιγνιτικών μονάδων μείωσε δραστικά την παραγωγή τέφρας, αλλά ταυτόχρονα δημιούργησε ένα σημαντικό απόθεμα υλικού, που εξακολουθεί να είναι διαθέσιμο για αξιοποίηση (Αγαθαγγελίδης, 201).

Παρά τον υψηλό όγκο παραγωγής τέφρας στο παρελθόν, το ποσοστό που καταναλωνόταν για παραγωγικές χρήσεις στη χώρα μας παρέμενε σχετικά χαμηλό. Η κύρια χρήση έδινε έμφαση την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, ενώ σε πολύ μικρότερο βαθμό επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί σε γεωτεχνικές εφαρμογές και έργα οδοποιίας. Οι τσιμεντοβιομηχανίες, κυρίως αυτές με διεθνή εμπειρία, αξιοποιούσαν την τέφρα για τη μερική αντικατάσταση του κλίνκερ, στο πλαίσιο της μείωσης του ενεργειακού αποτυπώματος και της βελτίωσης των ιδιοτήτων του τσιμέντου. Η τέφρα θεωρείται ότι βελτιώνει τη ρευστότητα, την ανθεκτικότητα και την χημική σταθερότητα του σκυροδέματος, προσφέροντας τεχνικά πλεονεκτήματα (Παπαγιάννη κ.α, 2009)).

Παράλληλα, σε ορισμένα έργα της ΔΕΗ και τοπικών αρχών, δοκιμάστηκαν εφαρμογές τέφρας για την αποκατάσταση ορυχείων, τη σταθεροποίηση οδοστρωμάτων και τη δημιουργία γεωτεχνικών επιχωμάτων. Ωστόσο, τέτοιες πρακτικές δεν επεκτάθηκαν ευρέως, κυρίως λόγω έλλειψης τυποποιημένων τεχνικών οδηγιών, επιφυλάξεων των μηχανικών και περιορισμένης υποστήριξης από την πολιτεία. Αξιοσημείωτο είναι ότι ένα μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης τέφρας οδηγήθηκε τελικά σε χώρους απόθεσης ή υγειονομικής ταφής, δημιουργώντας περιβαλλοντικά προβλήματα αλλά και χάνοντας την ευκαιρία για αξιοποίηση ενός πολύτιμου πόρου (Αγαθαγγελίδης, 2019).

Στην εποχή μας, εκατομμύρια τόνοι τέφρας παραμένουν αποθηκευμένοι σε τέφραποθέσεις, αποτελώντας μια τεράστια αποθεματική πηγή για μελλοντικές χρήσεις, εφόσον εφαρμοστεί σωστή πολιτική διαχείρισης. Ως προς το μέλλον, πρέπει να επισημανθεί ότι η μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο δεν αποκλείει την αξιοποίηση των υφιστάμενων

αποθεμάτων ιπτάμενης τέφρας. Αντίθετα, δημιουργεί την ανάγκη για υιοθέτηση πρακτικών κυκλικής οικονομίας, στις οποίες τα βιομηχανικά παραπροϊόντα επαναξιοποιούνται ως πρώτες ύλες σε νέες εφαρμογές (Mathapati et al., 2022). Η Ελλάδα διαθέτει ακόμη σημαντικά αποθέματα και υποδομές, που μπορούν να υποστηρίξουν τη δημιουργία ενός δικτύου συλλογής, επεξεργασίας και διανομής της τέφρας για χρήση στη βιομηχανία δομικών υλικών, την οδοποιία, την αποκατάσταση εδαφών και άλλες εφαρμογές. Η θεσμική εναρμόνιση με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις, η εκπαίδευση του τεχνικού κόσμου και η υλοποίηση πιλοτικών έργων αξιοποίησης της τέφρας μπορούν να αναστρέψουν την υστέρηση της χώρας στον τομέα αυτό. Τέλος, πρέπει να κατανοηθεί ότι η σωστή διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας, είτε αυτή προέρχεται από συνεχιζόμενες μονάδες είτε από υπάρχοντα αποθέματα, μπορεί να μετατραπεί από περιβαλλοντικό πρόβλημα σε εργαλείο βιώσιμης ανάπτυξης (Παπαγιάννη κ.α, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

4.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Η παραγωγή και η κατανάλωση ιπτάμενων τεφρών στην Ευρώπη αποτελεί ένα σύνθετο και στρατηγικά σημαντικό ζήτημα, που συνδέεται άμεσα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαχείριση βιομηχανικών αποβλήτων και την εφαρμογή πρακτικών κυκλικής οικονομίας. Η ιπτάμενη τέφρα είναι παραπροϊόν της καύσης κονιοποιημένου άνθρακα, κυρίως σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Για δεκαετίες, η Ευρώπη αποτέλεσε μια από τις μεγαλύτερες πηγές παραγωγής αυτού του υλικού, με τη Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Πολωνία να συγκαταλέγονται στις χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή (Akbulut et al, 2024). Επίσης, η χρήση του άνθρακα για την ηλεκτροπαραγωγή ήταν εκτεταμένη σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες από τα μέσα του 20ού αιώνα και οδήγησε στη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων ιπτάμενης τέφρας. Ωστόσο, από τη δεκαετία του 1990 και έπειτα, οι αυξανόμενες πιέσεις για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, οι περιβαλλοντικές δεσμεύσεις στο πλαίσιο του Πρωτοκόλλου του Κιότο και αργότερα της Πράσινης Συμφωνίας της ΕΕ, οδήγησαν σε προοδευτική μείωση της εξάρτησης από τον άνθρακα και επομένως σε αντίστοιχη μείωση της παραγωγής τέφρας (Ahmaruzzaman, 2010).

Παρόλα αυτά, η Ευρώπη εξακολουθεί να διαθέτει σημαντικά αποθέματα τέφρας από το παρελθόν, ενώ παράλληλα ορισμένα κράτη συνεχίζουν να χρησιμοποιούν άνθρακα, κυρίως για λόγους ενεργειακής ασφάλειας ή λόγω περιορισμένων εναλλακτικών πηγών. Σημαντικές ποσότητες τέφρας συνεχίζουν να παράγονται στην Πολωνία, τη Βουλγαρία, τη Ρουμανία και σε μικρότερο βαθμό στη Γερμανία και την Τσεχία. Σε κάθε περίπτωση, η Ευρώπη έχει προχωρήσει πολύ περισσότερο από άλλες περιοχές του κόσμου στη διαχείριση και αξιοποίηση αυτού του παραπροϊόντος (Mathapati et al., 2022). Παράλληλα, υποστηρίζεται ότι η κατανάλωση ιπτάμενης τέφρας στην Ευρώπη είναι υψηλή συγκριτικά με την παγκόσμια μέση τιμή. Σε αρκετές χώρες της Δυτικής Ευρώπης, περισσότερο από το 70% της παραγόμενης τέφρας επαναχρησιμοποιείται, κυρίως σε δομικές εφαρμογές. Η κυριότερη χρήση είναι στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, αντικαθιστώντας μερικώς το κλίνκερ και μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, η τέφρα αξιοποιείται σε εφαρμογές οδοποιίας, στη σταθεροποίηση εδαφών, στην κατασκευή φραγμάτων και σε έργα αποκατάστασης τοπίων, όπως πρώην ορυχεία και χωματερές (Ahmaruzzaman, 2010).



Εικόνα 7: Κάποιες από τις κύριες εφαρμογές ιπτάμενης τέφρας.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει αυστηρά πρότυπα για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας, προκειμένου να διασφαλίζεται η ποιότητα και η ασφάλεια των υλικών που προορίζονται για κατασκευές. Όπως ήδη επισημάνθηκε, το πρότυπο EN 450 καθορίζει τις τεχνικές απαιτήσεις για την τέφρα που προορίζεται για χρήση σε τσιμέντο, ενώ άλλα πρότυπα όπως τα EN 14227 και EN 13286 αφορούν εφαρμογές σε οδοστρώματα και γεωτεχνικά έργα. Αυτά τα πρότυπα διευκολύνουν την αξιοποίηση του υλικού, αλλά και περιορίζουν τη χρήση τέφρας που δεν πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές (Wattimena et al., 2017).

Σημαντικός παράγοντας στην επιτυχημένη ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας στη βιομηχανία μπορεί να θεωρηθεί η ύπαρξη θεσμικού πλαισίου και η υιοθέτηση πολιτικών κυκλικής οικονομίας. Κράτη, όπως η Γερμανία και η Ολλανδία έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένα δίκτυα συλλογής, επεξεργασίας και διανομής τέφρας, με τη συνεργασία του ιδιωτικού και δημόσιου τομέα. Επιπλέον, η οικονομική αξία της τέφρας αναγνωρίζεται από τη βιομηχανία, καθώς η χρήση της μειώνει το κόστος παραγωγής τσιμέντου, βελτιώνει τις ιδιότητες του σκυροδέματος και περιορίζει την ανάγκη για παρθένα υλικά (Ahmaruzzaman, 2010).

Όμως, υπάρχουν και προκλήσεις, καθώς με τη μείωση της χρήσης του άνθρακα στην Ε.Ε. , μειώνεται και η διαθεσιμότητα της τέφρας, γεγονός που επηρεάζει τη βιομηχανία τσιμέντου και δομικών υλικών, η οποία έχει πλέον εξαρτηθεί σε σημαντικό βαθμό από την παρουσία της. Επιπλέον, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για καθαρότητα και χαμηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα ή άλλα επιβλαβή συστατικά απαιτούν επένδυση σε τεχνολογίες καθαρισμού και επεξεργασίας του υλικού. Σε ορισμένες χώρες, όπως το Βέλγιο και η Γαλλία, καταγράφεται αυξημένη εισαγωγή τέφρας από τρίτες χώρες λόγω έλλειψης εγχώριας παραγωγής, στοιχείο που αποκαλύπτει την ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση παλαιών αποθεμάτων ή εναλλακτικών υλικών (Wattimena et al, 2017).

Τα τελευταία χρόνια φαίνεται ότι η Ευρώπη κινείται προς την κατεύθυνση της ενεργειακής μετάβασης, αλλά ταυτόχρονα προσπαθεί να αξιοποιήσει τα υποπροϊόντα του παρελθόντος, ώστε να επιτύχει έναν βιώσιμο τρόπο κατασκευών με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση των υφιστάμενων αποθεμάτων ιπτάμενης τέφρας, μέσω σύγχρονων τεχνικών και ασφαλών διαδικασιών, αποτελεί μια ευκαιρία για περαιτέρω ανάπτυξη πρακτικών κυκλικής οικονομίας (Papadakis & Tsimas, 2002).

Σε γενικές γραμμές, υποστηρίζεται ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση καλείται να ισορροπήσει ανάμεσα στη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση και στην έξυπνη επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων, επενδύοντας στην τεχνολογική καινοτομία και στην ορθή διαχείριση των βιομηχανικών παραπροϊόντων, ώστε η τέφρα να παραμείνει χρήσιμο εργαλείο στο μέλλον των κατασκευών (Wattimena et al., 2017).

4.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας, ενός παραπροϊόντος της καύσης λιγνίτη ή άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη σε ποικίλες βιομηχανικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, με κυριότερη αυτή της παραγωγής σκυροδέματος και τσιμέντου. Η αξιοποίησή της αποτελεί πλέον μια στρατηγική επιλογή, που συνδυάζει τη μείωση του κόστους παραγωγής με την προώθηση της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Αρκετοί μελετητές εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στη μείωση του κόστους των πρώτων υλών, καθώς η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μερικός αντικαταστάτης του κλίνκερ, του βασικού και ιδιαίτερα ενεργοβόρου συστατικού του τσιμέντου Portland. Η παραγωγή κλίνκερ απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και καταναλώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, ενώ εκπέμπει σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) (Paya et al., 2001).

Η ενσωμάτωση της τέφρας σε ποσοστά 20% έως και 60% οδηγεί σε σημαντική μείωση των ενεργειακών αναγκών και του λειτουργικού κόστους των εργοστασίων τσιμέντου. Έτσι, η τελική τιμή του προϊόντος γίνεται πιο ανταγωνιστική, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου η τιμή της ενέργειας είναι αυξημένη ή υπόκειται σε περιβαλλοντικούς φόρους. Παράλληλα, η χρήση της τέφρας περιορίζει την ανάγκη εξόρυξης και επεξεργασίας παρθένων πρώτων υλών, όπως ο ασβεστόλιθος και ο άργιλος. Αυτό συνεπάγεται όχι μόνο περιβαλλοντικό αλλά και οικονομικό όφελος, καθώς μειώνονται τα έξοδα εξόρυξης, μεταφοράς και κατεργασίας αυτών των υλικών. Σε πολλές περιπτώσεις, η τέφρα παρέχεται σε εργοστάσια ή μονάδες σκυροδέματος σε χαμηλό ή και μηδενικό κόστος, ειδικά όταν προέρχεται από αποθέματα που πρέπει ούτως ή άλλως να διατεθούν (Wattimena et al., 2017).

Ένα άλλο οικονομικό πλεονέκτημα είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα. Το σκυρόδεμα με τέφρα εμφανίζει μειωμένο πορώδες, μεγαλύτερη αντίσταση σε χημική προσβολή και καλύτερη συμπεριφορά στο χρόνο. Η αυξημένη ανθεκτικότητα μεταφράζεται σε λιγότερες επισκευές, μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης και χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής των υποδομών. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει ιδιαίτερη σημασία σε έργα μεγάλης κλίμακας όπως γέφυρες, φράγματα, σήραγγες ή

υποδομές οδοποιίας, όπου τα κόστη συντήρησης είναι ιδιαίτερα υψηλά. Επιπλέον, η χρήση της τέφρας συμβάλλει στη μείωση του κόστους διάθεσης βιομηχανικών αποβλήτων. Αντί η τέφρα να διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής με σημαντικό κόστος και περιβαλλοντικό ρίσκο, αξιοποιείται ως δευτερογενές υλικό με εμπορική αξία. Αυτό όχι μόνο μειώνει τα τέλη ταφής για τις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, αλλά μπορεί να δημιουργήσει και νέα έσοδα μέσω της πώλησης της τέφρας (Akbulut et al., 2024).

Πέρα από αυτά, υποστηρίζεται ότι η χρήση ιπτάμενης τέφρας προωθεί τη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές και διεθνείς περιβαλλοντικές πολιτικές, γεγονός που επιτρέπει την πρόσβαση σε χρηματοδοτικά εργαλεία και προγράμματα για βιώσιμες κατασκευές. Έτσι, οι επιχειρήσεις που επενδύουν στην τέφρα αποκτούν όχι μόνο άμεσο οικονομικό πλεονέκτημα, αλλά και στρατηγική θέση σε μια αναδυόμενη αγορά πράσινων υποδομών. Κατά συνέπεια, η οικονομική αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας δεν περιορίζεται μόνο στη μείωση κόστους παραγωγής, αλλά επεκτείνεται στη δημιουργία προστιθέμενης αξίας σε όλο τον κύκλο ζωής των κατασκευών και στη διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την ανταγωνιστικότητα των εμπλεκόμενων κλάδων (Wattimena et al., 2017).

Προκειμένου, ωστόσο, να αξιοποιηθεί πλήρως η ιπτάμενη τέφρα, απαιτείται ένα ευρύτερο πλαίσιο θεσμικής στήριξης, τεχνολογικής προσαρμογής και κοινωνικής αποδοχής. Η ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή δομικών υλικών και υποδομών δεν μπορεί να προχωρήσει, απρόσκοπτα χωρίς τη συστηματική καθιέρωση εθνικών και υπερεθνικών πολιτικών που θα ενθαρρύνουν την κυκλική οικονομία, τη χρήση δευτερογενών πρώτων υλών και τη βιώσιμη διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων. Αρχικά, το ενδιαφέρον πρέπει να εστιαστεί στη θεσμοθέτηση ρυθμιστικών πλαισίων τα οποία θα ορίζουν σαφώς τα τεχνικά πρότυπα για τη χρήση της τέφρας, τις προδιαγραφές ασφαλείας και τις διαδικασίες πιστοποίησης. Χωρίς σαφείς κατευθυντήριες γραμμές, οι επιχειρήσεις διστάζουν να επενδύσουν σε μια τεχνολογία που ενδέχεται να θεωρηθεί επισφαλής ή νομικά ασαφής, όπως άλλωστε θα επισημανθεί και στο επόμενο κεφάλαιο (Rao et al., 2007).

Παράλληλα, η δημιουργία κινήτρων για τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, όπως οι φορολογικές απαλλαγές, οι επιδοτήσεις, ή η πρόσβαση σε ευρωπαϊκά και διεθνή χρηματοδοτικά εργαλεία, μπορεί να λειτουργήσει καταλυτικά για τη διείσδυση του υλικού σε μεγαλύτερη κλίμακα. Πέρα από αυτά, πρέπει να δίνεται προτεραιότητα σε έργα δημόσιας υποδομής που αξιοποιούν πράσινα και δευτερογενή υλικά, δημιουργώντας έτσι ζήτηση και παράλληλα ενισχύοντας τη δημόσια εμπιστοσύνη. Τέτοιες πολιτικές έχουν ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε χώρες, όπως η Ολλανδία και η Γερμανία, όπου η τέφρα χρησιμοποιείται συστηματικά σε έργα οδοποιίας και λιμενικών κατασκευών (Akbulut et al., 2024).

Σε τεχνικό επίπεδο, η πρόκληση έγκειται στην τυποποίηση των ιδιοτήτων της τέφρας και στην ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου ποιότητας, που να εξασφαλίζουν την καταλληλότητά της για διάφορες εφαρμογές (Wattimena et al., 2017).

Η ποιότητα της ιπτάμενης τέφρας δεν είναι πάντα σταθερή, καθώς εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, τις συνθήκες καύσης, την τεχνολογία καθαρισμού καυσασερίων και τον τρόπο συλλογής του υλικού. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, όπως η αντοχή, η ανθεκτικότητα και η αντοχή σε χημικές επιθέσεις. Για τον λόγο αυτό υποστηρίζεται ότι είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν πρότυπα χαρακτηρισμού και ταξινόμησης της τέφρας, καθώς και συστήματα παρακολούθησης της ποιότητάς της, τα οποία θα βασίζονται σε αξιόπιστες αναλυτικές μεθόδους και θα διευκολύνουν την πιστοποίηση προϊόντων που την περιέχουν (Attarde et al., 2014).

Η καινοτομία μπορεί επίσης να παίξει καθοριστικό ρόλο στην τεχνολογική αναβάθμιση της τέφρας. Η χρήση της σε γεωπολυμερή υλικά, σταθεροποιημένα οικοδομικά προϊόντα ή συνδυαστικά με άλλα βιομηχανικά παραπροϊόντα, εμφανίζει αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα ως προς την αντοχή, τη θερμική σταθερότητα και την περιβαλλοντική ασφάλεια. Ερευνητικά κέντρα σε πολλές χώρες αναπτύσσουν τεχνολογίες καθαρισμού και ενεργοποίησης της τέφρας, ώστε να αυξηθεί η αντιδραστικότητά της και να βελτιωθούν οι ιδιότητές της. Η πρόοδος στον τομέα της νανοτεχνολογίας, της μικροδομικής ανάλυσης και της μοντελοποίησης υλικών συμβάλλει καθοριστικά στη βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της τέφρας και στην αποτελεσματικότερη ενσωμάτωσή της σε νέα σύνθετα υλικά (Akbulut et al., 2024).

Εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος της κοινωνικής αποδοχής στη διεύρυνση της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας. Παρά τα τεκμηριωμένα πλεονεκτήματα, πολλοί επαγγελματίες στον τομέα της κατασκευής εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν την τέφρα ως δευτερογενές, και κατά τεκμήριο κατώτερης ποιότητας, υλικό. Η προκατάληψη αυτή ενισχύεται από ελλιπή ενημέρωση, απουσία εμπειρίας και φόβους σχετικά με την περιβαλλοντική και υγειονομική ασφάλεια. Για να αλλάξει αυτή η εικόνα, απαιτείται στοχευμένη εκπαίδευση των μηχανικών, των εργολάβων και των φορέων σχεδιασμού δημοσίων έργων, καθώς και εκστρατείες ενημέρωσης του κοινού σχετικά με τα πλεονεκτήματα της τέφρας και τη συμβολή της στη βιώσιμη ανάπτυξη. Η ύπαρξη επιτυχημένων παραδειγμάτων και πιλοτικών έργων με θετικά αποτελέσματα μπορεί να ενισχύσει την εμπιστοσύνη και να άρει τις επιφυλάξεις (Attarde et al., 2014).

Επιπλέον, η αξιοποίηση της τέφρας μπορεί να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες απασχόλησης και επιχειρηματικότητας σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο. Η επεξεργασία, η διανομή και η πιστοποίηση της τέφρας απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό, τεχνικό εξοπλισμό και δικτύωση μεταξύ μονάδων παραγωγής και κατασκευαστικών επιχειρήσεων. Ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή παραγωγή τέφρας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, μπορεί να αναπτυχθεί ένα τοπικό βιομηχανικό οικοσύστημα που να συνδέει τη διαχείριση αποβλήτων με την καινοτομία, τη βιομηχανική συμβίωση και την πράσινη ανάπτυξη (Zhao et al., 2010).

Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της βιώσιμης περιφερειακής ανάπτυξης και ενισχύει τη μετάβαση σε ένα κυκλικό μοντέλο οικονομίας. Με βάση αυτά τα στοιχεία κατανοείται ότι η χρήση της ιπτάμενης τέφρας δεν πρέπει να θεωρείται μόνο μέσο επίλυσης ενός περιβαλλοντικού προβλήματος, αλλά να προσεγγίζεται και ως μοχλός για την

αναβάθμιση ολόκληρου του τομέα των κατασκευών. Σε έναν κόσμο που κινείται ταχέως προς την απαλλαγή από τον άνθρακα και την ενεργειακή απόδοση, τα υλικά με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα αναμένεται να αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία. Η τέφρα, ως υποπροϊόν που μπορεί να μετατραπεί σε υψηλής ποιότητας κατασκευαστικό υλικό, μπορεί να επιβεβαιώσει αυτή τη νέα φιλοσοφία. Η ενσωμάτωσή της στα σύγχρονα συστήματα οικοδομικών υλικών, τόσο στην παραδοσιακή κατασκευή όσο και στις νέες μορφές βιώσιμης δόμησης (όπως τα παθητικά ή ενεργειακά ουδέτερα κτίρια), αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας (Attarde et al., 2014).

Η εμπειρία από άλλες χώρες δείχνει ότι όπου υπήρξε πολιτική βούληση, θεσμική πρόβλεψη και τεχνική υποστήριξη, η χρήση της ιπτάμενης τέφρας γνώρισε σημαντική άνθηση. Στην Ινδία, η κυβέρνηση έχει θεσπίσει υποχρεωτική χρήση τέφρας σε έργα κοντά σε σταθμούς παραγωγής, προκειμένου να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να ενισχύσει την κυκλική χρήση υλικών. Αντίστοιχες πρωτοβουλίες εφαρμόζονται στην Κίνα, τη Νότια Κορέα και την Ιαπωνία, με έμφαση στην τεχνολογική καινοτομία και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, η υιοθέτηση εργαλείων πολιτικής, η επιβράβευση των χαμηλών εκπομπών άνθρακα και η απαλλαγή τελών ταφής για ανακυκλωμένα υλικά μπορούν να δημιουργήσουν ένα ευνοϊκό οικοσύστημα για την επέκταση της αγοράς της τέφρας. Η αξιοποίηση αυτών των ευκαιριών απαιτεί ενεργοποίηση τόσο της πολιτείας όσο και της βιομηχανίας, με ορίζοντα τη διαμόρφωση ενός βιώσιμου και αποδοτικού συστήματος παραγωγής και κατασκευής (Wattiemena et al., 20170).

Κατά συνέπεια, η στρατηγική αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να αποτελέσει θεμέλιο λίθο για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών, που βασίζεται στην αποδοτικότητα των πόρων, την καινοτομία και την κοινωνική υπευθυνότητα. Με την κατάλληλη τεχνική υποστήριξη, την κατάρτιση του ανθρώπινου δυναμικού και την ενίσχυση της διατομεακής συνεργασίας, η τέφρα μπορεί να μετασχηματιστεί από παραπροϊόν της ρυπογόνου βιομηχανίας ενέργειας σε βασικό υλικό της πράσινης οικοδομής. Τέλος, είναι σαφές ότι με τον σωστό σχεδιασμό η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να αποτελέσει πρότυπο μετασχηματισμού και δείκτη μιας νέας, πιο υπεύθυνης εποχής για τον κατασκευαστικό τομέα (Attarde et al., 2014).

4.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΥΣΙΑ ΜΕΤΡΩΝ

Η απουσία περιβαλλοντικών μέτρων για τη διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας και γενικότερα των βιομηχανικών αποβλήτων έχει σοβαρές και πολυεπίπεδες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, τη δημόσια υγεία και την ποιότητα ζωής των πολιτών. Η ιπτάμενη τέφρα, ως παραπροϊόν της καύσης άνθρακα ή λιγνίτη σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, περιέχει πληθώρα ανόργανων στοιχείων και βαρέων μετάλλων, όπως αρσενικό, υδράργυρο, κάδμιο και μόλυβδο, που σε περίπτωση ανεξέλεγκτης διάθεσης μπορούν να οδηγήσουν στην πρόκληση ρύπανσης (Ahmaruzzaman, 2010).

Μία από τις βασικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την απουσία κατάλληλων μέτρων μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Όταν η

τέφρα αποθηκεύεται ή αποτίθεται χωρίς προστασία, οι βροχοπτώσεις και η φυσική απορροή νερού μπορούν να προκαλέσουν την έκπλυση τοξικών στοιχείων, δημιουργώντας στραγγίσματα, τα οποία διαπερνούν το έδαφος και φτάνουν στους υπόγειους υδροφορείς ή σε παρακείμενα ρέματα και ποτάμια. Με τον τρόπο αυτό προκαλείται η υποβάθμιση των υδάτινων πόρων, γεγονός που επηρεάζει τόσο το οικοσύστημα όσο και την ποιότητα του πόσιμου νερού (Wattimena et al., 2017).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ταυτόχρονα μια σημαντική συνέπεια. Η απουσία ελέγχου στη διαχείριση και μεταφορά της ξηρής τέφρας μπορεί να οδηγήσει σε διασπορά σωματιδίων (στον αέρα, τα οποία είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Η εισπνοή αυτών των σωματιδίων συνδέεται με αναπνευστικά και καρδιολογικά προβλήματα, καθώς και με αυξημένο κίνδυνο καρκινογένεσης. Στο πλαίσιο αυτό, διάφορες περιοχές κοντά σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας ή χώρους απόθεσης τέφρας χωρίς επαρκή μέτρα προστασίας, αντιμετωπίζουν αυξημένο φορτίο ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Παράλληλα, η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων μπορεί να καταστήσει το έδαφος μη καλλιεργήσιμο και επικίνδυνο για τη χλωρίδα και πανίδα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επίδραση είναι μακροχρόνια, καθώς τα τοξικά στοιχεία παραμένουν στο έδαφος για δεκαετίες, εμποδίζοντας την αποκατάσταση των φυσικών λειτουργιών του οικοσυστήματος (Akbulut et al., 2024).

Εκτός, όμως, από τις άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η απουσία μέτρων επιτείνει και τις κοινωνικοοικονομικές συνέπειες. Οι υποβαθμισμένες περιοχές χάνουν την αγροτική και τουριστική τους αξία, μειώνεται η ποιότητα ζωής των κατοίκων, ενώ το κράτος αναγκάζεται να επενδύει μεγάλα ποσά σε έργα αποκατάστασης, απορρύπανσης και υγειονομικής περίθαλψης. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι η απουσία περιβαλλοντικής πολιτικής στη διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας έρχεται σε αντίθεση με τις δεσμεύσεις της χώρας για την προστασία του περιβάλλοντος και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης. Είναι σαφές ότι η αδράνεια υπονομεύει την ευρωπαϊκή στρατηγική για την κυκλική οικονομία και αποτρέπει την αξιοποίηση δευτερογενών υλικών σε κατασκευαστικές εφαρμογές που θα μπορούσαν να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της βιομηχανίας (Ahmaruzzaman, 2010).

Στο πλαίσιο αυτό υποστηρίζεται ότι η θεσμική ρύθμιση της διαχείρισης της ιπτάμενης τέφρας οφείλει να αποτελέσει προτεραιότητα της περιβαλλοντικής πολιτικής σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο (Ahmaruzzaman, 2010).

Σε πολλές περιπτώσεις, η απουσία ενός συνεκτικού νομικού πλαισίου ή η εφαρμογή γενικών και ασαφών κανονισμών έχει οδηγήσει σε παραλείψεις, καθυστερήσεις ή ακόμα και στη συγκάλυψη περιβαλλοντικών προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαχείριση τέφρας. Η πραγματικότητα αυτή καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση ενός ειδικού θεσμικού πλαισίου, το οποίο θα ρυθμίζει τη διάθεση αλλά και την αξιοποίηση της τέφρας, εστιάζοντας το ενδιαφέρον στην πρόληψη της ρύπανσης, τη δημόσια υγεία και την προώθηση κυκλικών μοντέλων παραγωγής και κατανάλωσης (Attarde et al., 2014).

Για τον λόγο αυτό πρέπει να σχεδιαστούν αυστηρά πρότυπα συλλογής, αποθήκευσης και μεταφοράς της τέφρας, με έμφαση στην ασφάλεια των εργαζομένων, τον έλεγχο των εκπομπών και την πρόληψη των διαρροών. Πρέπει επίσης να προωθούνται οι διάφοροι μηχανισμοί ταυτοποίησης και ιχνηλασιμότητας των ποσοτήτων τέφρας που διατίθενται ή επαναχρησιμοποιούνται, ώστε να αποτρέπεται η ανεξέλεγκτη ή παράνομη διάθεση. Ιδιαίτερα σημαντική μπορεί να θεωρηθεί και η ενίσχυση των ελέγχων σε χώρους απόθεσης, με στόχο τη στεγανοποίηση, την παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων και την εγκατάσταση φίλτρων σκόνης αλλά και τη λειτουργία διαφόρων συστημάτων ανάκτησης στραγγισμάτων. Η εμπειρία από άλλες ευρωπαϊκές χώρες έχει δείξει ότι τέτοιες παρεμβάσεις είναι τεχνικά εφικτές και εξαιρετικά αποτελεσματικές στον περιορισμό της ρύπανσης (Mrroueh et al., 2001).

Παράλληλα, οφείλει να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διαχείριση της τέφρας. Η τακτική ανάλυση της σύστασης της τέφρας, η παρακολούθηση της ποιότητας αέρα και νερού σε περιοχές κοντά σε σταθμούς παραγωγής και χώρους απόθεσης, αλλά και η επιδημιολογική μελέτη των επιπτώσεων στην υγεία του τοπικού πληθυσμού, είναι εργαλεία απαραίτητα για τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων πολιτικών. Ο συνδυασμός αυτών των πληροφοριών με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) μπορεί να ενισχύσει τον εντοπισμό περιβαλλοντικά ευάλωτων περιοχών και να καθοδηγήσει προληπτικά μέτρα (Zhao et al., 2010).

Επιπλέον, η διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στη δημόσια διοίκηση. Η ενεργή συμμετοχή της βιομηχανίας είναι απαραίτητη για την επιτυχία κάθε στρατηγικής διαχείρισης. Τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου, ως κύριοι παραγωγοί και καταναλωτές της τέφρας αντίστοιχα, πρέπει να αναλάβουν αυξημένες ευθύνες ως προς την επεξεργασία, την ασφάλεια και την ανιχνευσιμότητα του υλικού. Η δημιουργία συνεργειών μεταξύ αυτών των φορέων μπορεί να συμβάλει στην ορθολογική χρήση της τέφρας, μετατρέποντας τη διαχείριση αποβλήτων σε ευκαιρία για αποδοτικότερη χρήση των πόρων και βιομηχανική συμβίωση (Mrroueh et al., 2001).

Πέρα από αυτά, κρίνεται επιτακτική η προώθηση της έρευνας και της καινοτομίας στη διαχείριση και αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας, καθώς μόνο με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί η σωστή της αξιοποίηση (Rao et al., 2007)

Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών επεξεργασίας, η ενεργοποίηση της τέφρας μέσω χημικών ή θερμικών μεθόδων και η αξιοποίησή της σε προηγμένα υλικά κατασκευής μπορούν να μετατρέψουν την τέφρα σε έναν στρατηγικό πόρο. Για τον λόγο αυτό οι ερευνητικοί φορείς και τα πανεπιστήμια πρέπει να στηριχθούν μέσα από ειδικά προγράμματα χρηματοδότησης και στρατηγικές συμπράξεις με τον παραγωγικό τομέα (Zhao et al., 2010).

Η διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας πρέπει επίσης να ενταχθεί στο ευρύτερο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, που προωθεί την επαναχρησιμοποίηση υλικών, τη μείωση της

σπατάλης πόρων και τη μεγιστοποίηση της αξίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής των προϊόντων. Η αξιοποίηση της τέφρας ως δευτερογενούς πρώτης ύλης, ιδιαίτερα στον κατασκευαστικό τομέα, μπορεί να μειώσει δραστικά την κατανάλωση πρωτογενών υλικών και να περιορίσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κατασκευών. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δημόσια έργα θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρότυπα βιώσιμης δόμησης, ενσωματώνοντας την τέφρα σε τεχνικές προδιαγραφές και τεύχη δημοπράτησης (Wattimena et al., 2017). Επιπλέον, η διαφάνεια, η ενημέρωση και η συμμετοχή των πολιτών στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση της τέφρας είναι προϋποθέσεις για την επιτυχία οποιασδήποτε πολιτικής. Η δημιουργία μηχανισμών διαβούλευσης, η εκπαίδευση της κοινής γνώμης και η ανάδειξη καλών πρακτικών μπορούν να καλλιεργήσουν κλίμα εμπιστοσύνης και να ενισχύσουν τη συλλογική υπευθυνότητα απέναντι στα περιβαλλοντικά ζητήματα. Οι τοπικές κοινωνίες δεν πρέπει να θεωρούνται απλοί αποδέκτες επιπτώσεων, αλλά ενεργοί φορείς παρακολούθησης, ελέγχου και συμμετοχής (Attarde et al., 2014).

Κατά συνέπεια, η διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας απαιτεί μια πολυεπίπεδη προσέγγιση που συνδυάζει την αυστηρή περιβαλλοντική εποπτεία με την προώθηση της καινοτομίας και την εμπλοκή όλων των εμπλεκομένων φορέων. Η απουσία μέτρων δεν συνιστά απλώς περιβαλλοντική αμέλεια, αλλά υπονομεύει τις αναπτυξιακές προοπτικές μιας χώρας και την ποιότητα ζωής των πολιτών της. Αντίθετα, η ενεργή, θεσμικά ρυθμισμένη και τεχνικά εφικτή αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να μετατρέψει ένα πρόβλημα σε ευκαιρία για περιβαλλοντική πρόοδο, οικονομική αποδοτικότητα και κοινωνική ευημερία. Με βάση όλα αυτά τα στοιχεία μπορεί να κατανοηθεί ότι η απουσία μέτρων για τη διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντικό κίνδυνο αλλά και εμπόδιο για την υιοθέτηση σύγχρονων, βιώσιμων πρακτικών που θα μπορούσαν να ωφελήσουν τόσο το περιβάλλον όσο και την οικονομία. Για τον λόγο αυτό υποστηρίζεται ότι η ανάγκη για ορθολογική, θεσμικά ρυθμισμένη και τεχνικά ασφαλή αξιοποίηση της τέφρας είναι πιο επιτακτική από ποτέ (Wattimena et al., 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

5.1 Τα σημαντικότερα κατασκευαστικά έργα με χρήση της ιπτάμενης τέφρας

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε κατασκευαστικά έργα αποτελεί πλέον μια από τις πιο καινοτόμες και περιβαλλοντικά φιλικές πρακτικές της σύγχρονης μηχανικής. Ως παραπροϊόν της καύσης του άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, η ιπτάμενη τέφρα έχει αναγνωριστεί σε διεθνές επίπεδο ως ένα πολύτιμο υλικό, με εφαρμογές που καλύπτουν από έργα πολιτικού μηχανικού μέχρι μεγάλα υποδομικά έργα. Η αξιοποίησή της βασίζεται κυρίως στις ποζολανικές της ιδιότητες, οι οποίες ενισχύουν τη μηχανική αντοχή και τη μακροχρόνια συμπεριφορά του σκυροδέματος (Akbulut et al., 2024).

Στο πλαίσιο σημαντικών κατασκευών, η σημασία της χρήσης ιπτάμενης τέφρας είναι εμφανής σε έργα διεθνούς φήμης. Ενδεικτικά, αναφέρεται ο υψηλότερος ουρανοξύστης στον κόσμο του Burj Khalifa στο Ντουμπάι, για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα εμπλουτισμένο με μεγάλη περιεκτικότητα ιπτάμενης τέφρας, ώστε να μειωθεί η εκλυόμενη θερμότητα ενυδάτωσης και να ενισχυθεί η ανθεκτικότητα της κατασκευής σε συνθήκες υπερβολικής θερμότητας. Επίσης, η επίτευξη της απαιτούμενης αντοχής και διάρκειας ζωής του σκυροδέματος υπό ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις βασίζεται στη συμβολή της ιπτάμενης τέφρας (Wattimena et al., 2017).



Εικόνα 8: Ο ουρανοξύστης Burj Khalifa, όπου χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας για μείωση θερμότητας ενυδάτωσης και αυξημένη αντοχή.

Ένα άλλο παράδειγμα υψηλής κλίμακας αποτελεί το φράγμα Hickory Log Creek στις ΗΠΑ, το οποίο κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της συμπύκνωσης. Η χρήση ιπτάμενης τέφρας στο συγκεκριμένο έργο ήταν κομβική, καθώς μείωσε αισθητά την εκλυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση και αύξησε τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα της κατασκευής στο νερό και στις εξωτερικές φορτίσεις. Η επιλογή της τέφρας έναντι του καθαρού τσιμέντου συντέλεσε όχι μόνο στην καλύτερη τεχνική συμπεριφορά του φράγματος αλλά και στη μείωση του κόστους παραγωγής του υλικού (Wattimena et al., 2017).

Στον τομέα της οδοποιίας, η εφαρμογή της ιπτάμενης τέφρας έχει επεκταθεί σε μεγάλο εύρος έργων υποδομής. Σε αρκετές Πολιτείες των ΗΠΑ χρησιμοποιείται με συστηματικό τρόπο για τη σταθεροποίηση των υποβάσεων οδοστρωμάτων, οδηγώντας σε βελτιωμένη φέρουσα ικανότητα και ανθεκτικότητα στις κλιματολογικές επιδράσεις. Με βάση τις δοκιμές επισημαίνεται ότι η χρήση της τέφρας επιτρέπει την ελάττωση του πάχους των επιφανειακών στρώσεων, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υλικών και τη μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής και συντήρησης (Pawel et al., 2015).

Ταυτόχρονα, η τέφρα έχει χρησιμοποιηθεί και σε μεγάλα λιμενικά έργα και αεροδρόμια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι επεκτάσεις αεροδιαδρόμων, με πιο σημαντικές αυτές που πραγματοποιήθηκαν στο αεροδρόμιο του Ντένβερ. Στην περίπτωση αυτή η ιπτάμενη τέφρα ενσωματώθηκε στο σκυρόδεμα των διαδρόμων για την ενίσχυση της αντίστασης στη θλίψη και στην απότριψη από βαριά τροχοφόρα μέσα. Επίσης, η δυνατότητα παραγωγής πιο συμπαγούς και ομοιογενούς σκυροδέματος οδήγησε σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του έργου και λιγότερες ανάγκες επισκευών (Ahmaruzzaman, 2010). Στον ευρωπαϊκό χώρο, παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ένταξη της ιπτάμενης τέφρας σε δημόσια έργα υποδομής. Στη Γερμανία και στις Σκανδιναβικές χώρες, αρκετά έργα γεφυρών, σιδηροδρομικών υποδομών και αντιπλημμυρικών έργων έχουν βασιστεί στη χρήση σκυροδέματος με υψηλό ποσοστό τέφρας, τόσο για περιβαλλοντικούς όσο και για τεχνικούς λόγους. Η σταδιακή ένταξη προτύπων (όπως το EN 450) για την ποιότητα και την εφαρμογή της ιπτάμενης τέφρας στα κατασκευαστικά έργα διευκολύνει περαιτέρω την αποδοχή της (Pawel et al., 2015).

Παρά τα πλεονεκτήματα, όμως, η χρήση ιπτάμενης τέφρας σε τέτοια έργα συναντά ορισμένα εμπόδια. Η μεταβλητότητα της ποιότητας της τέφρας ανάλογα με την προέλευση, η αβεβαιότητα των μελετητών για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά της σε κάθε εφαρμογή, καθώς και η έλλειψη ολοκληρωμένων κανονιστικών πλαισίων σε ορισμένες χώρες, αποτελούν παράγοντες που επιβραδύνουν την πλήρη ενσωμάτωσή της στον κλάδο των κατασκευών. Όμως, με την ενίσχυση της πράσινης πολιτικής και την ανάγκη για πιο βιώσιμες κατασκευαστικές λύσεις, τα επόμενα χρόνια προβλέπεται σημαντική αύξηση της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας. Οι κατασκευαστές και οι μηχανικοί στρέφονται όλο και περισσότερο σε τεχνολογίες που μειώνουν το ενεργειακό αποτύπωμα των έργων, χωρίς να θυσιάζουν την ποιότητα και την αντοχή. Η ιπτάμενη τέφρα, με τη δυνατότητα μερικής αντικατάστασης του τσιμέντου, εμφανίζεται ως ένα από τα πιο ελπιδοφόρα υλικά αυτής της μετάβασης (Akbulut et al., 2024).

Η εφαρμογή της ιπτάμενης τέφρας σε κατασκευαστικά έργα κάθε κλίμακας αποδεικνύει έμπρακτα τις τεχνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές της δυνατότητας. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ως σημαντική πρόκληση για το μέλλον μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η θεσμική και τεχνική εδραίωση της χρήσης της, με στόχο την ανάπτυξη μιας πιο κυκλικής και βιώσιμης κατασκευαστικής πρακτικής (Ahmaruzzaman, 2010).

5.2 Περιορισμοί και προκλήσεις

Παρά τα πολλαπλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε κατασκευαστικά έργα, με πιο σημαντικά την ενίσχυση της αντοχής του σκυροδέματος, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την οικονομική αποδοτικότητα, η πρακτική εφαρμογή της εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Η αξιοποίησή της στην πράξη καλείται να διαχειριστεί ποικίλους τεχνικούς, κανονιστικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς περιορισμούς, που επηρεάζουν την ευρεία υιοθέτηση του συγκεκριμένου υλικού από την κατασκευαστική βιομηχανία. Η κατανόηση αυτών των προκλήσεων είναι σημαντική για τη διαμόρφωση πολιτικών και τεχνικών στρατηγικών, που θα επιτρέψουν τη βιώσιμη και ασφαλή ενσωμάτωσή της στις σύγχρονες δομικές πρακτικές (Attarde et al., 2014).

Ένας από τους βασικότερους τεχνικούς περιορισμούς είναι η μεταβλητότητα της χημικής σύστασης της ιπτάμενης τέφρας. Η σύνθεσή της εξαρτάται από τον τύπο του άνθρακα που χρησιμοποιείται για την καύση (π.χ. λιγνίτης, ανθρακίτης) καθώς και από τις τεχνολογικές παραμέτρους της διεργασίας καύσης. Η ποικιλομορφία αυτή καθιστά δύσκολη τη δημιουργία σταθερών ποιοτικών προτύπων και επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού όταν ενσωματώνεται σε σκυρόδεμα ή άλλα προϊόντα. Η αστάθεια στα επίπεδα διοξειδίου του πυριτίου, αλουμίνιας και οξειδίου του ασβεστίου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη ποζολανική δραστηριότητα ή απρόβλεπτες μηχανικές ιδιότητες (Poon et al., 2002).

Ένα άλλο τεχνικό ζήτημα αφορά την παρουσία ανεπιθύμητων προσμίξεων. Η ιπτάμενη τέφρα ενδέχεται να περιέχει βαρέα μέταλλα, όπως αρσενικό, μόλυβδο ή υδράργυρο, καθώς και άκαυστο άνθρακα σε ποσοστά που επηρεάζουν αρνητικά τόσο την ποιότητα του σκυροδέματος όσο και την περιβαλλοντική του ασφάλεια. Η υπέρβαση ορίων στο δείκτη LOI μειώνει την πρόσφυση του υλικού με τα πρόσμικτα και δυσκολεύει την ενυδάτωση του τσιμέντου, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να αλλοιώσει τον χρόνο πήξης και τις τελικές αντοχές του σκυροδέματος (Rao et al., 2007).

Σημαντικά προβλήματα εμφανίζονται και ως προς τη συμβατότητα της ιπτάμενης τέφρας με άλλα υλικά. Η συνύπαρξή της με ορισμένα χημικά πρόσθετα μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργίες στο μείγμα, όπως υπερβολική καθυστέρηση πήξης ή ανεπιθύμητη απόπλυση συστατικών. Επιπλέον, η διαφορετική υφή και κοκκομετρία της τέφρας δυσχεραίνει την ακριβή σχεδίαση μιγμάτων σκυροδέματος και απαιτεί εξειδικευμένη τεχνική γνώση (Attarde et al., 2014).

Σε γενικές γραμμές η μεταβλητή ποιότητα της ιπτάμενης τέφρας, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του άνθρακα και τις συνθήκες καύσης στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, αποτελεί

ένα ιδιαίτερα σημαντικό τεχνικό πρόβλημα. Με τον τρόπο αυτό δυσχεραίνεται η πρότυπη χρήση της σε κατασκευές, καθώς δεν υπάρχει σταθερότητα στις ιδιότητές της. Επιπλέον, η έλλειψη κατάλληλης τεχνογνωσίας και εκπαίδευσης στους εργολάβους και τεχνικούς δημιουργεί δυσκολίες στη σωστή ενσωμάτωση της τέφρας σε μίγματα σκυροδέματος. Τεχνικά προβλήματα εμφανίζονται επίσης στη μεταφορά και αποθήκευση της τέφρας, εξαιτίας της λεπτόκοκκης μορφής της, η οποία προκαλεί φθορές στον εξοπλισμό, σκόνη και μπλοκαρίσματα. Παράλληλα, η καθυστερημένη σκλήρυνση του σκυροδέματος που περιέχει υψηλά ποσοστά ιπτάμενης τέφρας αποτελεί πρόκληση, κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες (Papadakis, 2000).

Στο θεσμικό επίπεδο, η απουσία ενός εναρμονισμένου και αυστηρά εφαρμοζόμενου κανονιστικού πλαισίου αποτελεί σοβαρό ανασταλτικό παράγοντα. Αν και υφίστανται ευρωπαϊκά πρότυπα (όπως το EN 450-1), η υιοθέτησή τους στην Ελλάδα παραμένει περιορισμένη, ιδιαίτερα σε μικρά ή ιδιωτικά έργα. Επιπλέον, πολλές μονάδες παραγωγής τέφρας δεν επενδύουν στην απαιτούμενη επεξεργασία και πιστοποίηση του υλικού, είτε λόγω κόστους είτε λόγω αβεβαιότητας ως προς την εμπορική του αποδοχή. Κατά συνέπεια, είναι σαφές ότι υπάρχει έλλειψη κανονιστικών πλαισίων και προτύπων, που να ενθαρρύνουν ή να επιβάλλουν τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στις κατασκευές. Ταυτόχρονα, η κοινωνική αντίληψη της τέφρας ως αποβλήτου δημιουργεί δυσπιστία σχετικά με την ποιότητα και την ανθεκτικότητα των υλικών που την περιέχουν. Η απουσία εκτεταμένης ενημέρωσης και προβολής των πλεονεκτημάτων της βιώσιμης κατασκευής επιτείνει αυτή την επιφύλαξη (Βαντσιώτης κ.ά., 2009).

Σε οικονομικό επίπεδο η χρήση της ιπτάμενης τέφρας συνεπάγεται ορισμένα κόστη που δεν είναι πάντα άμεσα εμφανή. Αν και το υλικό προέρχεται από βιομηχανική δραστηριότητα και διατίθεται δωρεάν ή με χαμηλό τίμημα, η ανάγκη για επεξεργασία (όπως ξήρανση, κόσκινο, άλεση), μεταφορά και αποθήκευση προσθέτει σημαντικές δαπάνες, ιδιαίτερα σε έργα μακριά από τα σημεία παραγωγής. Η έλλειψη αποκεντρωμένων σημείων διάθεσης καθιστά το κόστος μεταφοράς συχνά απαγορευτικό, ακυρώνοντας το οικονομικό πλεονέκτημα του υλικού. Παράλληλα, η αβεβαιότητα στην αγορά γύρω από τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα της ιπτάμενης τέφρας λειτουργεί αποτρεπτικά για τους τελικούς χρήστες. Δεν υπάρχουν σαφή εμπορικά δίκτυα προμήθειας, ενώ απουσιάζουν μηχανισμοί ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας από ανεξάρτητους φορείς (Attarde et al., 2014).

Για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι οι κατασκευαστικές εταιρείες ή οι μηχανικοί έργων διστάζουν να βασιστούν σε ένα υλικό που δεν συνοδεύεται από σαφή τεχνικά δελτία, σταθερή προέλευση και αποδεδειγμένα παραδείγματα εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται απροθυμία επένδυσης στη χρήση τέφρας, καθώς οι αρχικοί οικονομικοί υπολογισμοί επικεντρώνονται στο άμεσο κόστος και όχι στα μακροπρόθεσμα περιβαλλοντικά ή δομικά οφέλη (Rao et al., 2007).

Η άνιση κατανομή των πηγών τέφρας καθιστά επίσης το κόστος μεταφοράς υψηλό, ειδικά σε περιοχές μακριά από σταθμούς παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα. Ταυτόχρονα,

σημαντικοί θεωρείται ότι είναι και οι ανθρωπinoi, οι κοινωνικοί και οι ψυχολογικοί παράγοντες. Ένας από τους βασικότερους μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ο σκεπτικισμός των επαγγελματιών του κλάδου, οι οποίοι δείχνουν προτίμηση στα συμβατικά υλικά, με τα οποία έχουν εξοικειωθεί. Η έλλειψη επαρκούς εκπαίδευσης για την ορθή χρήση της ιπτάμενης τέφρας, τόσο σε επίπεδο πανεπιστημιακών προγραμμάτων όσο και σε επαγγελματικά σεμινάρια, εντείνει την επιφυλακτικότητα. Σε αρκετές περιπτώσεις, εξαιτίας της έλλειψης της απαιτούμενης γνώσης, προτιμάται η αποφυγή κινδύνου, ακόμη και αν αυτό μπορεί να σημαίνει υψηλότερο κόστος ή μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Poon et al., 2002).

Πέρα από αυτά υποστηρίζεται ότι και οι ίδιοι οι καταναλωτές διατηρούν αμφιβολίες απέναντι σε υλικά που προσεγγίζονται με τη μορφή του αποβλήτου. Ο όρος τέφρα προκαλεί συχνά αρνητικούς συνειρμούς και φόβους για τοξικότητα, ακόμα και όταν το υλικό είναι πλήρως ελεγμένο και ασφαλές προς χρήση. Αυτή η κοινωνική αντίληψη μπορεί να λειτουργήσει ως τροχοπέδη στην αποδοχή και υιοθέτηση της τέφρας σε δημόσια έργα ή σε έργα υψηλής προβολής (Attarde et al., 2014).

Επιπρόσθετα, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες παραμένουν βάσιμες σε ορισμένες περιπτώσεις. Η ενδεχόμενη έκπλυση βαρέων μετάλλων ή η διάχυση λεπτών σωματιδίων στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, όταν η τέφρα χρησιμοποιείται χωρίς την κατάλληλη προετοιμασία και εγκιβωτισμό, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Επίσης, η απουσία επαρκών συστημάτων ιχνηλασιμότητας καθιστά δύσκολη την παρακολούθηση της πορείας και της τελικής διάθεσης του υλικού. Ταυτόχρονα, υποστηρίζεται ότι η ιπτάμενη τέφρα ενέχει κινδύνους λόγω της πιθανής παρουσίας βαρέων μετάλλων όπως αρσενικό, υδράργυρος και μόλυβδος, τα οποία μπορούν να διαφύγουν στο περιβάλλον, εάν δεν πραγματοποιηθεί με σωστό τρόπο η χρήση της τέφρας. Επιπλέον, η ανεπαρκής αποθήκευση της σε χώρους υγειονομικής ταφής ή δεξαμενές ενδέχεται να προκαλέσει διαρροές και να μολύνει το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα (Rao et al., 2007).

Από κατασκευαστική άποψη, τα προϊόντα που κατασκευάζονται με βάση την ιπτάμενη τέφρα (όπως τούβλα ή πλάκες) ενδέχεται να έχουν περιορισμούς ως προς το μέγεθος, τη μηχανική αντοχή ή την αισθητική. Δυσκολίες υπάρχουν και στις χειμερινές εφαρμογές, λόγω της μειωμένης απόδοσης του σκυροδέματος σε κύκλους παγετού-απόψυξης, που απαιτούν πρόσθετα υλικά για προστασία. Κατά συνέπεια, ενώ η τέφρα μπορεί να είναι ασφαλής όταν χρησιμοποιείται σωστά, η μη τήρηση των κατάλληλων διαδικασιών μπορεί να επιφέρει σοβαρούς κινδύνους (Pawel et al., 2015).

Είναι σαφές, λοιπόν, ότι η εφαρμογή της ιπτάμενης τέφρας στα κατασκευαστικά έργα αντιμετωπίζει ένα πλέγμα προκλήσεων που αφορούν τη σταθερότητα, την ποιότητα, την κοινωνική αποδοχή και τη θεσμική στήριξη. Στο πλαίσιο αυτό η επιτυχής υπέρβαση αυτών των εμποδίων προϋποθέτει τη στενή συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων φορέων (Papadakis, 2000).

Πιο συγκεκριμένα, το κράτος οφείλει να καθορίσει σαφείς κανονισμούς και να διαμορφώσει πολιτικές που θα ενθαρρύνουν τη χρήση βιώσιμων υλικών. Η βιομηχανία, επίσης, πρέπει να

επενδύσει στην ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και στη βελτίωση της τεχνογνωσίας. Οι τεχνικοί επαγγελματίες καλούνται να εκπαιδευτούν κατάλληλα και να υιοθετήσουν σύγχρονες πρακτικές κατασκευής, ενώ η κοινωνία συνολικά πρέπει να ενημερωθεί και να ευαισθητοποιηθεί για τα οφέλη της κυκλικής οικονομίας (Rao et al., 2007).

Πέρα από αυτά η ενίσχυση της τεχνικής γνώσης, η υποστήριξη της έρευνας και ανάπτυξης, καθώς και η καλλιέργεια εμπιστοσύνης προς εναλλακτικά δομικά υλικά μπορούν να θεωρηθούν σημαντικές προϋποθέσεις για την επίτευξη αυτού του στόχου. Η ιπτάμενη τέφρα έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί από ένα περιβαλλοντικό βάρος σε ένα στρατηγικό εργαλείο για την πράσινη μετάβαση στον τομέα των κατασκευών. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι, μόνο μέσα από τη συντονισμένη δράση και τη δέσμευση όλων των παραγόντων, μπορεί να επιτευχθεί η πλήρης αξιοποίηση αυτού του υλικού στο πλαίσιο μιας κυκλικής και βιώσιμης ανάπτυξης (Attarde et al., 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που διεξήχθη στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως βιομηχανικού αποβλήτου ή παραπροϊόντος. Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) είναι ένα λεπτόκοκκο, κονιορτοποιημένο βιομηχανικό παραπροϊόν που παράγεται κατά την καύση λιγνίτη ή ανθρακίτη σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την καύση, οι άκαυστες ανόργανες ενώσεις μετατρέπονται σε σωματίδια που παρασύρονται από τα καυσαέρια και συλλέγονται από ηλεκτροστατικά φίλτρα ή κυκλώνες, πριν καταλήξουν στην ατμόσφαιρα.

Η ιπτάμενη τέφρα έχει ποζολανικές ιδιότητες, δηλαδή μπορεί να αντιδράσει με το νερό και το υδροξείδιο του ασβεστίου, σχηματίζοντας ενώσεις με τσιμεντοειδή χαρακτηριστικά. Αυτό την καθιστά πολύτιμη για τη βιομηχανία των κατασκευών, ειδικά ως πρόσμειξη στο σκυρόδεμα και στο τσιμέντο.

Η σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας ποικίλλει, αλλά γενικά περιλαμβάνει: πυρίτιο (SiO_2), Αλουμίνιο (Al_2O_3), Σίδηρο (Fe_2O_3), Ασβέστιο (CaO) και ίχνη από βαρέα μέταλλα και άλλα οξείδια. Η μορφολογία της είναι συνήθως σφαιρική, κάτι που βελτιώνει τη ροή και την εργασιμότητα όταν χρησιμοποιείται ως πρόσθετο υλικό. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ιπτάμενης τέφρας: (α) Class F (χαμηλού ασβεστίου) – από καύση λιθάνθρακα, κυρίως ποζολανική και (β) Class C (υψηλού ασβεστίου) – από καύση λιγνίτη ή υπολιθάνθρακα, με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες.

Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εφαρμογές όπως:

1. Κατασκευές και σκυρόδεμα:
 - Πρόσμειξη σε τσιμέντο (π.χ. ASTM Class F & C).
 - Παραγωγή προκατασκευασμένων στοιχείων.
2. Οδοποιία:
 - Σταθεροποίηση εδαφών.
 - Κατασκευή υποδομών.
3. Εδαφοβελτίωση: Χρήση σε γεωργικές περιοχές.
4. Πρόσθετο σε τούβλα, κεραμικά και ασφαλτικά υλικά.
5. Απορρόφηση βαρέων μετάλλων: Σε φίλτρα ή περιβαλλοντικές εφαρμογές.
6. Ανάκτηση μετάλλων: Ειδικά σε προηγμένες τεχνολογίες εξόρυξης.

Επιπλέον, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας αφορούν:

1. Επαναχρησιμοποίηση αποβλήτου: Αντί να απορρίπτεται, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε πολλές βιομηχανίες.
2. Βελτίωση ιδιοτήτων σκυροδέματος:

- Αυξάνει την ανθεκτικότητα.
 - Μειώνει τη διαπερατότητα.
 - Βελτιώνει την εργασιμότητα.
3. Περιβαλλοντικά οφέλη:
 - Μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη πρώτων υλών (π.χ. τσιμέντο).
 - Ελαττώνει τις εκπομπές CO₂ στην παραγωγή σκυροδέματος.
 4. Χαμηλό κόστος: Είναι φθηνότερη σε σχέση με άλλες πρώτες ύλες.
 5. Ποζολανικές ιδιότητες: Μπορεί να αντικαταστήσει μέρος του τσιμέντου λόγω της χημικής της δραστηριότητας.

Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας είναι:

1. Μεταβλητή σύσταση: Η χημική και φυσική της σύσταση διαφέρει ανάλογα με την πηγή.
2. Πιθανή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα π.χ. αρσενικό, υδράργυρος, κάδμιο - περιβαλλοντικός και υγειονομικός κίνδυνος.
3. Ανάγκη επεξεργασίας: Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται καθαρισμός ή τροποποίηση.
4. Εξάρτηση από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς: Καθώς αυτοί μειώνονται λόγω ενεργειακής μετάβασης, περιορίζεται και η διαθεσιμότητα τέφρας.
5. Μειωμένη δραστηριότητα σε ορισμένους τύπους: Ορισμένες μορφές δεν έχουν υψηλή ποζολανική δραστηριότητα.

Από περιβαλλοντικής άποψης, είναι σαφές ότι η ενσωμάτωση της τέφρας στα κατασκευαστικά έργα συντελεί αποφασιστικά στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Με τη μερική αντικατάσταση του τσιμέντου, που είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρο υλικό, περιορίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται τα απόβλητα από τη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας. Πέρα από αυτά, είναι σαφές ότι, αντί να διατίθεται η τέφρα σε χώρους ταφής, αξιοποιείται επωφελώς, ενισχύοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η χρήση της για τον λόγο αυτό θεωρείται σημαντική τόσο για την ανακύκλωση ενός αποβλήτου όσο και για τη μείωση της εξάρτησης από πρωτογενή υλικά.

Σε οικονομικό επίπεδο, επισημάνθηκε ότι η τέφρα είναι χαμηλού κόστους υλικό, το οποίο μπορεί να μειώσει την κατανάλωση τσιμέντου και φυσικών πόρων, οδηγώντας σε φθηνότερες κατασκευές, χωρίς εκπτώσεις στην ποιότητα ή την αντοχή. Επιπλέον, τα έργα που ενσωματώνουν τέφρα θεωρείται ότι απαιτούν μικρότερη συντήρηση, γεγονός που μειώνει τα μακροπρόθεσμα λειτουργικά κόστη. Όμως, η έλλειψη θεσμικού πλαισίου, η απροθυμία ορισμένων εργολάβων να ενσωματώσουν καινοτόμα υλικά, καθώς και η ανάγκη για τεκμηριωμένες τεχνικές οδηγίες, αποτελούν εμπόδια τα οποία η πολιτεία και η επιστημονική κοινότητα καλούνται να υπερβούν.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, προτείνονται μελλοντικές έρευνες και δυνατότητες που αφορούν:

- Νέες τεχνολογίες καθαρισμού: Για απομάκρυνση βαρέων μετάλλων ή βελτίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών.
- Νανοτεχνολογία: Χρήση ιπτάμενης τέφρας για σύνθεση νανοϋλικών.
- Χρήση στην αποθήκευση CO₂: Αντίδραση με CO₂ για παραγωγή σταθερών ενώσεων (carbonation).
- Κυκλική οικονομία: Ανάπτυξη ολοκληρωμένων μοντέλων αξιοποίησης μαζί με άλλα βιομηχανικά απόβλητα.
- Αυτοματοποιημένη διαλογή και κατηγοριοποίηση: Με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης.
- Ανάπτυξη «πράσινων» προϊόντων: Οικολογικά τσιμέντα και δομικά υλικά μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα.
- Εναλλακτικές ενεργειακές εφαρμογές π.χ. ως καταλύτης ή μέσο αποθήκευσης θερμότητας σε ενεργειακά συστήματα.

Τέλος, η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ευνοεί την αειφόρο ανάπτυξη και την κυκλική οικονομία, καθώς μειώνει την ανάγκη απόθεσης αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής και αντικαθιστά ενεργοβόρα υλικά όπως το τσιμέντο Portland, μειώνοντας έτσι το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα της βιομηχανίας κατασκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγαθαγγελίδης, Ι. (2019). *Έλεγχος δραστηρότητας με ιπτάμενη τέφρα και αλκαλική ενεργοποίηση λούμης*. Θεσσαλονίκη.
2. Αθανασόπουλος, Γ., Δαλαβάγκας, Δ., Δημητράτος, Ν., Κανέλλου, Δ., Κούστας, Θ., Κουφοπάνος, Χ., Κρεστενίτη, Ρ., Λέκκας, Γ., Μαρσέλλος, Ν., Μάτσας, Ι., Μετινίδου, Μ., Μίχας, Ν., Μπάκος, Κ., Σχίζας, Α. & Φωτόπουλος, Φ. *Ιπτάμενες τέφρες. Στο Οδηγός δομικών υλικών*. ΤΕΕ.https://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_CEMENT/ts2.4.htm
3. Βαντισιώτης, Σ., Καλομοίρη, Ε. & Παπαθανασίου, Κ. (2009). *Μελέτη μιγμάτων ακατέργαστης τέφρας και εδαφικών υλικών*. Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση ΕΒΙΠΑΡ, Αιανή Κοζάνης, 1-3 Ιουνίου 2009.
4. Κοντομηνά, Α. (2017). *Αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε Ελλάδα και στο Εξωτερικό*, Πειραιάς.
5. Παπαγιάννη, Ι., Παπαβασιλείου, Α. Τραγόπουλος, Ι. & Σελεβός, Σ. (2009). *Η ιπταμένη τέφρα ως υλικό υποβάσεων οδοστρωμάτων*. Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Αιανή Κοζάνης, 1-3 Ιουνίου 2009.
6. Στιβανάκης, Β.Ε. (2003). *Έρευνα και ανάπτυξη νέων δομικών υλικών από στερεά παραπροϊόντα λιγνιτικής καύσης ενεργειακού κέντρου Μεγαλόπολης*, Πάτρα Akbulut, Z. F., Yavuz, D., Tawfik, T. A., Smarzewski, P., & Guler, S. (2024). Enhancing Concrete Performance through Sustainable Utilization of Class-C and Class-F Fly Ash: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(12), 4905.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

7. Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 327-363.
8. Attarde, S. Marathes, S. & Sii, A. (2014). Utilization of fly ash in construction industries for environment management. *Int. J. Environmental Sciences*. 3 (2). 117 – 121.
9. Gianoncelli, A., Zacco, A., Struis, R. P., Borgese, L., Depero, L. E., & Bontempi, E. (2013). Fly ash pollutants, treatment and recycling. *Pollutant diseases, remediation and recycling*, 103-213.
10. Lam, L. Wong, Y.I & Poon, C.S (1998). Effect of fly ash and silica fume compressive strength and fracture behaviors of concrete, *Cem. Con. Res.* 28 (1998) 271.

11. Li, D. Shen, J. Chen, Y. Chen, L. & Wu, X. (2000). Study of properties on fly ash – slag complex cement, *Cem. Concr. Res.* 30. 1381.
12. Mathapati, M., Amate, K., Prasad, C. D., Jayavardhana, M. L., & Raju, T. H. (2022). A review on fly ash utilization. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1535-1540.
13. Mroueh U, Eskola P,. & Laine-Ylijoki J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste Manage*, 21:271–7.
14. Papadakis, V.G. (1999). Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1727.
15. Papadakis, V.G. (2000). Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1647.
16. Papadakis, V.G. & Tsimas, S. (2002). Supplementary cementing materials in concrete: Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1533–1538.
17. Papayianni, I. (1992). *Performance of a High Calcium Fly Ash in Roller Compacted Concrete*. ACI SP-132, Editor V.M. Malhotra, 1. 367-386.
18. Paweł T. et al, (2015). A new quantification method based on SEM-EDS to assess fly ash composition and study the reaction of its individual components in hydrating cement paste, *Cement and Concrete Research* 75 (2015) 111 – 12.
19. Paya, M.V. et al, (2001). Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 41.
20. Poon, C.S., Kou, S.C. & Lam, L. (2002). Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr Build Mater*, 16:281–9.
21. Rao A, Jha K. N & Misra S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour Conserv Recy*; 50 (1):71–81.
22. Spiekermann K. & Wegener, M. (2006). The role of transport infrastructure for regional development in southeast Europe. *SEER South East Europe Review for Labour and Social Affairs*, 01, 51-61.
23. Wattimena, O. K., Antoni, A., & Hardjito, D. (2017, September). A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer. In *AIP conference proceedings* (Vol. 1887, No. 1). AIP Publishing.
24. Xu, J. Z. Watt, D.F. & Hudec, P.P. (1995). Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 1225.
25. Zhao W., Leefink R.B. & Rotter V.S. (2010). Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China—the case of Chongqing. *Resour Conserv Recy*, 54(6):377– 89.