



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ποιοτική αναβάθμιση ανακυκλωμένων αδρανών από ΑΕΚΚ με χρήση
μικροκυμάτων»

Κοντόκαλος Αναστάσιος

Εξεταστική επιτροπή:

Καθ. Γαλετάκης Μιχαήλ (επιβλέπων)

Καθ. Κομνίτσας Κωνσταντίνος

Επ.Καθ. Πετράκης Ευάγγελος

Χανιά, 2024

Οι απόψεις που εκφράζονται στην παρούσα εργασία αποτελούν την προσωπική τοποθέτηση του συγγραφέα και δεν αντικατοπτρίζουν τις θέσεις της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Παρατίθεται πλήρης βιβλιογραφική λίστα για όλες τις πηγές που έχουν χρησιμοποιηθεί είτε αυτούσιες είτε παραφρασμένες μέσα στο κείμενο.

Περίληψη

Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) είναι ένα από τα πιο ογκώδη ρεύματα αποβλήτων. Ενδεικτικά, στην Ευρώπη καταλαμβάνουν ποσοστό ίσο με το 25%-30% των συνολικά παραγόμενων αποβλήτων. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν ύλες, όπως π.χ. σκυρόδεμα, κεραμικά, γύψος, ξύλο, κ.λπ., εκ των οποίων τα περισσότερα είναι δυνατό και αναγκαίο να επαναχρησιμοποιηθούν ή/και να ανακυκλωθούν, καθώς αποτελούν κατά βάση φυσικούς, μη ανανεώσιμους πόρους. Η κατασκευαστική βιομηχανία, από την οποία προέρχονται τα ΑΕΚΚ, αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές πρώτων υλών παγκοσμίως. Η αλόγιστη εξόρυξη και χρήση πρωτογενών αδρανών υλικών για την παραγωγή δομικών υλικών, και η μετέπειτα απόρριψή τους συνιστούν καίριο περιβαλλοντικό ζήτημα της εποχής. Ένα από τα μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, αποτελεί η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των ΑΕΚΚ για την οποία έχουν οριστεί στόχοι προς εκπλήρωση από όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εκ των οποίων και η Ελλάδα. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα για την παραγωγή προϊόντων τσιμεντοκονιάματος και η αναβάθμιση των ιδιοτήτων της με την εφαρμογή μιας νέας τεχνικής εκλεκτικής θραύσης υποβοηθούμενης από θέρμανση με μικροκύματα.

Αρχικά αναλύονται οι πηγές και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων και παρατίθενται στατιστικά στοιχεία που αφορούν την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των ΑΕΚΚ σε Ελλάδα και Ευρωπαϊκή ένωση. Στη συνέχεια δίδονται βασικά στοιχεία για την μικροκυματική θέρμανση και τον τρόπο που αυτή επιδρά στον διαχωρισμό δύο υλικών. Το κύριο της εργασίας αναφέρεται στις τεχνικές επεξεργασίας και διαχωρισμού των ΑΕΚΚ που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών και πώς επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά και τις αντοχές του παραγόμενου τσιμεντοκονιάματος. Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για την περαιτέρω αξιοποίηση των ΑΕΚΚ στην κατασκευαστική βιομηχανία.

Abstract

Construction and demolition waste (CDW) are one of the heaviest and most voluminous waste streams generated. Indicatively in Europe, it accounts for 25%-30% of all waste generated. It consists a lot of materials such as concrete, ceramic, gypsum, wood and more, most of which can, and must, be recycled for they originate from natural, not renewable resources. The construction industry, from which CDW derive, make up for one of the biggest consumers of natural products worldwide. The imprudent excavation and use of such materials to produce building materials and later on the disposal of those same materials, constitute one of today's important environmental issues. One of the measures to address this issue lies in the recycling and reuse of CDW, for which targets have been set by the European Union for all each member states, including Greece. The object of this thesis is to investigate the possibility of producing sand from recycled concrete for the production of cement mortar products and to upgrade its properties by applying a new technique assisted by microwaves.

Initially, the sources and characteristics of the waste are analyzed and statistics are presented regarding the recycling and reuse of CDW in Greece and the European Union. Then basic information is given about microwave heating and how it affects the separation of the two main constituents of concrete (aggregate and binding material). The largest part of the work, however, concerns the applied processing and separation methods of CDW for the production of recycled aggregates. Particular emphasis is placed on the recycling of the above aggregates as well as how they affect the characteristics and strengths of the cement mortars produced.

Finally, the conclusions resulting from this work are presented and proposals which emphasize in the of the recycling and reuse of CDW in the construction industry are suggested.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Γαλετάκη Μιχάλη για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή του καθώς και την εξεταστική επιτροπή τον Καθ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα και τον Επικ. Καθ. Ευάγγελο Πετράκη.

Ευχαριστώ επίσης την κα. Στέλλα Ράκα και κα. Ανθή Βασιλείου για την πολύτιμη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ για τη συμβολή τους στις πειραματικές διαδικασίες της παρούσας εργασίας την κα. Παντελάκη Όλγα, τον Επικ.Καθ. Πετράκη Ευάγγελο, τον κ. Στρατάκη Αντώνιο, την Καθηγήτρια κα. Μαραβελάκη Παγώνα και την κα. Χαμηλάκη Ελένη. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εταιρεία «ANYK AEBE» για την παροχή του υλικού που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλα τα χρόνια που με στήριξαν στη σχολική αλλά και στη φοιτητική μου πορεία, στην κοπέλα μου και στους φίλους μου για την ηθική και ψυχική τους υποστήριξη.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	15
1.1 Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων	15
1.2 Διαχείριση ΑΕΚΚ	15
1.3 Επιπτώσεις ΑΕΚΚ στο Περιβάλλον	19
1.4 Ανακύκλωση των ΑΕΚΚ	19
1.5 Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα	20
1.6 Προβλήματα στη Χρήση των Ανακυκλωμένων Αδρανών	21
1.7 Παραγωγή Ανακυκλωμένου Σκυροδέματος	21
1.8 Ιδιότητες Σκυροδέματος από Ανακυκλωμένα Αδρανή	22
Κεφάλαιο 2	24
2.1 Μικροκύματα	24
2.2 Μικροκυματική Θέρμανση	24
2.3 Πλεονεκτήματα Μικροκυματικής Θέρμανσης έναντι της Απλής Θέρμανσης	25
Κεφάλαιο 3	27
3.1 Χαρακτηρισμός αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα	27
3.2 Κοκκομετρική Ανάλυση	29
3.3 Ορυκτολογική ανάλυση	33
3.4 Υδατοαπορρόφηση Αδρανών από Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα	37
3.5 Παραγωγή Αναβαθμισμένων Αδρανών	37
3.5.1 Θραύση Υλικού και Μικροκυματική Θέρμανση	37
3.5.2 Διαχωρισμός Υλικού	38
3.5.3 Παρατήρηση μέσω στερεοσκοπίου	39
3.5.4 Συντελεστής Ροής Αδρανών	52
3.5.5 Ορυκτολογική ανάλυση με XRD	53
3.5.6 Υπέρυθρη φασματοσκοπία - FTIR	54

Κεφάλαιο 4	56
<i>4.1 Παρασκευή Δοκιμών.....</i>	<i>56</i>
<i>4.2 Μέτρηση Εργασιμότητας.....</i>	<i>59</i>
<i>4.3 Εργαστηριακός Έλεγχος Δοκιμών.....</i>	<i>61</i>
<i>4.3.1 Πυκνότητα.....</i>	<i>62</i>
<i>4.3.2 Αντοχή σε Κάμψη-Κάμψη Τριών Σημείων (28 Ημέρες)</i>	<i>63</i>
<i>4.3.3 Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη(28 Ημέρες).....</i>	<i>64</i>
<i>4.4 Αποτελέσματα Δοκιμών.....</i>	<i>65</i>
Κεφάλαιο 5	71
<i>5.1 Συμπεράσματα.....</i>	<i>71</i>
<i>5.2 Προτάσεις.....</i>	<i>73</i>
<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>75</i>

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1: Ποσοστιαία διάρθρωση παραγωγής αποβλήτων, στους τομείς της στατιστικής ταξινόμησης των οικονομικών δραστηριοτήτων και στα νοικοκυριά, (ELSTAT 2020).....</i>	<i>16</i>
<i>Εικόνα 3.1: Μονάδα ανακύκλωσης ΑΕΚΚ της εταιρείας ANYK ΑΒΕΕ στο Παρθένι Ηρακλείου.....</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 3.2: Διαχωρισμός και επεξεργασία ΑΕΕΚ για παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών.....</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 3.3: Τυπική εικόνα τεμαχίου ανακυκλωμένου σκυροδέματος που υποβλήθηκε σε θραύση.....</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών (άμμος) από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.....</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 3.5: Σιαγωνωτός και Κωνικός Θραυστήρας</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 3.6: Διαχωριστής Jones.....</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 3.7: Φούρνος μικροκυμάτων του εργαστηρίου.....</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 3.8: Μηχανή κοσκίνισης και κόσκινα της εταιρείας ELEInternational.....</i>	<i>32</i>
<i>Εικόνα 3.9: Περιθλασίμετρο ακτίνων-X Bruker D8 Advance.....</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 3.10: Λειοτρίβηση δείγματος σε γονδί από αχάτη.....</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 3.11: Ζυγαριά Ακριβείας KERNALT220-4M.....</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 3.12: Υδραυλική πρέσα SpecacPressKBR25.011 για την παρασκευή των pelletsγια τη φασματοσκοπία FTIR.</i>	<i>35</i>
<i>3.13: Μορφοποιημένος δίσκος (pellet) για ανάλυση με FTIR.....</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 3.14: Φασματοφωτόμετρο υπερύθρου της NicoletIS50 FTIR</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 3.15: Μικτός κόκκος αδρανών όπου η συνδετική κονία είναι προσκολλημένη στην επιφάνεια του κόκκου του αδρανούς</i>	<i>40</i>
<i>Εικόνα 3.16: Εργαστηριακό Στερεοσκόπιο της Εταιρείας OPTIKA.....</i>	<i>41</i>

<i>Εικόνα 3.17: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN0.....</i>	<i>41</i>
<i>Εικόνα 3.18:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN0.....</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 3.19: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN0.....</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 3.20: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN5.....</i>	<i>43</i>
<i>Εικόνα 3.21: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN5.....</i>	<i>44</i>
<i>Εικόνα 3.22: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN5.....</i>	<i>44</i>
<i>Εικόνα 3.23: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN10.....</i>	<i>45</i>
<i>Εικόνα 3.24: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN10.....</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 3.25:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN10.....</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 3.26: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN20.....</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 3.27: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN20.....</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 3.28:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN20.....</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 3.29:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN40.....</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 3.30:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN40.....</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 3.31: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN40.....</i>	<i>50</i>

<i>Εικόνα 3.32: Συσκευή Προσδιορισμού Συντελεστή Ροής</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 4.1: Αναμεικτήρας Matest Mortar Mixer E094.....</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4.2: Πρισματικά Καλούπια Παρασκευής Δοκιμίων.....</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4.3: Δονούμενη Τράπεζα της εταιρείας Matest</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4.4: Θάλαμος ωρίμανσης δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων της εταιρείας Matest</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 4.5: Δοκίμια στις Μήτρες Χύτευσης.....</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 4.6: Τράπεζα Εξάπλωσης Matest UTCM-0660E</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4.7: Σύστημα Ελέγχου Αντοχής σε κάμψη/θλίψη δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων κατά EN EN 196-1. (Matest E161-03N).....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4.8: Κελί Κάμψης Τριών Σημείων.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4.9: Κελί Μονοαξονικής Θλίψης</i>	<i>65</i>

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 3.1: Κωδικοποίηση Δειγμάτων</i>	<i>31</i>
<i>Πίνακας 3.2:Κοκκομετρική ανάλυση των ανακυκλωμένων αδρανών.....</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 3.3: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN0</i>	<i>43</i>
<i>Πίνακας 3.4: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN5</i>	<i>45</i>
<i>Πίνακας 3.5: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN10</i>	<i>47</i>
<i>Πίνακας 3.6:Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN20</i>	<i>49</i>
<i>Πίνακας 3.7: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN40</i>	<i>51</i>
<i>Πίνακας 3.8: Μετρήσεις του χρόνου ροής άμμου σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-6 53</i>	
<i>Πίνακας 3.9:Ορυκτολογική σύσταση (%) του ανακυκλωμένου σκυροδέματος</i>	<i>54</i>
<i>Πίνακας 4.1: Συνθέσεις Δοκιμίων</i>	<i>56</i>
<i>Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα δοκιμής εργασιμότητας κατά EN 1015-3</i>	<i>60</i>
<i>Πίνακας 4.3:Υπολογισμού Ποσοστού Εργασιμότητας</i>	<i>60</i>
<i>Πίνακας 4.4:Υπολογισμός Πυκνότητας Δοκιμίων μετά από ωρίμανση</i>	<i>62</i>
<i>Πίνακας 4.5:Υπολογισμός Αντοχής σε Κάμψη Τριών Σημείων</i>	<i>66</i>
<i>Πίνακας 4.6:Υπολογισμός Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη</i>	<i>67</i>

Κατάλογος Σχημάτων

<i>Σχήμα 1.1: Ποσοστιαία παραγωγή αποβλήτων στην Ευρώπη το 2020 ανά κατηγορία..... (Eurostat, 2020)</i>	<i>16</i>
<i>Σχήμα 1.2: Τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων ανά κατηγορία διαχείρισης, 2020..... (ELSTAT 2020).....</i>	<i>17</i>
<i>Σχήμα 1.3: Ποσοστιαία κατανομή παραγόμενων ποσοτήτων ΑΕΚΚ ανά περιφέρεια (Καμελίδης, 2020)</i>	<i>18</i>
<i>Σχήμα 3.1: Κοκκομετρική καμπύλη ανακυκλωμένης και Λατομικής Άμμου με όρια ταξινόμησης άμμου.....</i>	<i>33</i>
<i>Σχήμα 3.2: Κοκκομετρικές καμπύλες των ανακυκλωμένων αδρανών</i>	<i>39</i>
<i>Σχήμα 3.3:Ποσοστό αποδέσμευσης κόκκων αδρανούς ανά κοκκομετρικό κλάσμα για τους διαφορετικούς χρόνους μικροκυματικής θέρμανσης (0, 5, 10, 20, 40 min) της ανακυκλωμένης άμμου (AN).</i>	<i>51</i>
<i>Σχήμα 3.4: Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτινών-Χ δείγματος ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....</i>	<i>54</i>
<i>Σχήμα 3.5: Φάσμα FTIR για δείγμα ανακυκλωμένου σκυροδέματος, μη επεξεργασμένου (AN0) και επεξεργασμένου για 5 min (AN5) και 40 min (AN40)..</i>	<i>55</i>
<i>Σχήμα 4.1: Πυκνότηταδοκιμίων.....</i>	<i>63</i>
<i>Σχήμα 4.2:Γράφημα Αντοχής σε Κάμψη Τριών Σημείων.....</i>	<i>66</i>
<i>Σχήμα 4.3: Γράφημα Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη</i>	<i>67</i>

Το κυριότερο πρόβλημα στη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών από απόβλητα υλικών εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΕΚ) για παραγωγή σκυροδέματος είναι η μειωμένη αντοχή σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα στο οποίο χρησιμοποιούνται φυσικά ή θραυστά πρωτογενή αδρανή. Για την επίλυση του προβλήματος της μειωμένης αντοχής των ανακυκλωμένων αδρανών είναι απαραίτητη η ποιοτική αναβάθμισή τους. Σε αυτό το πρόβλημα έρχεται να βοηθήσει η θερμική επεξεργασία των αδρανών, η οποία σε συνδυασμό με τη θραύση ή τη λειοτρίβηση συμβάλλει στην αποδέσμευση του κονιάματος το οποίο βρίσκεται προσκολλημένο στην επιφάνεια των αδρανών και κατά συνέπεια βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Τα προηγούμενα χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες μελέτες σχετικά με τον βαθμό επίδρασης της θέρμανσης στην αποδέσμευση των πετρωμάτων (Δερμιτζάκη, 2019, Καμελίδης, 2020). Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες έχουν ασχοληθεί με τη συμβατική θέρμανση σε κλίβανο σε υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες έχουν δείξει ότι υπάρχει μια σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών. Η διαδικασία αυτή όμως είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και κοστοβόρα τόσο σε οικονομικό όσο και σε ενεργειακό επίπεδο. Για τους παραπάνω λόγους η παρούσα εργασία μελετά μια τεχνική υποβοηθούμενη από μικροκύματα, η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορά στις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του συγκολλητικού κονιάματος και των φυσικών αδρανών. Τα φυσικά αδρανή δημιουργούν υψηλές θερμικές τάσεις εντός του κονιάματος, ειδικά στη διεπιφάνεια με τα ενσωματωμένα φυσικά αδρανή, για να προκαλέσουν αποκόλληση (Akbarnezhad, 2010).

Στην εργασία διερευνάται η δυνατότητα παραγωγής αναβαθμισμένης ποιοτικά άμμου από σκυρόδεμα προερχόμενο από τα απόβλητα κατεδαφίσεων της με την εφαρμογή μιας νέας τεχνικής εκλεκτικής θραύσης υποβοηθούμενης από θέρμανση με μικροκύματα. Η αναβαθμισμένη αυτή ανακυκλωμένη άμμος θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τσιμεντοκονιάματα υποκαθιστώντας την θραυστή λατομική άμμο που συνήθως χρησιμοποιείται.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι ως ακολούθως: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα ΑΕΕΚ, τη διαχείρισή τους σε Ευρωπαϊκό αλλά και Διεθνές

επίπεδο, τις επιπτώσεις της απόθεσής τους στο περιβάλλον και τους τρόπους ανακύκλωσής τους. Γίνεται επίσης αναφορά στα ανακυκλωμένα αδρανή από σκυρόδεμα κατεδαφίσεων, τις ιδιότητες και τα προβλήματα χρήσης του στην κατασκευαστική βιομηχανία. Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει τις βασικές αρχές της μικροκυματικής θέρμανσης και τα πλεονεκτήματά της έναντι της συμβατικής θέρμανσης. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ο χαρακτηρισμός και η κοκκομετρική και ορυκτολογική ανάλυση των αρχικών χονδρομερών ανακυκλωμένων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας και περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής και χαρακτηρισμός των αναβαθμισμένων αδρανών (κοκκομετρίας άμμου) που ακολουθήθηκε. Η παραγωγή και εργαστηριακός έλεγχος των δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων με υποκατάσταση της λατομικής άμμου από την αναβαθμισμένη ανακυκλωμένη άμμο παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο. Παρουσιάζεται επίσης η επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο, δίνονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

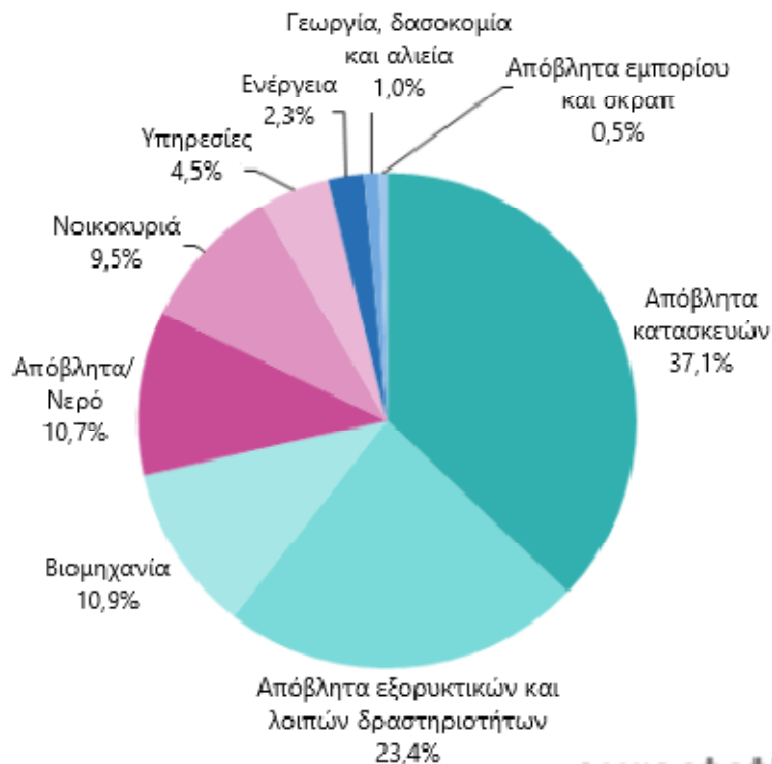
Κεφάλαιο 1

1.1 Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων

Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) προκύπτουν από δραστηριότητες όπως η κατασκευή των κτιρίων και των δημοσίων υποδομών, ολική ή μερική κατεδάφιση κτιρίων και υποδομών, ανακαινίσεις κτηρίων ή διαμερισμάτων και η κατασκευή και συντήρηση των οδών. Τα ΑΕΚΚ που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση αντιπροσωπεύουν το 25% – 30% περίπου του συνόλου των παραγόμενων αποβλήτων της. Αποτελούνται από υλικά, όπως σκυρόδεμα, σίδηρο, τούβλα, γύψο, ξύλο, γυαλί, μέταλλα, πλαστικά, αμίαντο και χώμα, υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν. Τα ΑΕΚΚ έχουν αναγνωριστεί ως ένα από τα μεγαλύτερα ρεύματα αποβλήτων που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και για αυτό έχουν αποδώσει σε αυτά προτεραιότητα στη διαχείρισή τους.

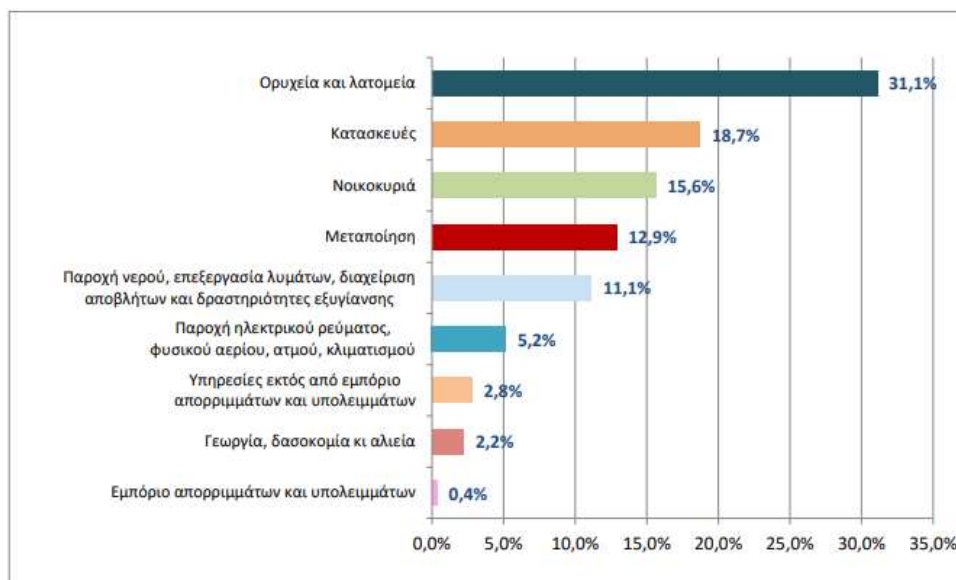
1.2 Διαχείριση ΑΕΚΚ

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχει ένα υψηλό δυναμικό για την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των ΑΕΚΚ, δεδομένου ότι ορισμένα από τα υλικά αυτά έχουν μεγάλη αξία. Ειδικότερα, υπάρχει μια νέα αγορά για χρήση αδρανών υλικών που προέρχονται από ΑΕΚΚ για διάφορα κατασκευαστικά έργα. Επιπλέον, η τεχνολογία για τον διαχωρισμό και την ανάκτηση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων είναι καλά εδραιωμένη, εύκολα προσβάσιμη και γενικά χαμηλού κόστους. Ωστόσο, το επίπεδο της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό σε ολόκληρη την Ε.Ε. από λιγότερο από 10% έως και πάνω από 90%. Στην ΕΕ, τα ΑΕΚΚ αντιπροσωπεύουν περίπου το 30% των συνολικών παραγόμενων αποβλήτων ενώ περίπου 2.154 εκατομμύρια τόνοι ΑΕΚΚ δημιουργήθηκαν το 2020 (Eurostat, 2020).



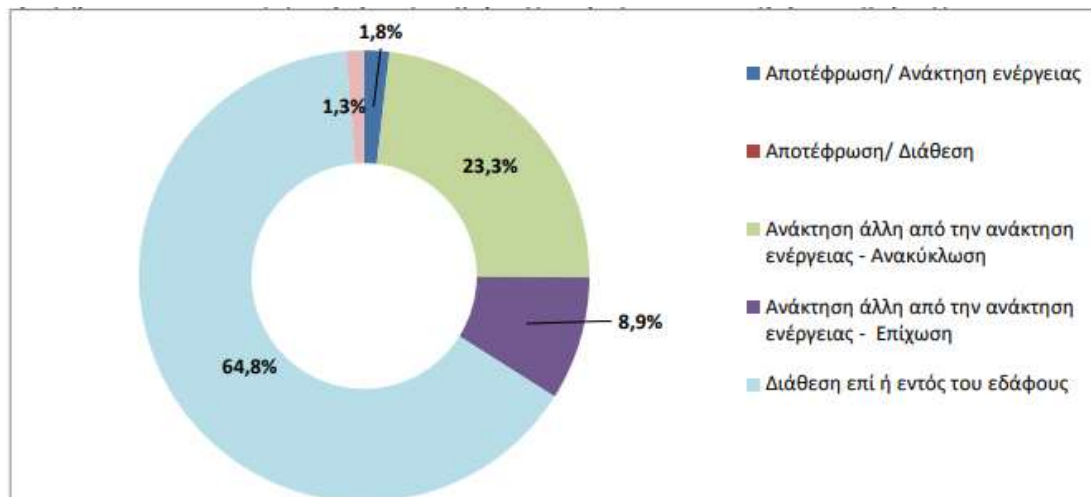
Σχήμα 1.1: Ποσοστιαία παραγωγή αποβλήτων στην Ευρώπη το 2020 ανά κατηγορία (Eurostat, 2020)

Στην Ελλάδα η παραγωγή αποβλήτων από κατασκευές κατά το έτος 2020 διαμορφώθηκε στους 5.417.214 τόνους και αντιστοιχεί σε ποσοστό 18,7% των συνολικών αποβλήτων.



Εικόνα 1.1: Ποσοστιαία διάρθρωση παραγωγής αποβλήτων, στους τομείς της στατιστικής ταξινόμησης των οικονομικών δραστηριοτήτων και στα νοικοκυριά, (ELSTAT 2020)

Αναφορικά με τη διαχείριση αποβλήτων ανά κατηγορία διαχείρισης για το 2020, η «Διάθεση επί ή εντός του εδάφους» αποτελεί το 64,8% του συνόλου, ενώ η «Ανάκτηση άλλη από την ανάκτηση ενέργειας - Ανακύκλωση» αποτελεί το 23,3%(ELSTAT, 2020).



Σχήμα 1.2: Τεχνικές διαχείρισης αποβλήτων ανά κατηγορία διαχείρισης, 2020 (ELSTAT 2020)

Λόγω περιορισμένης χωρητικότητας υγειονομικής ταφής και περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διάθεση των αποβλήτων, απαιτείται βιώσιμη διαχείριση αυτών των ροών αποβλήτων. Εκτιμάται ότι έως και 90% των ΑΕΚΚ που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν, ελαχιστοποιώντας έτσι τα απορρίμματα των αποβλήτων και την εξάντληση των ορυκτών πόρων (Galetakis et al., 2014, Tam et al., 2018).

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση στην κατασκευαστική δραστηριότητα. Αυτή η τάση οφείλεται κυρίως στη σταδιακή επιστροφή του κατασκευαστικού τομέα ως αποτέλεσμα της εξόδου από την οικονομική κρίση και της επανεκκίνησης της εθνικής οικονομίας. Συνεπώς, αναμένεται επίσης μια αυξανόμενη τάση παραγωγής ΑΕΚΚ.



Σχήμα 1.3: Ποσοστιαία κατανομή παραγόμενων ποσοτήτων ΑΕΚΚ ανά περιφέρεια (Καμελίδης, 2020)

Σήμερα στην Ελλάδα υπάρχουν πάνω από 22 Εγκεκριμένα Συλλογικά Συστήματα Εναλλακτικής Διαχείρισης που καλύπτουν τις συσκευασίες, τις φορητές στήλες (μπαταρίες), τους συσσωρευτές, τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, τα μεταχειρισμένα ελαστικά, τα απόβλητα λιπαντικών ελαίων και τα απόβλητα των εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων.

1.3 Επιπτώσεις ΑΕΚΚ στο Περιβάλλον

Δεδομένου ότι μέχρι σήμερα δεν υπήρχε ένα οργανωμένο δίκτυο συλλογής και αξιοποίησής τους, η διαχείριση των υλικών αυτών γίνεται αποσπασματικά, δημιουργώντας μεγάλα προβλήματα στο περιβάλλον εξαιτίας της ανεξέλεγκτης διάθεσής τους. Οι τεράστιες ποσότητες των αποβλήτων αυτών προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον όσο δε διαχειρίζονται με τον σωστό τρόπο (Liyin et al., 2006). Μερικά από αυτά είναι η αλλοίωση της φυσικής ομορφιάς, η διατάραξη της ισορροπίας των οικοσυστημάτων της περιοχής, η ρύπανση του εδάφους και των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητάς τους, η μεταφορά ινών αμιάντου και βαρέων μετάλλων στην ατμόσφαιρα με πιθανότητα εισπνοής από τον άνθρωπο και το πρόβλημα της σκόνης που μεταφέρεται με τον άνεμο, υποβαθμίζοντας αισθητικά περιοχές μεγάλης έκτασης. (Παναγιωτακόπουλος, 2008)

1.4 Ανακύκλωση των ΑΕΚΚ

Κατά τη διάθεση του σκυροδέματος σε χώρους ταφής καταλαμβάνονται σημαντικές εκτάσεις γης. Συνεπώς, για να μεγιστοποιηθούν οι ρυθμοί επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των δραστηριοτήτων παραγωγής ΑΕΚΚ, πρέπει να εντοπιστούν και να χρησιμοποιηθούν συστήματα που να επιτρέπουν την αποδοχή επαναχρησιμοποιούμενων ή ανακυκλώσιμων υλικών σε έργα της κατασκευαστικής βιομηχανίας (Jongsung et al., 2017).

Οι μονάδες ανακύκλωσης σκυροδέματος χωρίζονται σε κινητές μονάδες που χρησιμοποιούνται εντός του εργοταξίου και σε μόνιμες εγκαταστάσεις/κεντρικές μονάδες. Η πρώτη λύση (κινητή μονάδα) αποτελεί χαμηλότερη επένδυση και έχει μικρότερο κόστος μεταφοράς. Ωστόσο, μειονεκτεί ως προς διάφορες παραμέτρους, όπως τη δυναμικότητα, την ικανότητα απομάκρυνσης προσμίξεων, κ.λπ. (Ιωάννου, 2012).

Κατά την ανακύκλωση το σκυρόδεμα από ΑΕΚΚ διαχωρίζεται σε χονδρόκοκκα ή λεπτόκοκκα αδρανή. Σε κάθε περίπτωση, το σκυρόδεμα συλλέγεται και καθαρίζεται από υπολείμματα άλλων υλικών, όπως μονωτικά υλικά, ξύλα και χαλύβδινο οπλισμό. Για την απομάκρυνση των άλλων υλικών και την κονιοποίηση

του τσιμέντου χρησιμοποιούνται διατάξεις, όπως ταινίες μεταφοράς, θραυστήρες (π.χ. κρουστικό σφυρί ή ψαλίδι), μαγνήτες, αεροδιαχωριστές, οπτικοί διαχωριστές, διαλογή με το χέρι (π.χ. για μεγάλα κομμάτια ξύλου ή οπλισμού), κόσκινα, κ.λπ. Οι μηχανικές εγκαταστάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν λεπίδες αέρα (air-knives) για την απομάκρυνση των ελαφρύτερων υλικών, όπως ξύλο ή πλαστικό ή υλικά αρμολογήματος. Επίσης, τα στοιχεία του χάλυβα που συλλέγονται με μαγνήτες, κ.λπ. μπορούν με τη σειρά τους να ανακυκλωθούν. Η καθαρότητα του τελικού προϊόντος μπορεί να υπερβαίνει το 99% (Ιωάννου 2012, Γρύλλης, 2017).

Μετά από την επεξεργασία, τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως οδικά έργα, σε επιχωματώσεις ως υλικό πλήρωσης, στα λατομεία, στην κατασκευή αυλών και χώρους στάθμευσης, σε επιχωματώσεις εκσκαφών σωληνώσεων, κατασκευή περιβάλλοντος χώρου, θεμέλια κτιρίων, την εκ νέου κατασκευή σκυροδέματος, κ.λπ. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια κατασκευή, κάτι που μειώνει το κόστος (π.χ. τα φορτηγά δεν επιστρέφουν άδεια) ή σε διαφορετική.

1.5 Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα που συναντάμε στον κατασκευαστικό κλάδο αποτελείται σε ποσοστό 60 έως 70 % από αδρανή υλικά, συνεπώς η χρήση αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα στη βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος μπορούν να συμβάλλουν τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος, όσο και στη διατήρηση των φυσικών πόρων (Caijun et al, 2016).

Αν και η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών γίνεται στις αναπτυγμένες χώρες εδώ και αρκετά χρόνια, η προώθηση αυτού του ανακυκλωμένου υλικού σαν εναλλακτικό αδρανές δεν είναι εύκολη. Έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, λόγω της υψηλής απορροφητικότητας και του γωνιώδους σχήματός του, σε οδοστρώματα και υποστρώματα (Arm, 2001, Hansen, 1992, Poorn, 2003), σε υπόγειες κατασκευές και σε άοπλα σκυροδέματα (Yoda, 1988), αλλά η πλήρης εφαρμογή τους σε σκυροδέματα υψηλότερης αντοχής δεν είναι συνηθισμένη (Tu, 2006) καθώς υπάρχουν ακόμα πολλά άλυτα προβλήματα.

1.6 Προβλήματα στη Χρήση των Ανακυκλωμένων Αδρανών

Ορισμένα από τα προβλήματα που εμποδίζουν τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος είναι (Nogchi 2001, Tomosawa 2000, Ravindrarajah 1988, Silva et al., 2014):

- Η χαμηλή ποιότητα των παραγόμενων αδρανών λόγω της έλλειψης γνώσεων ή και ενδιαφέροντος από τους ιδιοκτήτες των κέντρων ανακύκλωσης, καθώς και η έλλειψη προτύπων και προδιαγραφών στα οποία να μπορούν να βασιστούν οι παραγωγοί σκυροδέματος. Αυτό οδηγεί σε χαμηλές μηχανικές αντοχές στα σκυροδέματα που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα αδρανή, σε υψηλή συστολή ξήρανσης, μικρό μέτρο ελαστικότητας και υψηλό πορώδες.
- Η έλλειψη προτίμησής τους από τους κατασκευαστές
- Η αβεβαιότητα σχετικά με τα περιβαλλοντικά οφέλη τους
- Η απόσταση μεταξύ των χώρων κατασκευών και κατεδαφίσεων και της τοποθεσίας του κέντρου ανακύκλωσης
- Η έλλειψη διαρκούς διαθεσιμότητας αποθεμάτων ανακυκλωμένων αδρανών καλής ποιότητας ώστε να ικανοποιείται η υπάρχουσα ζήτηση

1.7 Παραγωγή Ανακυκλωμένου Σκυροδέματος

Η έρευνα διεθνώς για τα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή, που αφορά όμως τις μηχανικές τους ιδιότητες - κυρίως την αντοχή τους- και λιγότερο την ανθεκτικότητά τους - την υδατοπερατότητα, υδατοαπορροφητικότητα, την ενανθράκωση, τη συστολή ξήρανσης, καθώς και την αντοχή σε ψύξη απόψυξη είναι αρκετά εκτενής (Καμελίδης, 2020, Κακλόπουλος, 2015, Κυριακόπουλος & Παυλόπουλος 2016).

Για την παραγωγή καλής ποιότητας σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών είναι απαραίτητο να τηρηθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις που καθορίζονται από διάφορα πρότυπα. Οι ιδιότητες των αδρανών, καθώς επίσης και οι αναλογίες του μίγματος και η μέθοδος παραγωγής του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά σημαντικές για την ποιότητά του. Στα ανακυκλωμένα υπάρχουν διεπιφάνειες αδρανών-τσιμέντου διαφορετικές από εκείνες των συμβατικών σκυροδεμάτων. Διεπιφάνεια υπάρχει τόσο

μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της προσκολλημένης παλιάς τσιμεντοκονίας όσο και μεταξύ της προσκολλημένης και της νέας τσιμεντοκονίας (Ryu 2002α, Ryu 2002β). Η τσιμεντόπαστα που παραμένει στη διεπιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών δημιουργεί αδύνατα σημεία στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, αφού αποτελείται από πολύ μικρούς πόρους και ρωγμές και επηρεάζει την τελική αντοχή τους. Η τσιμεντόπαστα αυτή επιπλέον έχει υποστεί και ενανθράκωση, η οποία αυξάνει το πορώδες της (Tam, 2005).

Εν κατακλείδι, η ποιότητα των αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή των φυσικών αδρανών, λόγω της παρουσίας προσκολλημένης συνδετικής κονίας.

1.8 Ιδιότητες Σκυροδέματος από Ανακυκλωμένα Αδρανή

Η βασική ιδιότητα που χαρακτηρίζει το σκυρόδεμα των κατασκευών είναι η αντοχή του σε θλίψη, η οποία εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την αντοχή των αδρανών, την αντοχή της τσιμεντόπαστας και από τη διεπιφάνεια μεταξύ τους (Thomas et al., 2018). Κατά την παραγωγή σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή ωστόσο, δημιουργείται εκτός της διεπιφάνειας των ανακυκλωμένων αδρανών και της νέας τσιμεντόπαστας άλλη μια διεπιφάνεια, αυτή μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της προϋπάρχουσας προσκολλημένης τσιμεντόπαστας. Η αντοχή των ανωτέρω διεπιφανειών καθορίζει και την αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης, τα ανακυκλωμένα αδρανή λόγω του υψηλού πορώδους τους και των ρηγματώσεων που αποκτούν κατά τη διαδικασία της πρώτης θραύσης τους μπορεί να αποτελούν ασθενή σημεία εντός του σκυροδέματος και συνεπώς η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα (Σάββα, 2015). Η αντοχή σε θλίψη μειώνεται από 1.5 – 5% με την αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα κατά 25%. Αντικατάσταση των φυσικών αδρανών κατά 100% από ανακυκλωμένα προκαλεί μείωση κατά 11 – 19% στην αντοχή σε θλίψη (Thomas et al., 2018).

Η αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος καθορίζεται από το σχήμα, την υφή και το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών. Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών συνεπάγεται μειωμένη αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος. Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν πιο τραχιά υφή σε

σχέση με τα φυσικά που οφείλεται στην παρουσία της προϋπάρχουσας κονιάς στην επιφάνειά τους, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της αντοχής σε κάμψη του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή (Thomas et al., 2018). Η αντοχή σε κάμψη μειώνεται επίσης με την αύξηση του λόγου νερό/τσιμέντο. Η αντικατάσταση κατά 25% των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κάμψη κατά 2-5%. Στην περίπτωση που το σύνολο των φυσικών αδρανών αντικατασταθεί από ανακυκλωμένα τότε η μείωση της αντοχής σε κάμψη είναι της τάξης του 7-17% (Thomas et al., 2018).

Με την αντικατάσταση φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα αυξάνεται η υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος λόγω της ύπαρξης παλαιάς τσιμεντοκονιάς στην επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών. Έχει παρατηρηθεί αύξηση 5-10% της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή σε σχέση με τα συμβατικά μίγματα σκυροδέματος. Σε περίπτωση αντικατάστασης του συνόλου των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα η υδατοαπορροφητικότητα αυξάνεται έως και 40%. Για αναλογία νερού/τσιμέντο ίση με 0.4 η υδατοαπορροφητικότητα αυξάνεται από 13-19% με την αντικατάσταση του συνόλου των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα (Thomas et al., 2018).

Τέλος, οι ρωγματώσεις που έχουν σχηματιστεί στα ανακυκλωμένα αδρανή από τη διαδικασία της θραύσης τους καθώς και η διεπιφάνεια μεταξύ αδρανούς και παλαιού κονιάματος συντελούν στη μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με αυτό στο συμβατικό σκυρόδεμα. Με την αντικατάσταση του 25% των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή παρατηρήθηκε μία μέση μείωση 5% του μέτρου ελαστικότητας.

Κεφάλαιο 2

2.1 Μικροκύματα

Μικροκύματα ονομάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες που καλύπτουν μία ευρεία περιοχή του φάσματος, από τα 300MHz έως και τα 300GHz και μήκος κύματος από 1m μέχρι 1mm, αντίστοιχα (Koleini et. al, 2012). Τα μικροκύματα έχουν πολύ περισσότερες εφαρμογές σε σχέση με τις άλλες ζώνες ραδιοκυμάτων λόγω του μεγάλου εύρους του φάσματός τους. Χρησιμοποιούνται για εκπομπή επίγειου τηλεοπτικού σήματος (UHF), στην εκπομπή δορυφορικού τηλεοπτικού σήματος αλλά και στις δορυφορικές επικοινωνίες γενικότερα. Εφαρμόζονται επίσης στην κινητή τηλεφωνία, στην εφαρμογή Wi-Fi, στο πρότυπο ανταλλαγής αρχείων Bluetooth, στα ραντάρ αλλά και στους φούρνους μικροκυμάτων, καθώς οι μικροκυματικές συχνότητες αλληλεπιδρούν με την ύλη. Τα τελευταία χρόνια, έχει εμφανιστεί αύξηση ενδιαφέροντος για θέρμανση ορυκτών με μικροκύματα καθώς εξετάζεται ένας αριθμός από πιθανές εφαρμογές, με μια εξ' αυτών να είναι η συμβολή των μικροκυμάτων για την ευκολότερη αποδέσμευση των πετρωμάτων.

2.2 Μικροκυματική Θέρμανση

Τα μικροκύματα προκαλούν μοριακή κίνηση με μετανάστευση ιοντικών μορίων ή/και περιστροφή διπολικών μορίων. Η θέρμανση μικροκυμάτων ενός υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον παράγοντα «διάχυσής» τους, ο οποίος είναι ο λόγος της διηλεκτρικής απώλειας ή του παράγοντα «απώλειας» προς τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Η διηλεκτρική σταθερά είναι ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού να επιβραδύνει την ενέργεια των μικροκυμάτων καθώς διέρχεται σε αυτό. Ο συντελεστής απώλειας είναι ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού να διαχέει την ενέργεια. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής «απώλειας», αντιπροσωπεύει την ποσότητα της εισροής ενέργειας μικροκυμάτων που χάνεται στο υλικό και διαχέεται ως θερμότητα. Επομένως, ένα υλικό με υψηλό συντελεστή «απώλειας» θερμαίνεται εύκολα με ενέργεια μικροκυμάτων. Στην πραγματικότητα, η ιοντική αγωγιμότητα και

η περιστροφή των διπολικών μορίων είναι οι δύο σημαντικοί μηχανισμοί απώλειας ενέργειας μικροκυμάτων (Kingston and Jassie, 1985).

Τα υλικά βάση της αγωγιμότητάς τους στα μικροκύματα ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: Αγωγοί, Μονωτές και Διηλεκτρικά. Οι Αγωγοί (μέταλλα) χρησιμοποιούνται συχνά ως μέσο μετάδοσης (κυματοδηγός) για μικροκύματα αφού τα μικροκύματα αντανακλώνται από την επιφάνεια και ως εκ τούτου δεν θερμαίνονται, τα υλικά που είναι διαφανή στα μικροκύματα ταξινομούνται ως μονωτές και χρησιμοποιούνται συχνά σε φούρνους μικροκυμάτων για να υποστηρίξουν το υλικό που θα θερμανθεί, και ως διηλεκτρικά ταξινομούνται τα υλικά που είναι εξαιρετικοί απορροφητές ενέργειας μικροκυμάτων και θερμαίνονται εύκολα (Kingston and Jassie, 1988). Το μη ομοιογενές υλικό (όσον αφορά τη διηλεκτρική ιδιότητα) μπορεί να μην θερμαίνεται ομοιόμορφα, δηλαδή κάποια μέρη των υλικών να θερμαίνονται γρηγορότερα από άλλα. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται συχνά ως θερμική φυγή (Metaxas and Meredith, 1983). Η αποτελεσματικότητα της θέρμανσης μικροκυμάτων ενός υλικού ημιαγωγών εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία. Στην πραγματικότητα, πάνω από μια ορισμένη κρίσιμη θερμοκρασία (T_c) ακόμη και οι μονωτές αποκτούν απόκριση στη θέρμανση μικροκυμάτων. Η έκταση της θέρμανσης μικροκυμάτων εξαρτάται επίσης από το μέγεθος του υλικού. Επιπλέον, οι μονωτές μπορούν να θερμανθούν ευκολότερα με κάποιο υλικό, όπως για παράδειγμα με μαγνητίτη, καρβίδιο πυριτίου ή άνθρακα. Η ενέργεια των μικροκυμάτων θερμαίνει πρώτα το υλικό που λειτουργεί βοηθητικά, και αυτό στη συνέχεια θερμαίνει το μονωτικό (George et al., 1994, Haque, 1999).

2.3 Πλεονεκτήματα Μικροκυματικής Θέρμανσης έναντι της Απλής Θέρμανσης

Η θέρμανση με φούρνο μικροκυμάτων είναι διαφορετική από ότι στους συμβατικούς φούρνους και προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως (Haque, 1999):

- γρήγορη θέρμανση
- θέρμανση χωρίς επαφή
- η θέρμανση ξεκινά από το εσωτερικό του υλικού σώματος
- μεταφορά ενέργειας και όχι μεταφορά θερμότητας
- επιλεκτική θέρμανση υλικού

- γρήγορη εκκίνηση και διακοπή
- υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας και αυτοματισμού
- μπορεί να μεταφερθεί από την πηγή μέσω ενός κοίλου μη μαγνητικού μεταλλικού σωλήνα

Κεφάλαιο 3

3.1 Χαρακτηρισμός αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα

Τα αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία προήλθαν από την εταιρεία ANYK A.B.E.E., η οποία δραστηριοποιείται στον τομέα της διαχείρισης και της επεξεργασίας αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) και βρίσκεται στο Παρθένι του Ηρακλείου Κρήτης (Εικόνες 3.1 και 3.2). Πρόκειται για εγκεκριμένη μονάδα συλλογής και διαχείρισης αποβλήτων που προέρχονται από κατασκευαστικές δραστηριότητες με σκοπό την ανακύκλωσή τους. Η μονάδα διαθέτει χώρους αποθήκευσης των ΑΕΚΚ από τους οποίους και λήφθηκε η απαραίτητη ποσότητα υλικού για την εκπόνηση της εργασίας.



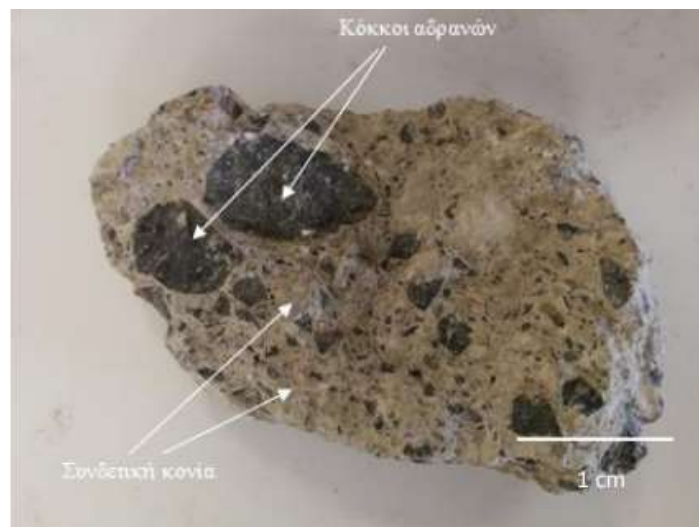
Εικόνα 3.1: Μονάδα ανακύκλωσης ΑΕΚΚ της εταιρείας ANYK ΑΒΕΕ στο Παρθένι Ηρακλείου



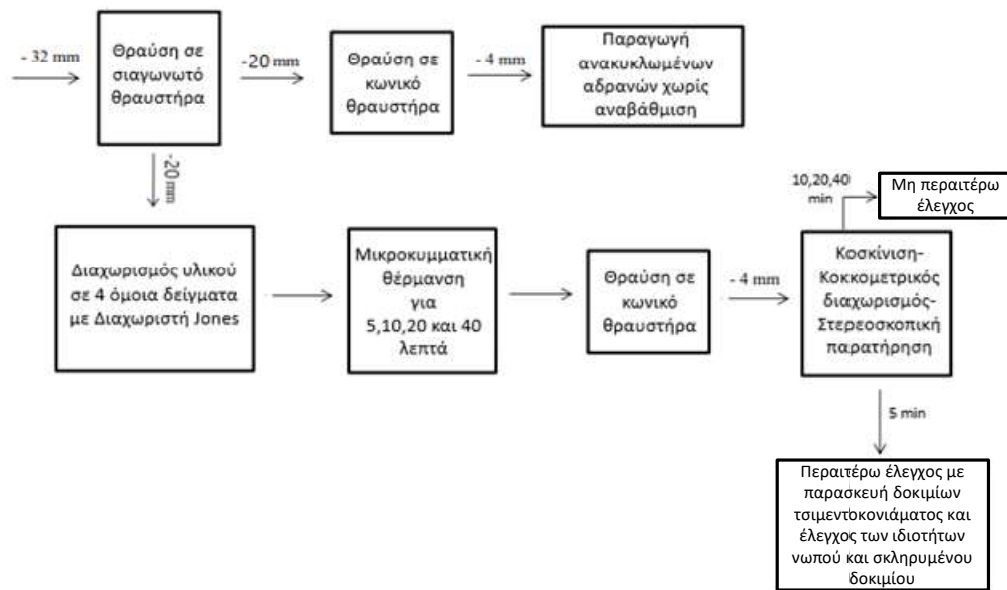
Εικόνα 3.2: Διαχωρισμός και επεξεργασία ΑΕΕΚ για παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών

3.2 Κοκκομετρική Ανάλυση

Το αρχικό υλικό που ελήφθη από την ANYK A.B.E.E. αποτελούνταν από τεμάχια ανακυκλωμένου σκυροδέματος με μέγεθος μεγαλύτερο των 32 mm (Εικόνα 3.3). Η εργαστηριακή διαδικασία παραγωγής των ανακυκλωμένων αδρανών περιγράφεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 3.4 και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στις Εικόνες 3.5 και 3.6.



Εικόνα 3.3: Τυπική εικόνα τεμαχίου ανακυκλωμένου σκυροδέματος που υποβλήθηκε σε θραύση



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών (άμμος) από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα



Εικόνα 3.5: Σιαγωνωτός και Κωνικός Θραυστήρας



Εικόνα 3.6: Διαχωριστής Jones

Το υλικό υποβλήθηκε αρχικά σε θραύση με χρήση σιαγωνωτού θραυστήρα σε μέγεθος κόκκων μικρότερο των 20mm και στην συνέχεια ακολούθησε ο διαχωρισμός του σε πέντε όμοια δείγματα με τη χρήση του διαχωριστή Jones.

Τα δείγματα που προέκυψαν τοποθετήθηκαν στον φούρνο μικροκυμάτων του εργαστηρίου (μέγιστης ισχύος 800W) και θερμάνθηκαν για χρόνο 5,10,20 και 40 λεπτά, ενώ το εναπομείναν υλικό δεν υποβλήθηκε σε καμία θερμική διεργασία ώστε να χρησιμοποιηθεί ως δείγμα σύγκρισης. Για τη διευκόλυνση των μετρήσεων τα δείγματα κωδικοποιήθηκαν ανάλογα με τον χρόνο θέρμανσής τους όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

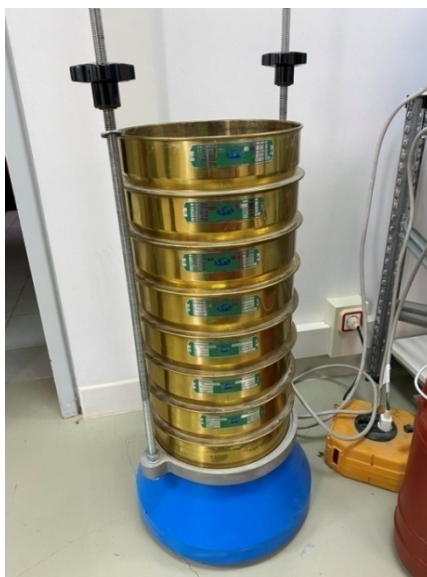
Πίνακας 3.1: Κωδικοποίηση Δειγμάτων

Χρόνος Θέρμανσης (min)	Κωδικοποίηση Δειγμάτων
0	AN0
5	AN5
10	AN10
20	AN20
40	AN40



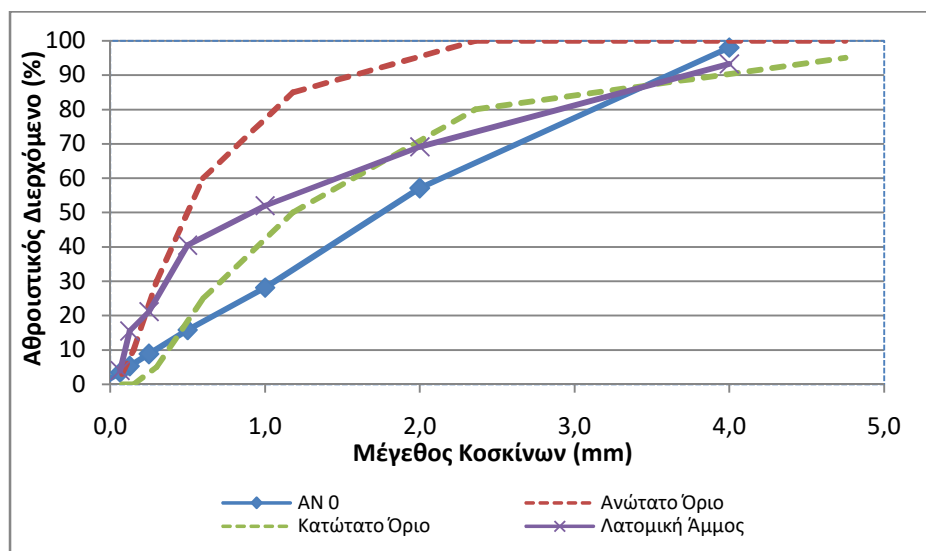
Εικόνα 3.7: Φούρνος μικροκυμάτων του εργαστηρίου

Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 με χρήση της μηχανής κοσκίνισης της εταιρείας ELEInternational και σειράς κοσκίνων της ίδιας εταιρείας (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Μηχανή κοσκίνισης και κόσκινα της εταιρείας ELEInternational

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη του ανακυκλωμένου σκυροδέματος που προέκυψε μετά τη θραύση του αρχικού υλικού σε σιαγωνωτό και έπειτα σε κωνικό σπαστήρα. Παρατηρείται ότι περισσότερο από 50% του υλικού έχει διάμετρο κόκκων μικρότερη από 2mm, ενώ μόλις το 5% είναι μικρότερη από 0,125mm. Οι χαρακτηριστικές διαμέτροι των κόκκων είναι $d_{90}=3,5$ mm, $d_{50}=1,8$ mm και $d_{10}=0,3$ mm. Τα όρια ταξινόμησης άμμου ορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο κατά ASTM C 33-02. Σύμφωνα με το πρότυπο γίνεται αντιληπτό ότι η καμπύλη της λατομικής άμμου στα μικρότερα κλάσματα βρίσκεται εντός των ορίων, ενώ μετά από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00 mm βγαίνει εκτός των οριζόμενων ορίων. Επίσης η καμπύλη της AN0 παρατηρείται ότι για κλάσματα μικρότερα του 0,5 mm και μεγαλύτερα των 3,00 mm βρίσκεται εντός ορίων, ενώ για τα κλάσματα 0,5 mm– 3,00 mm είναι εκτός.



Σχήμα 3.1: Κοκκομετρική καμπύλη ανακυκλωμένης και Λατομικής Άμμου με όρια ταξινόμησης άμμου κατά ASTM C 33-02.

3.3 Ορυκτολογική ανάλυση

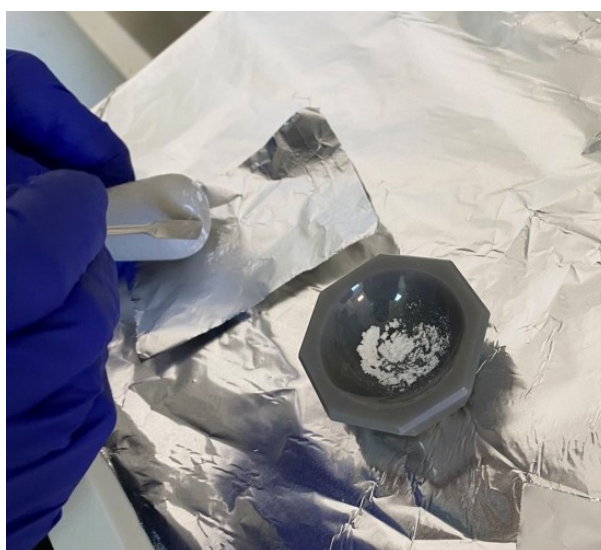
Η ανάλυση των δειγμάτων με περιθλασιομετρία ακτίνων-X (X-RayDiffraction, ή XRD) είναι μια κλασική μέθοδος ανάλυσης, που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής ενός ορυκτού ή/ και για τον προσδιορισμό των κύριων ορυκτών φάσεων ενός πετρώματος (ποιοτική και ποσοτική ανάλυση). Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης δεν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ορυκτών φάσεων που συμμετέχουν με πολύ μικρό ποσοστό. Η μέθοδος στηρίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων X γνωστού μήκους κύματος λ , πάνω στα πλεγματικά επίπεδα των εξεταζόμενων δειγμάτων και στη συνέχεια στον προσδιορισμό των εσωτερικών διαστημάτων d των επιπέδων του κρυσταλλικού πλέγματος, που είναι μοναδικά για κάθε ένα προσδιοριζόμενο ορυκτό. Συνήθως, η ακτινογραφική μελέτη δειγμάτων πραγματοποιείται εισάγοντας το δείγμα σε κονιοποιημένη μορφή σε ειδικούς υποδοχείς.

Για την ορυκτολογική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο ακτίνων-X τύπου Bruker D8 Advance (λυχνία Cu, φάσμα σάρωσης από 4° έως 70° 2θ , βήμα 0.02° , χρόνος μέτρησης 32s/βήμα) και λογισμικό DIFFRACplus EVA v. 2006. (Εικόνα 3.9).

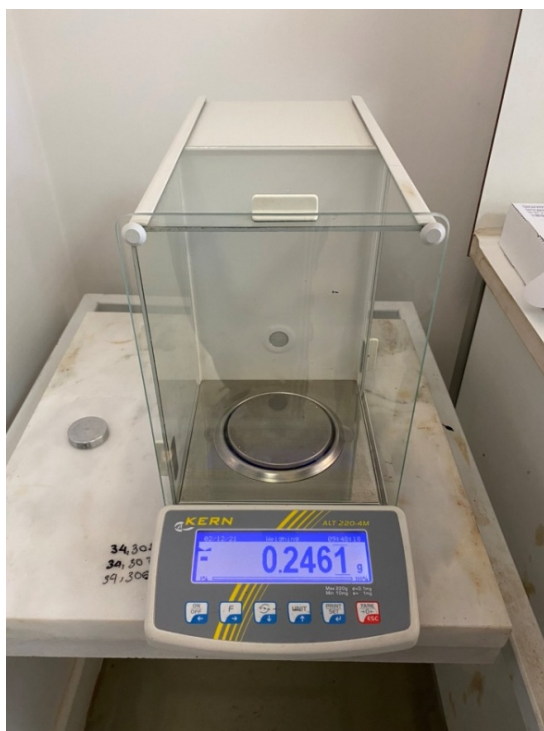


Εικόνα 3.9: Περιθλασίμετρο ακτίνων-X Bruker D8 Advance

Επιπλέον για την πιστοποίηση των φάσεων χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική της υπέρυθρης φασματοσκοπίας (FTIR). Τα δείγματα για την ανάλυση με FTIR λειοτριβούνται σε γουδί από αχάτη (Εικόνα 3.10) και αναμιγνύονται με βρωμιούχο κάλιο σε αναλογία 1:100 κ.β., χρησιμοποιώντας ζυγαριά ακριβείας της εταιρείας KERN (Εικόνα 3.11), ώστε να σχηματιστεί μια ομοιόμορφη λεπτομερής μάζα, η οποία στη συνέχεια συμπιέζεται στην πρέσα Specac Press KBR 25.011. (Εικόνα 3.12) σε λεπτούς δίσκους (pellets)(Εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.10: Λειοτρίβηση δείγματος σε γουδί από αχάτη



Εικόνα 3.11: Ζυγαριά Ακριβείας KERNALT220-4M



Εικόνα 3.12: Υδραυλική πρέσα Specac Press KBR25.011 για την παρασκευή των pellets για τη φασματοσκοπία FTIR.



3.13: Μορφοποιημένος δίσκος (pellet) για ανάλυση με FTIR

Η ανάλυση FTIR πραγματοποιήθηκε σε δείγματα ανακυκλωμένης άμμου με θέρμανση στον φούρνο μικροκυμάτων για 5 λεπτά (AN5) και 40 λεπτά (AN40) αλλά και σε μη επεξεργασμένο θερμικά δείγμα (AN0). Χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο υπέρυθρου Fourier Transform της Nicolet IS50 FTIR και κυψελίδα μεταβαλλόμενης οπτικής διαδρομής τύπου Specac Model 7009 με παράθυρα ZnSe.



Εικόνα 3.14: Φασματοφωτόμετρο υπέρυθρου της Nicolet IS50 FTIR

3.4 Υδατοαπορρόφηση Αδρανών από Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα.

Για τον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης των αδρανών μετράται το βάρος τους σε ξηρή κατάσταση (μετά από παραμονή σε φούρνο με θερμοκρασία 70 °C για 24 ώρες) και μετά από 24 ώρες εμβάπτιση σε απιονισμένο νερό. Η υδατοαπορρόφηση των αδρανών υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{(B_v - B_x)}{B_x} * 100$$

όπου B_v το βάρος των αδρανών μετά από 24 ώρες σε απιονισμένο νερό και B_x το βάρος των αδρανών σε ξηρή κατάσταση.

Από τις δοκιμές η μέση υδατοαπορρόφηση των ανακυκλωμένων αδρανών υπολογίστηκε σε 5.6%. Η υδατοαπορρόφηση των φυσικών πρωτογενών αδρανών που προορίζονται για σκυρόδεμα είναι περίπου 1-2% (Λίτινας, 2008). Η υψηλότερη τιμή υδατοαπορρόφησης των ανακυκλωμένων αδρανών σε σχέση με τα πρωτογενή αδρανή αποδίδεται στην προσκολλημένη τσιμεντόπαστα στους κόκκους των ανακυκλωμένων αδρανών και στις μικρορωγμές που πιθανόν να έχουν σχηματιστεί στα ανακυκλωμένα αδρανή κατά τη διαδικασία της θραύσης.

3.5 Παραγωγή Αναβαθμισμένων Αδρανών

3.5.1 Θραύση Υλικού και Μικροκυματική Θέρμανση

Για την παραγωγή των αναβαθμισμένων αδρανών, αρχικά έγινε αποδέσμευση των κόκκων του αδρανούς από τη συνδετική κονία με την μέθοδο της θραύσης του υλικού. Η θραύση του αρχικού υλικού πραγματοποιήθηκε σε σιαγωνωτό σπαστήρα, ώστε να μειωθεί σημαντικά το μέγεθος των κόκκων. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη, αφού τα αδρανή υλικά και η συνδετική κονία εμφανίζουν μεταξύ τους σημαντικές διαφορές όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες και οι διεπιφάνειές τους αποτελούν επιφάνειες αστοχίας-διαχωρισμού.

Στη συνέχεια το υλικό χωρίστηκε με τη χρήση διαχωριστή Jones σε 5 όμοια δείγματα, εκ των οποίων ένα χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα αναφοράς, ενώ τα υπόλοιπα

τοποθετήθηκαν σε φούρνο μικροκυμάτων για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (5, 10, 20, και 40min). Σκοπός είναι ο προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου μικροκυματικής θέρμανσης για την επίτευξη του κατά το δυνατόν μεγαλύτερου βαθμού αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών από τη συνδετική κονία.

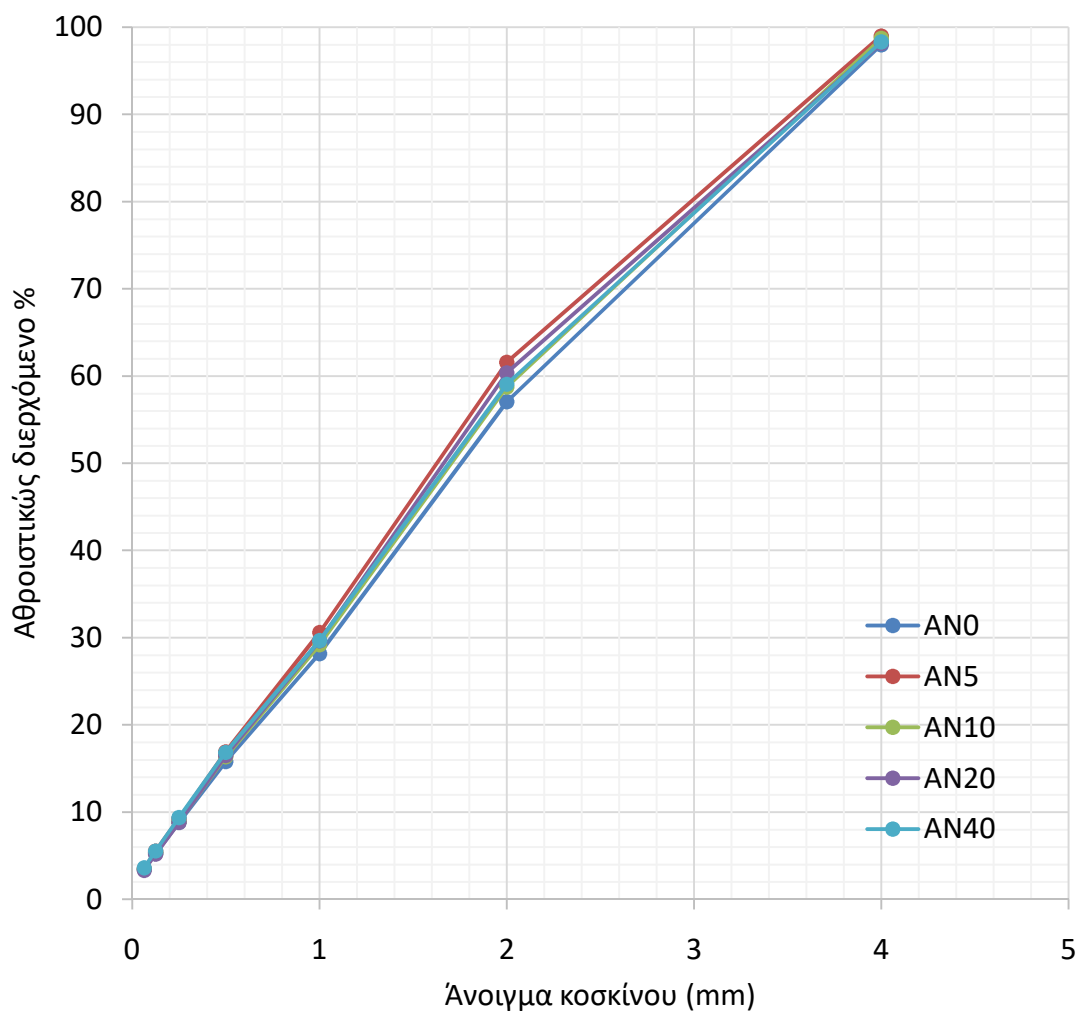
Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον κωνικό σπαστήρα, έτσι ώστε το υλικό που θα προκύψει να έχει μέγεθος κόκκων μικρότερο των 4.00mm και ακολούθησε κοκκομετρική ανάλυση.

3.5.2 Διαχωρισμός Υλικού

Για την κοκκομετρική ανάλυση των ανακυκλωμένων αδρανών κάθε δείγμα διαχωρίστηκε με χρήση της μηχανής κοσκίνισης της εταιρείας ELE International και σειράς κοσκίνων της ίδιας εταιρείας σε οκτώ κοκκομετρικά κλάσματα (+4 mm, +2mm, +1mm, +0.5 mm, +0.250 mm, +0.125 mm, +0.063 mm και -0.063mm).

Πίνακας 3.2:Κοκκομετρική ανάλυση των ανακυκλωμένων αδρανών

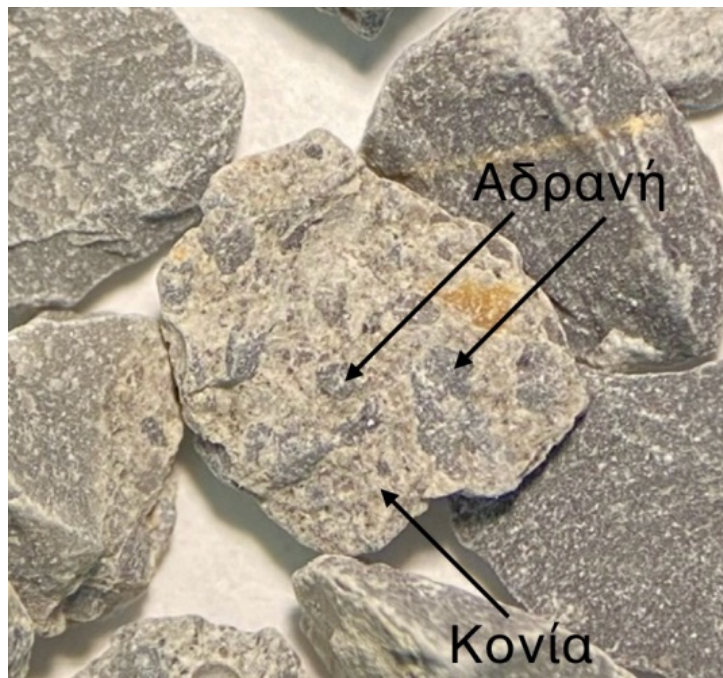
Κόσκινα (mm)	Αθροιστικώς Διερχόμενο (%)				
	AN0	AN5	AN10	AN20	AN40
4,0	97,99	99,03	98,71	98,16	98,31
2,0	57,06	61,57	58,76	60,35	59,09
1,0	28,16	30,59	29,19	29,65	29,67
0,500	15,81	16,95	16,34	16,49	16,87
0,250	8,82	9,27	8,90	8,81	9,37
0,125	5,27	5,50	5,34	5,18	5,57
0,063	3,43	3,55	3,47	3,31	3,60



Σχήμα 3.2: Κοκκομετρικές καμπύλες των ανακυκλωμένων αδρανών

3.5.3 Παρατήρηση μέσω στερεοσκοπίου

Με οπτική παρατήρηση στο μικροσκόπιο της εταιρείας OPTIKA, οι κόκκοι των διάφορων κοκκομετρικών κλασμάτων ταξινομήθηκαν σε κόκκους καθαρών αδρανών, σε κόκκους συνδετικής κονίας και σε μικτούς κόκκους, που αποτελούνται εν μέρει από αδρανές υλικό και εν μέρει από συνδετική κονία.



Εικόνα 3.15: Μικτός κόκκος αδρανών όπου η συνδετική κονία είναι προσκολλημένη στην επιφάνεια του κόκκου του αδρανούς

Με βάση την καταμέτρηση αυτή εκτιμήθηκε ο βαθμός αποδέσμευσης των κόκκων για τους διαφορετικούς χρόνους μικροκυματικής θέρμανσης. Ως βαθμός αποδέσμευσης f_a , της φάσης α ενός κοκκώδους υλικού ορίζεται η σχέση της μάζας της φάσης α που ευρίσκεται υπό μορφή ελεύθερων κόκκων προς τη συνολική μάζα της ίδιας φάσης που περιέχεται στο υλικό υπό μορφή ελεύθερων αλλά και σύμμεικτων τεμαχιδίων. Πρόκειται για καθαρό αριθμό που μπορεί επίσης να εκφρασθεί και σαν ποσοστό επί τοις εκατό (Σταμπολιάδης, 2008).

Στην εργασία αυτή ως ένδειξη της επιτυγχανόμενης αποδέσμευσης για να κοκκομετρικό κλάσμα χρησιμοποιήθηκε ο λόγος του αριθμού των κόκκων που αποτελούνται αποκλειστικά από αδρανές υλικό προς το σύνολο των κόκκων που καταμετρήθηκαν κατά την μελέτη τους με το οπτικό μικροσκόπιο. Ο υπολογισμός του βαθμού αποδέσμευσης f_a δεν μπορεί στην συγκεκριμένη μελέτη να εκτιμηθεί επειδή η μέτρηση της μάζας του αδρανούς υλικού στους μικτούς κόκκους είναι πρακτικά αδύνατη.



Εικόνα 3.16: Εργαστηριακό Στερεοσκόπιο της Εταιρείας ΟΡΤΙΚΑ

Στις εικόνες 3.17- 3.19 παρουσιάζονται τα διαφορετικά κλάσματα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μεγέθους κόκκων +4 mm, +2 mm +1 mm.

- *Δείγμα AN0 – Δείγμα Χωρίς Αναβάθμιση*



Εικόνα 3.17: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN0.

Οι υποδιαίρεσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.18:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN0.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.19: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN0.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.

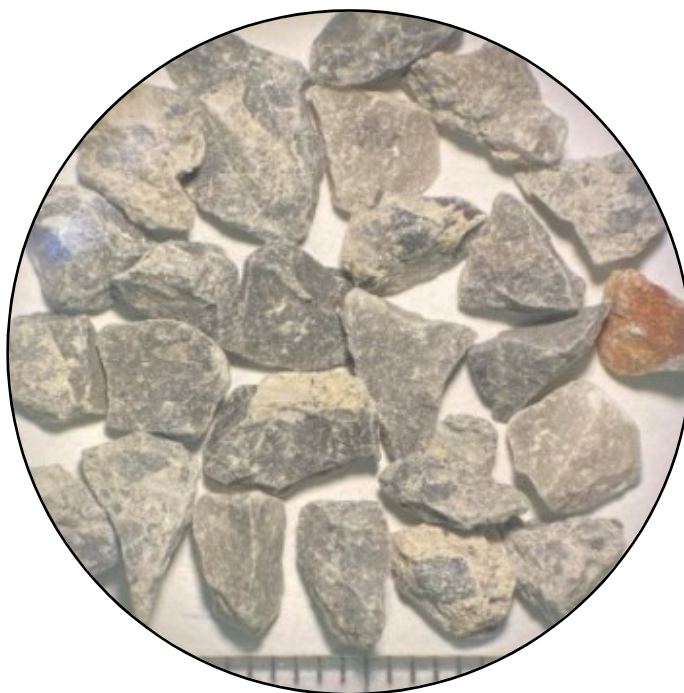
Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής παρατήρησης και υπολογίζεται ο συντελεστής αποδέσμευσης με την μορφή ποσοστού επί τοις εκατό, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Πίνακας 3.3: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN0

	AN 0		
Κοκκομετρικόκλάσμα (mm)	+ 4,0	+2,0	+1,0
Συνολικός αριθμός κόκκων	77	127	252
Μεικτοί κόκκοι	55	85	174
Κόκκοι αδρανούς	22	42	78
Ποσοστό αποδέσμευσης(%)	28,6	33,1	31,0

Στη συνέχεια η ίδια ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τα δείγματα τα οποία έχουν υποστεί μικροκυματική θέρμανση AN5, AN10, AN20 και AN40. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχετικές μικροφωτογραφίες (Εικόνες 3.20-3.31) και οι αντίστοιχοι πίνακες καταμέτρησης των κόκκων για τα κοκκομετρικά κλάσματα +4 mm, +2 mm +1 mm.

- *Δείγμα AN5-Μικροκυματική Θέρμανση για 5min*



Εικόνα 3.20: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN5.

Οι υποδιαιρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.21: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +2.00mm του δείγματος AN5.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.22: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +1.00mm του δείγματος AN5.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.

Πίνακας 3.4: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN5

	AN 5		
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	+ 4,0	+2,0	+1,0
Συνολικός αριθμός κόκκων	25	168	226
Μεικτοί κόκκοι	10	79	131
Κόκκοι αδρανούς	15	89	95
Ποσοστό αποδέσμευσης(%)	60,0	53,0	42,0

- Δείγμα AN10-Μικροκυματική Θέρμανση για 10min



Εικόνα 3.23: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN10.

Οι υποδιαίρεσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.24: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα $+2.00\text{mm}$ του δείγματος AN10.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.25: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα $+1.00\text{mm}$ του δείγματος AN10.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.

Πίνακας 3.5: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN10

	AN 10		
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	+ 4,0	+2,0	+1,0
Συνολικός αριθμός κόκκων	42	140	115
Μεικτοί κόκκοι	23	87	66
Κόκκοι αδρανούς	19	53	49
Ποσοστό αποδέσμευσης(%)	45,2	37,9	42,6

- Δείγμα AN20-Μικροκυματική Θέρμανση για 20min



Εικόνα 3.26: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN20.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.27: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα $+2.00\text{mm}$ του δείγματος AN20.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



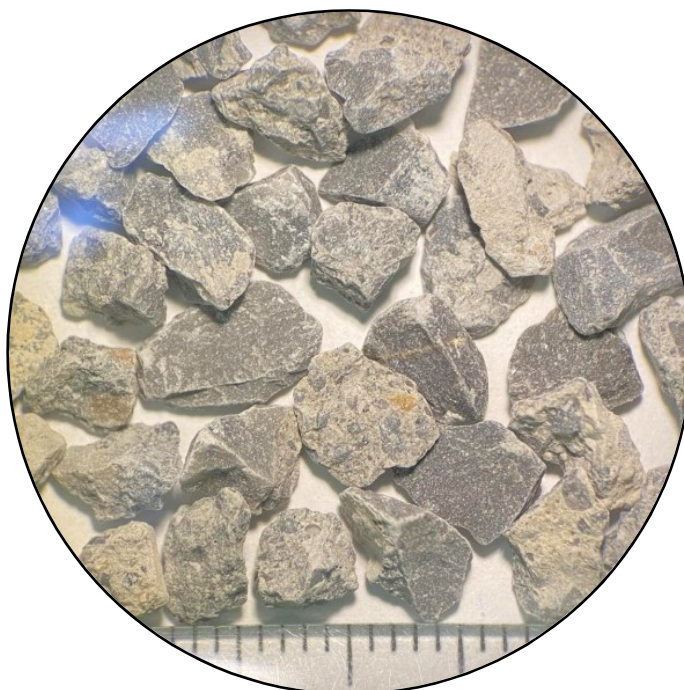
Εικόνα 3.28: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα $+1.00\text{mm}$ του δείγματος AN20.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.

Πίνακας 3.6:Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN20

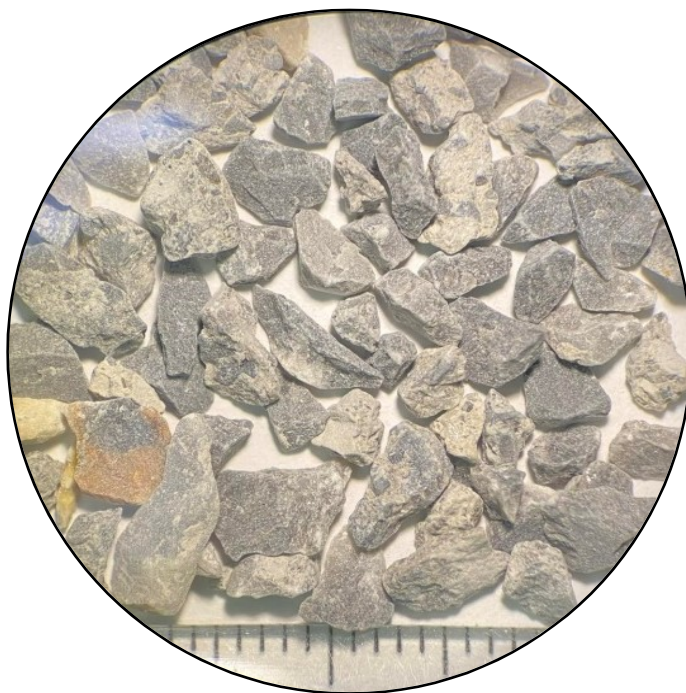
	AN 20		
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	+ 4,0	+2,0	+1,0
Συνολικός αριθμός κόκκων	47	162	169
Μεικτοί κόκκοι	27	85	97
Κόκκοι αδρανούς	20	77	72
Ποσοστό αποδέσμευσης(%)	42,6	47,5	42,6

- Δείγμα AN40-Μικροκυματική Θέρμανση για 40min



Εικόνα 3.29:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα +4.00mm του δείγματος AN40.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



Εικόνα 3.30:Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα $+2.00\text{mm}$ του δείγματος AN40.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.



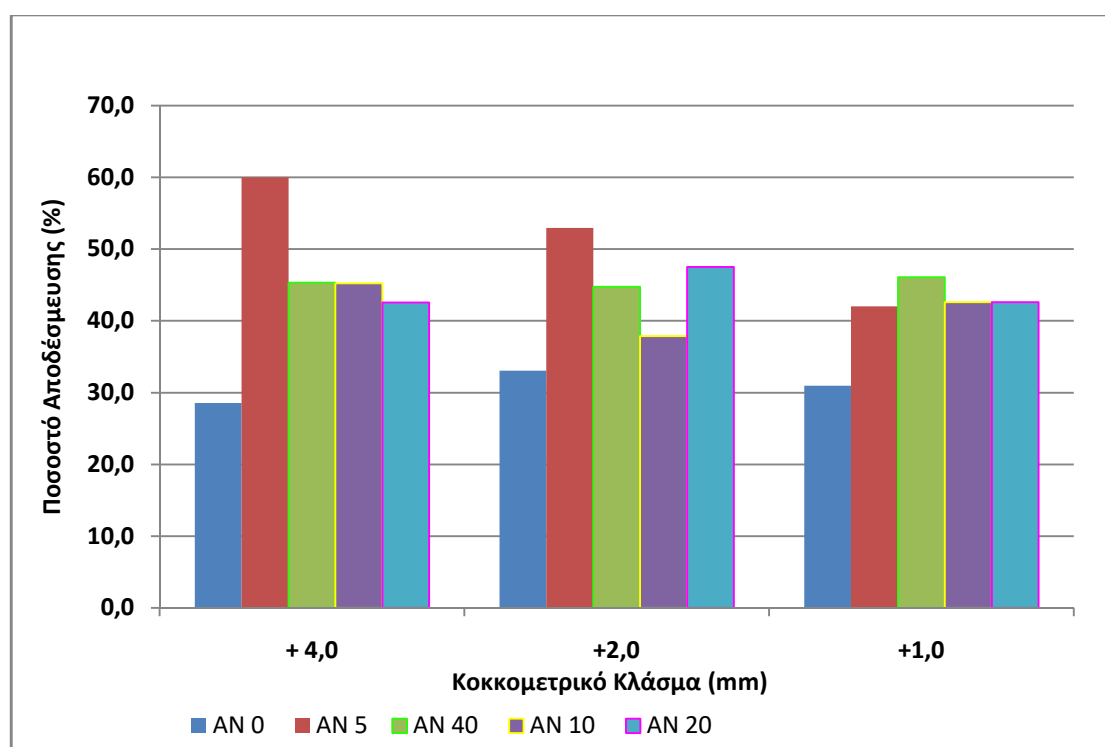
Εικόνα 3.31: Μικροφωτογραφία κόκκων από το κοκκομετρικό κλάσμα $+1.00\text{mm}$ του δείγματος AN40.

Οι υποδιαίρέσεις του κανόνα στη βάση της εικόνας είναι σε mm.

Πίνακας 3.7: Υπολογισμός Ποσοστού Αποδέσμευσης για AN40

	AN 40		
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	+ 4,0	+2,0	+1,0
Συνολικός αριθμός κόκκων	75	143	115
Μεικτοί κόκκοι	41	79	62
Κόκκοι αδρανούς	34	64	53
Ποσοστό αποδέσμευσης(%)	45,3	44,8	46,1

Τα ποσοστά αποδέσμευσης κάθε δείγματος, με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.

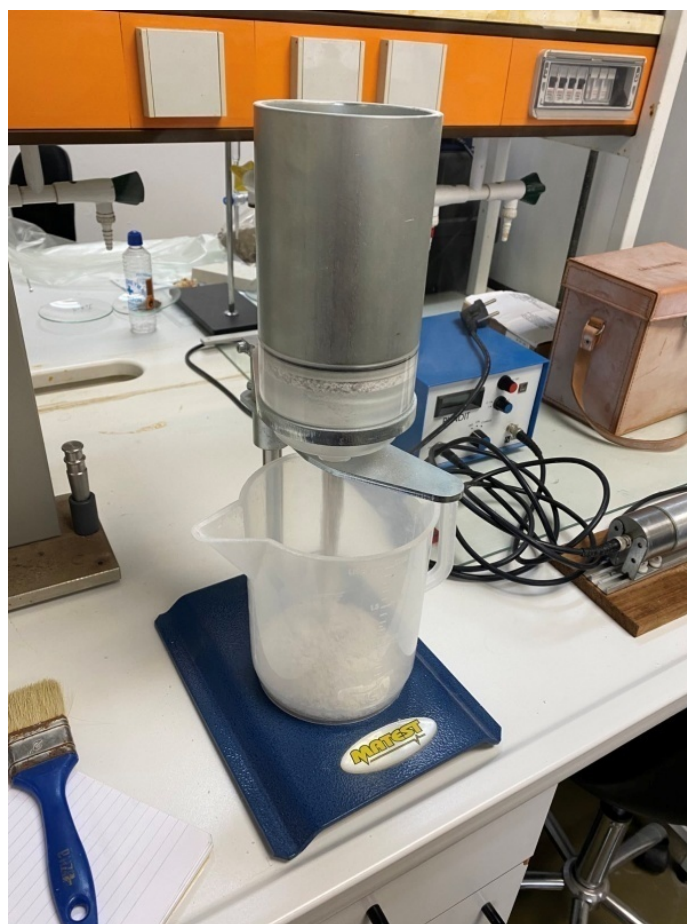


Σχήμα 3.3: Ποσοστά αποδέσμευσης κόκκων αδρανούς ανά κοκκομετρικό κλάσμα για τους διαφορετικούς χρόνους μικροκυματικής θέρμανσης (0, 5, 10, 20, 40 min) της ανακυκλωμένης άμμου (AN).

Παρατηρούμε από το Σχήμα 3.3 ότι το ποσοστό αποδέσμευσης του δείγματος AN5 παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή, ειδικά στα μεγέθη κλάσματος +4.00mm και +2.00mm. Συνεπώς για τη συνέχιση του πειράματος επιλέχθηκε το δείγμα AN5, λόγω της μεγαλύτερης αποδέσμευσης που επιτεύχθηκε.

3.5.4 Συντελεστής Ροής Αδρανών

Ο προσδιορισμός του συντελεστή ροής αδρανών γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-6 και αποτελεί μέτρο τουγωνιώδους των κόκκων. Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του χρόνου ροής συγκεκριμένου όγκου αδρανούς υλικού δια μέσου δεδομένου ανοίγματος ειδικής πρότυπης συσκευής. Το άνοιγμα της συσκευής καθορίζεται με βάση την κοκκομετρία του υλικού που μελετάται. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε άνοιγμα οπής με διάμετρο 16 mm. Στην Εικόνα 3.32 παρουσιάζεται η συσκευή προσδιορισμού του συντελεστή ροής αδρανών.



Εικόνα 3.32: Συσκευή Προσδιορισμού Συντελεστή Ροής

Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής (5 επαναλήψεις ανά μετρούμενο δείγμα).

Πίνακας 3.8: Μετρήσεις του χρόνου ροής άμμου σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-6

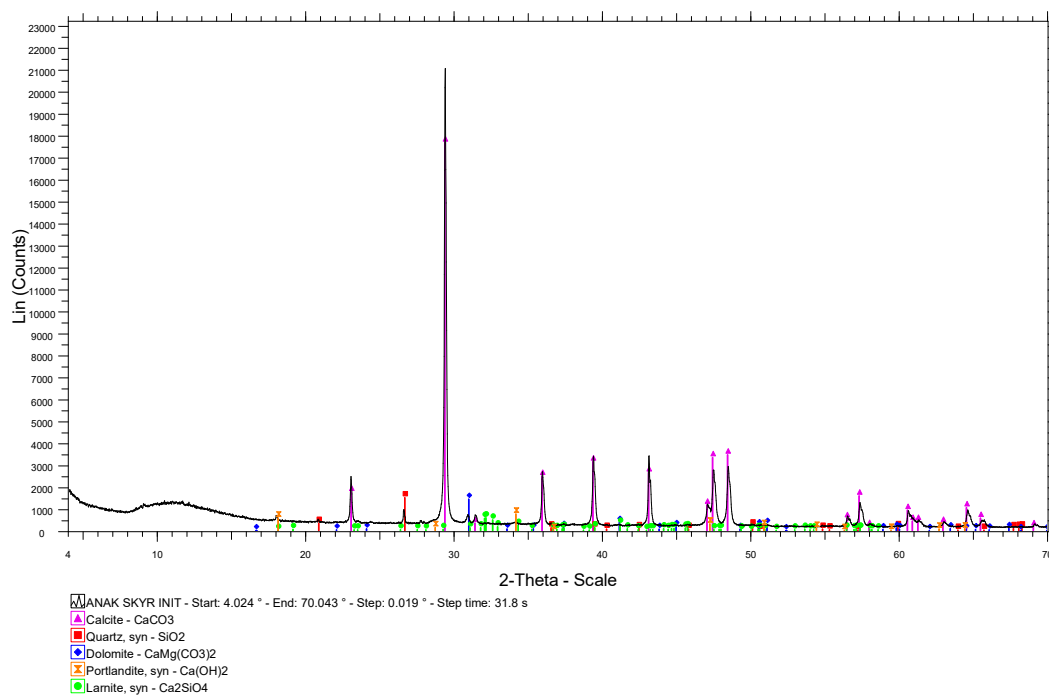
Χρόνος ροής (s)	Λατομική Άμμος	Ανακυκλωμένη Άμμος (χωρίς θέρμανση)
	20,03	20,57
	19,52	20,93
	21,19	20,94
	21,46	20,92
	20,83	20,77
Μέση τιμή	20,61	20,83
Τυπική απόκλιση	0,72	0,14

Παρατηρείται ότι οι διαφορές στην τιμή του χρόνου ροής για την λατομική άμμο και την ανακυκλωμένη άμμο είναι ελάχιστες (η ανακυκλωμένη έχει ελαφρά υψηλότερη τιμή) γεγονός που δείχνει ότι το γωνιώδες των κόκκων διαφέρει δεν σημαντικά.

3.5.5 Ορυκτολογική ανάλυση με XRD

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X του δείγματος ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.9.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης έδειξαν ότι το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα περιέχει υψηλές ποσότητες ασβεστίτη. Το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται στενά με τη σύνθεση των αδρανών, καθώς στην Ελλάδα, η πλειονότητα των παραγωγών έτοιμου σκυροδέματος χρησιμοποιούν θραυστά αδρανή που εξάγονται από ασβεστολιθικά πετρώματα (Galetakis and Soultana 2016, Galetakis et al., 2016).



Σχήμα 3.4: Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X δείγματος ανακυκλωμένου σκυροδέματος

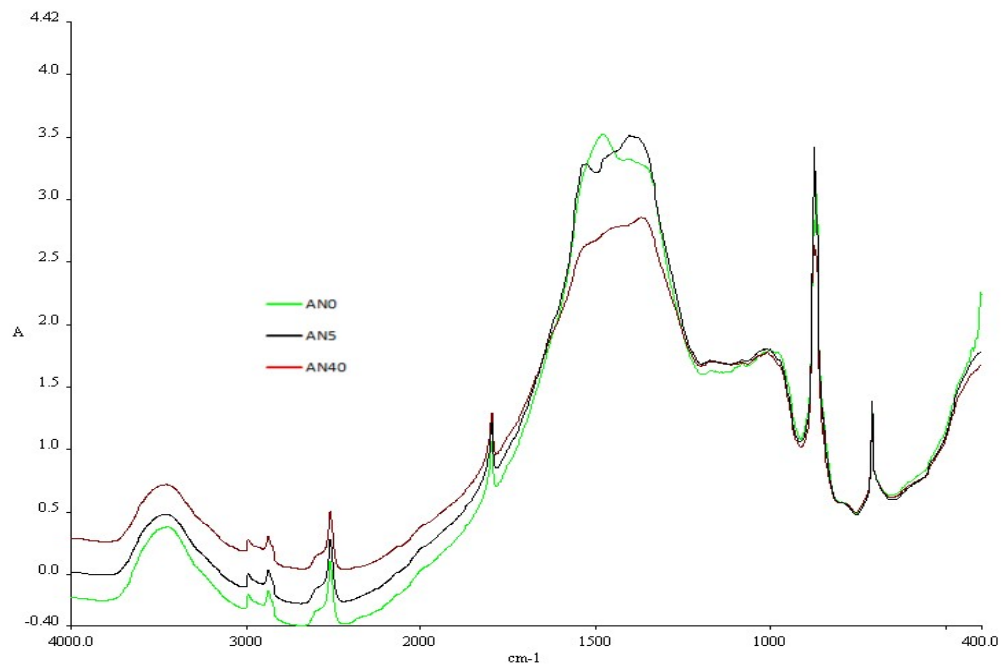
Πίνακας 3.9: Ορυκτολογική σύσταση (%) του ανακυκλωμένου σκυροδέματος

Φάση \ Δείγμα	AN0 (%)	AN5 (%)	AN40 (%)
Ασβεστίτης	93	93	93
C2S	2	3	3
Χαλαζίας	2	2	2
Δολομίτης	2	2	2
Πορτλανδίτης	1	-	-

3.5.6 Υπέρυθρη φασματοσκοπία - FTIR

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα φάσματα FTIR των δειγμάτων AN0, AN5 και AN40 στη φασματική περιοχή $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$. Τα φάσματα δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ τους. Οι ισχυρές ζώνες απορρόφησης στα 1430, 872

και 712 cm^{-1} οφείλονται στις δονήσεις του CO_3^{-2} λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε CaCO_3 . Οι ζώνες απορρόφησης στις περιοχές των $536\text{-}514\text{ cm}^{-1}$ σχετίζονται με τον δεσμό Si-O . Οι ζώνες απορρόφησης του φάσματος που παρουσιάζονται από τα 3640 έως 3350 cm^{-1} έως αντιστοιχούν σε έκταση των δεσμών O-H από την παρουσία του πορτλανδίτη Ca(OH)_2 , και στην παρουσία των ενυδατωμένων φάσεων του τσιμέντου (C-S-H).



Σχήμα 3.5: Φάσμα FTIR για δείγμα ανακυκλωμένου σκυροδέματος, μη επεξεργασμένου (AN0) και επεξεργασμένου για 5 min (AN5) και 40 min (AN40)

Κεφάλαιο 4

4.1 Παρασκευή Δοκιμών

Για τον έλεγχο της ποιότητας των αναβαθμισμένων αδρανών που παρήχθησαν, παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Για κάθε σύνθεση, χρησιμοποιήθηκαν 1350g άμμος, 450g τσιμέντο τύπου CEM I 42.5N. Οι συνθέσεις των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Συνθέσεις Δοκιμών

Κωδικός σύνθεσης	Περιεκτικότητα σε άμμο (kg/m ³)	Περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m ³)	Άμμος (% κ.β.στ.)	Τσιμέντο (% κ.β.στ.)	Λόγος Νερό/Τσιμέντο
ΛΑΤ 1	5340	1781	75,0	25,0	0,501
ΛΑΤ 2	5208	1563	75,0	25,0	
ΛΑΤ 3	5170	1552	75,0	25,0	
ΑΝ0 1	5195	1732	75,0	25,0	0,517
ΑΝ0 2	5170	1723	75,0	25,0	
ΑΝ0 3	5049	1715	75,0	25,0	
ΑΝ5 1	5038	1679	75,0	25,0	0,517
ΑΝ5 2	5151	1717	75,0	25,0	
ΑΝ5 3	5145	1715	75,0	25,0	

Τα μίγματα παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακό αναμικτήρα τσιμεντοκονιαμάτων Matest Mortar Mixer E094.

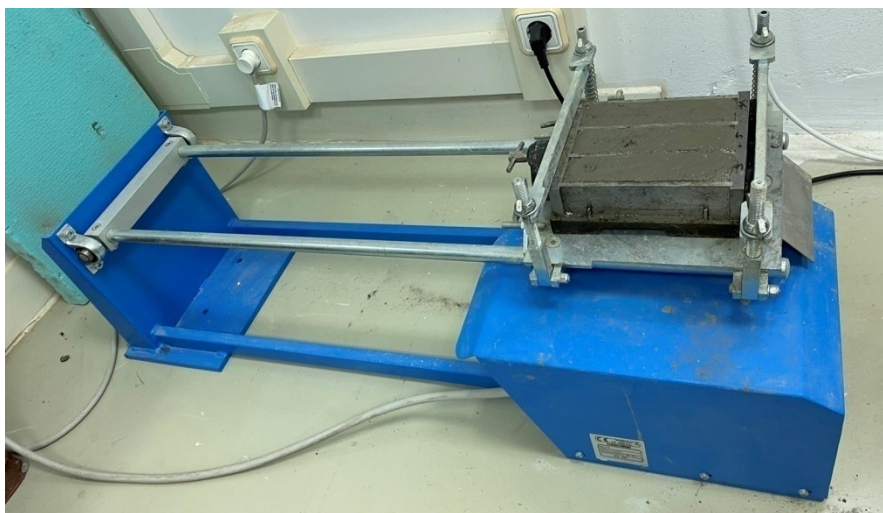


Εικόνα 4.1: Αναμεικτήρας Matest Mortar Mixer E094

Αφού αναμειχθούν τα υλικά και γίνει έλεγχος στο νωπό μίγμα, δηλαδή υπολογισμός της εργασιμότητας, το μίγμα χυτεύεται σε πρισματικά καλούπια-μήτρες (40x40x160 mm³) οι οποίες τοποθετούνται σε τράπεζα δόνησης για 1 λεπτό (60 χτυπήματα/λεπτό). Τέλος, τα δοκίμια παραμένουν στα καλούπια για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου, την επόμενη μέρα ξεκαλουπώνονται, μετράται το βάρος τους και έπειτα τοποθετούνται σε κατάλληλο θάλαμο ωρίμανσης στους $20 \pm 2^\circ \text{C}$ με σχετική υγρασία τουλάχιστον 95%.



Εικόνα 4.2: Πρισματικά Καλούπια Παρασκευής Δοκιμίων

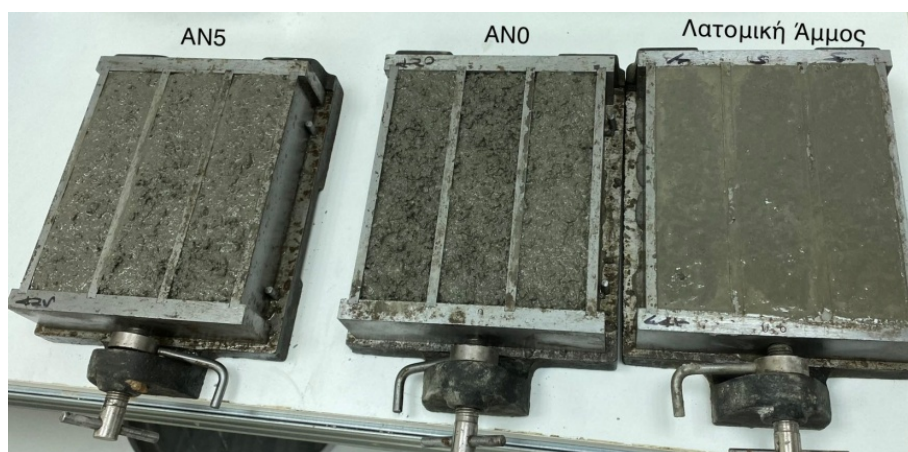


Εικόνα 4.3: Δονούμενη Τράπεζα της εταιρείας Matest



Εικόνα 4.4: Θάλαμος ωρίμανσης δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων της εταιρείας Matest

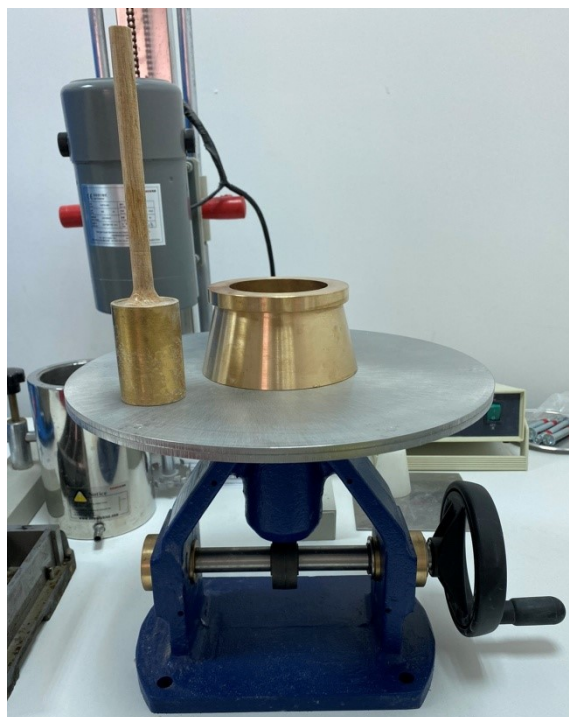
Για λόγους σύγκρισης, παρασκευάστηκαν τρεις διαφορετικές σειρές δοκιμίων με χρήση: α) συνήθους λατομικής άμμου, β) άμμου ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς θέρμανση (AN0) και γ) άμμου ανακυκλωμένων αδρανών με μικροκυματική θέρμανση 5 λεπτών (AN5). Στα ανακυκλωμένα αδρανή AN0 και AN5 το κλάσμα - 0.125 mm απομακρύνθηκε με σκοπό τον περιορισμό της συγκέντρωσης του λεπτόκοκκου υλικού, καθώς αυτό αυξάνει τις απαιτήσεις του μίγματος σε νερό. Κατά την παρασκευή των δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι τα μίγματα που παρασκευάστηκαν με τη χρήση άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είχαν μειωμένη εργασιμότητα σε σχέση με αυτά της λατομικής άμμου. Αυτό αποδόθηκε στο γωνιώδες σχήμα των κόκκων των τριών ειδών άμμου και στην κοκκομετρική τους διαβάθμιση.



Εικόνα 4.5: Δοκίμια στις Μήτρες Χύτευσης

4.2 Μέτρηση Εργασιμότητας

Μετά την ανάμειξη των υλικών στον αναμεικτήρα, πραγματοποιήθηκε ποιοτικός έλεγχος στο νωπό κονίαμα, δηλαδή μέτρηση και μελέτη της εργασιμότητας του κονιάματος. Η μέτρηση της εργασιμότητας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3. Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε τράπεζα εξάπλωσης Matest UTCM-0660E (Εικόνα 4.6), η οποία είναι εξοπλισμένη με τροχό χειρός και διαθέτει μία τράπεζα εξάπλωσης διαμέτρου 300mm και ένα κωνικό καλούπι από ορείχαλκο με διαστάσεις μεγάλης βάσης 100mm, μικρής βάσης 70 mm και ύψους 60mm.



Εικόνα 4.6: Τράπεζα Εξάπλωσης Matest UTCM-0660E

Αφού αναμιχθούν τα υλικά, μία ποσότητα του μίγματος μεταφέρεται μέσα στο καλούπι κώνου σε 2 στρώσεις όπου κάθε μία χτυπιέται 25 φορές με μία ράβδο. Εφόσον ο κώνος έχει γεμίσει από τις 2 στρώσεις του μίγματος, αφαιρείται και με τον τροχό χειρός υψώνεται και πέφτει η τράπεζα 15 φορές επανειλημμένα σε 15 δευτερόλεπτα. Τέλος, αφότου το μίγμα έχει εξαπλωθεί μετريέται η διάμετρος εξάπλωσης σε 6 θέσεις με ένα παχύμετρο Vernier και υπολογίζεται η μέση τιμή.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα δοκιμής εργασιμότητας κατά EN 1015-3

Θέση μέτρησης διαμέτρου εξάπλωσης	Διάμετρος εξάπλωσης σε mm		
	Λατομική Άμμος (LAT)	Ανακυκλωμένη Άμμος (AN0)	Ανακυκλωμένη Άμμος με θέρμανση 5' (AN5)
1	118	103	102
2	119	102	101
3	122	101	100
4	119	101	101
5	120	101	102
6	119	102	101
Μέση Τιμή	119,5	101,7	101,2

Η ποσοστιαία εργασιμότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Εργασιμότητα(\%)} = \frac{\text{Διάμετρος εξάπλωσης} - \text{Διάμετρος μεγάλης βάσης κώνου}}{\text{Διάμετρος μεγάλης βάσης κώνου}} \times 100$$

Ο υπολογισμός της εργασιμότητας όλων των συνθέσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Υπολογισμού Ποσοστού Εργασιμότητας

Εργασιμότητα (%)		
Λατομική Άμμος (LAT)	Ανακυκλωμένη Άμμος (AN0)	Ανακυκλωμένη Άμμος με θέρμανση 5' (AN5)
19	1,7	1,2

Παρατηρείται ότι τα μίγματα τα οποία έχουν παρασκευαστεί από ανακυκλωμένη άμμο παρουσιάζουν μεγάλη μείωση εργασιμότητας σε σχέση με αυτά από λατομική άμμο. Αυτό μπορεί να οφείλετε στο γεγονός ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή δεν έχουν

αποχωριστεί πλήρως από την προσκολλημένη κονία και έχουν μεγαλύτερη ανάγκη για νερό ώστε να αποκτήσουν εργασιμότητα παραπλήσια με της λατομικής άμμου. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε σχετικά αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο, για την επίτευξη της ελάχιστης απαιτούμενης εργασιμότητας.

4.3 Εργαστηριακός Έλεγχος Δοκιμών

Έπειτα από την παραμονή των δοκιμών κονιάματος στον θάλαμο ωρίμανσης, μετρήθηκε την 28η μέρα η αντοχή των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων, καθώς και η πυκνότητα των δοκιμών. Η μέτρηση αντοχής εφαρμόστηκε σε 3 δοκίμια κάθε σύστασης, τα οποία αφαιρούνται από τον θάλαμο ωρίμανσης μία μέρα πριν τη μέτρηση και παρέμεναν σε συνθήκες περιβάλλοντος στον χώρο του εργαστηρίου. Την ημέρα μέτρησης αντοχής, καταγράφεται το βάρος και οι διαστάσεις του δοκιμίου και ακολουθεί η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη και σε θλίψη.

Η διαδικασία της δοκιμής αντοχής πραγματοποιήθηκε με πρέσα διπλής κλίμακας επιβολής μέγιστου φορτίου (500kN ή 15 kN) σύμφωνα με το Πρότυπο EN 196-1. Το σύστημα ελέγχου αντοχής είναι το Matest E161-03N (Εικόνα 4.7) και διαθέτει μονάδα ελέγχου επιβολής φορτίου τύπου Servo-Plus με εισαγωγή των δεδομένων μέσω οθόνης αφής.



Εικόνα 4.7: Σύστημα Ελέγχου Αντοχής σε κάμψη/θλίψη δοκιμών τσιμεντοκονιαμάτων κατά EN 196-1. (Matest E161-03N)

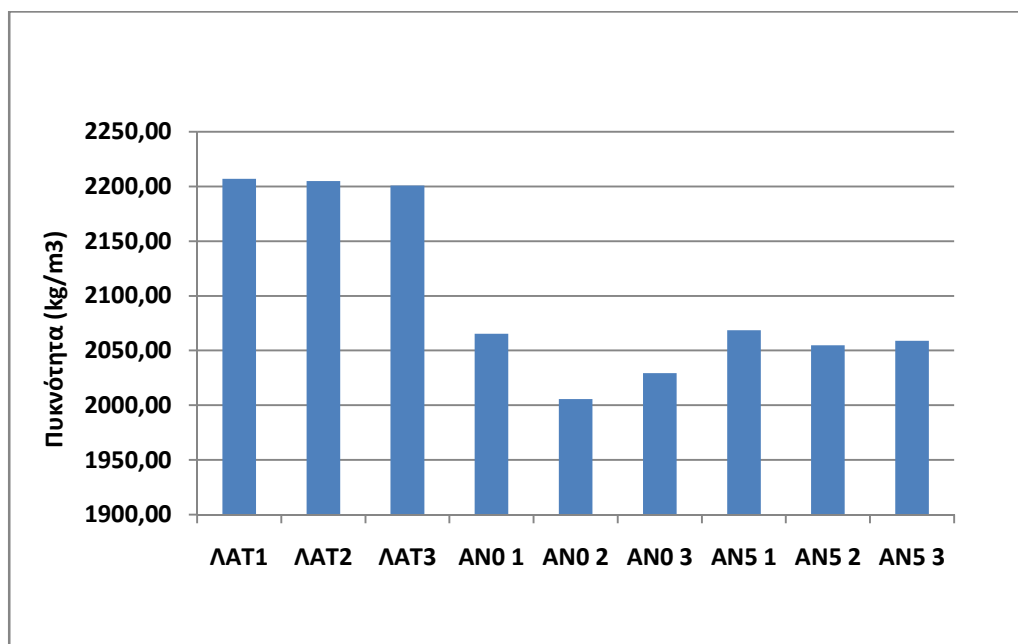
Με τη χρήση των κατάλληλων κελιών φόρτισης μπορεί να πραγματοποιηθεί δοκιμή κάμψης τριών σημείων και δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή κάμψης είναι διαστάσεων 40x40x160 mm. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη είναι τα δύο τμήματα του δοκιμίου που προέκυψαν από την αντοχή σε κάμψη (EN 196-1).

4.3.1 Πυκνότητα

Ο έλεγχος της πυκνότητας των δοκιμίων γίνεται με στόχο την επαλήθευση της ομοιομορφίας κάθε σειράς δοκιμίων και την αποφυγή λάθους αποτελεσμάτων λόγω παρασκευαστικού σφάλματος, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα. Η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε από τον τύπο $D=m/V$, όπου D είναι η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου, m είναι η μάζα του και V ο όγκος του. Η μάζα κάθε δοκιμίου μετρήθηκε σε ζυγαριά ακριβείας (σε συνθήκες εργαστηρίου μετά την ωρίμανση), ενώ ο όγκος του υπολογίστηκε από τις διαστάσεις του (μήκος, πλάτος, ύψος) που μετρήθηκαν με τη βοήθεια του παχύμετρου (EN 99). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. και στην Εικόνα 4.1.

Πίνακας 4.4:Υπολογισμός Πυκνότητας Δοκιμίων μετά από ωρίμανση

Δοκίμιο	h (mm)	d (mm)	b (mm)	Μάζα (gr)	Όγκος (m ³)	Πυκνότητα (kg/m ³)
ΛΑΤ1	160,0	40	39,50	557,94	0,00025	2207
ΛΑΤ2	160,0	40	40,50	571,51	0,00026	2205
ΛΑΤ3	160,0	40	40,80	574,68	0,00026	2201
ΑΝ0 1	160,0	40	40,60	536,68	0,00026	2065
ΑΝ0 2	160,0	40	40,80	523,71	0,00026	2006
ΑΝ0 3	160,0	40	41,00	532,48	0,00026	2029
ΑΝ5 1	159,5	40	42,00	554,33	0,00027	2069
ΑΝ5 2	159,8	40	41,00	538,49	0,00026	2055
ΑΝ5 3	160,0	40	41,00	540,24	0,00026	2059



Σχήμα 4.1: Πυκνότητα δοκιμίων

Η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 2005 έως 2068 kg/m³, ενώ η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με πρότυπη λατομική άμμο που κυμάνθηκε από 2201 έως 2207 kg/m³). Παρατηρείται λοιπόν μια μεγάλη μείωση της πυκνότητας των δοκιμίων τα οποία παρασκευάζονται από ανακυκλωμένη άμμο, η οποία οφείλεται στο ακανόνιστο σχήμα των κόκκων (μικρότερη πυκνότητα στοίβαξης), στις ρωγματώσεις, στην περιεχόμενη συνδετική κονία και στον μεγαλύτερο λόγο νερού/τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των δοκιμίων με ανακυκλωμένη άμμο.

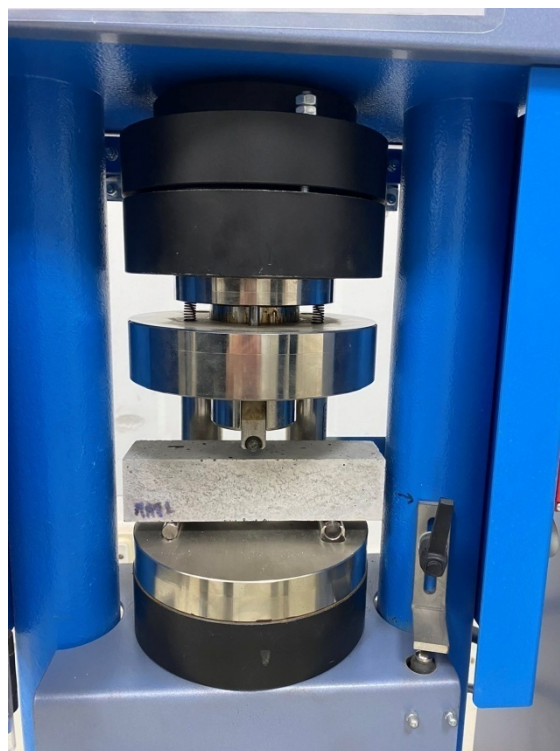
4.3.2 Αντοχή σε Κάμψη-Κάμψη Τριών Σημείων (28 Ημέρες)

Το σύστημα ελέγχου αντοχής του εργαστηρίου εφαρμόζει φορτία 10kN με ακρίβεια $\pm 1\%$ του καταγραφόμενου φορτίου, με ρυθμό φόρτισης 100N/s. Το κελί φόρτισης που χρησιμοποιείται έχει δύο χαλύβδινους κυλίνδρους διαμέτρου $10 \pm 0.5\text{mm}$ για την έδραση του πρισματικού δοκιμίου. Η μεταξύ τους απόσταση είναι $100 \pm 0.5\text{mm}$ ενώ ένας τρίτος χαλύβδινος κύλινδρος ίδιας διαμέτρου, που είναι τοποθετημένος στο μέσο της απόστασης των άλλων δύο, εφαρμόζει το φορτίο (δοκιμή κάμψης τριών σημείων). Τοποθετούμε το πρισματικό δοκίμιο στη συσκευή

και εφαρμόζουμε κατακόρυφο φορτίο αυξάνοντάς το γραμμικά με ρυθμό 100 N/s μέχρι τη θραύση. Η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_s = \frac{(1.5 \times F_f \times l)}{b^3},$$

οπου F_s η αντοχή σε κάμψη σε MPa, F_f το φορτίο που εφαρμόζεται στο μέσο του πρίσματος κατά τη θραύση σε N, b η πλευρά της τετραγωνικής διατομής του πρίσματος σε mm και l η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων σε mm. Για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη χρησιμοποιούνται τρία δοκίμια και υπολογίζεται η μέση τιμή.



Εικόνα 4.8: Κελί Κάμψης Τριών Σημείων

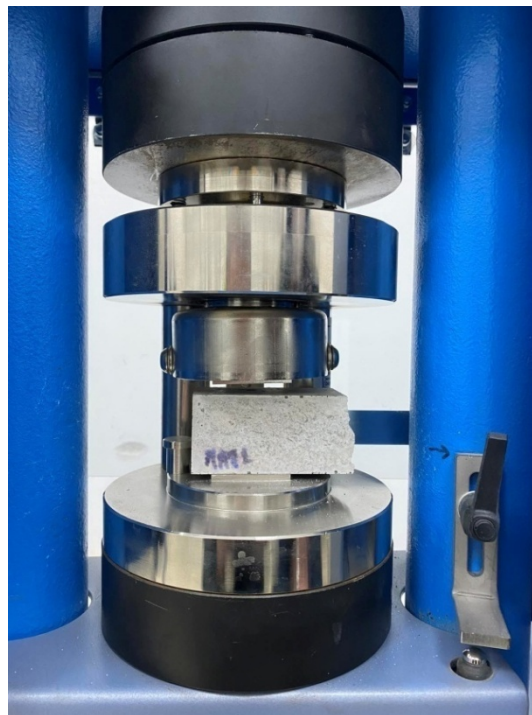
4.3.3 Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (28 Ημέρες)

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή τύπου E161-03N της Matest σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Ο ρυθμός φόρτισης ρυθμίστηκε στα 0,5 MPa/sec. Η συσκευή περιλαμβάνει παράλληλες πλάκες φόρτισης για τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο και σφαιρική κεφαλή έδρασης στο πάνω μέρος του δοκιμίου, ο άξονας

της οποίας πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Η επιβολή του φορτίου και η καταγραφή φορτίου και μετατόπισης γίνεται από ηλεκτρονικό σύστημα. Τα δεδομένα επεξεργάζονται και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη C_s προκύπτει από τη σχέση:

$$C_s = \frac{F_{\max}}{A},$$

όπου C_s η αντοχή σε θλίψη σε MPa, F_{\max} το μέγιστο φορτίο σε N που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και A η επιφάνεια της πλάκας φόρτισης ($40 \times 40 \text{ mm}^2$). Για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη χρησιμοποιούνται τρία δοκίμια και υπολογίζεται η μέση τιμή για κάθε σύνθεση.



Εικόνα 4.9: Κελί Μονοαξονικής Θλίψης

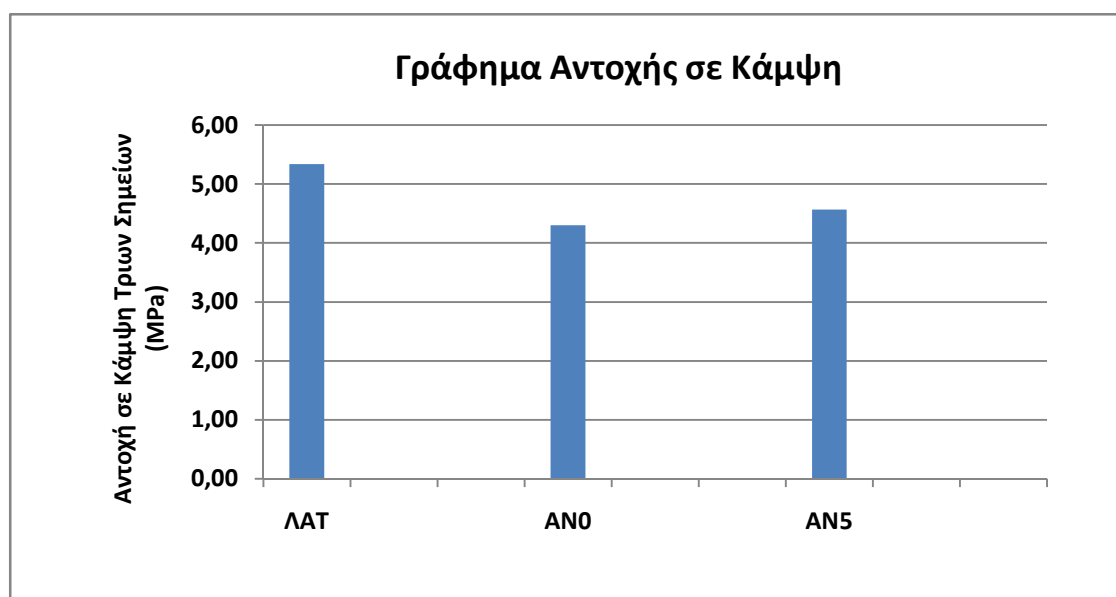
4.4 Αποτελέσματα Δοκιμών

Τα αποτελέσματα για τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη τριών σημείων απεικονίζονται στον Πίνακα 4.5 καθώς και στο Σχήμα 4.2. Η τυπική απόκλιση σ_x των μετρήσεων υπολογίστηκε από την σχέση: $\sigma_x = \left(\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}$ και στη συνέχεια το σφάλμα της μέσης τιμής.

Πίνακας 4.5:Υπολογισμός Αντοχής σε Κάμψη Τριών Σημείων

Κωδικός δοκιμίου	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Επιφάνεια (mm ²)	b*d ² (mm ³)	Μέγιστο φορτίο F (N)	L (mm)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Τυπική Απόκλιση (MPa)
ΛΑΤ1	39,5	40,0	1580	63200	2935	100	6,97	5,34	1,42
ΛΑΤ2	40,5	40,0	1620	64800	2019	100	4,67		
ΛΑΤ3	40,8	40,0	1632	65280	1906	100	4,38		
ΑΝ0 1	40,6	40,0	1624	64960	418	100	0,97*	4,30	2,56
ΑΝ0 2	40,8	40,0	1632	65280	2661	100	6,11		
ΑΝ0 3	41,0	40,0	1640	65600	1089	100	2,49		
ΑΝ5 1	42,0	40,0	1680	67200	1486	100	3,32	4,57	1,76
ΑΝ5 2	41,0	40,0	1640	65600	524	100	1,20*		
ΑΝ5 3	41,0	40,0	1640	65600	2543	100	5,81		

*Οι τιμές της αντοχής σε κάμψη στα δοκίμια ΑΝ0 1 και ΑΝ5 2 παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των δοκιμών από το ίδιο μίγμα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε κάποια ρωγμάτωση των δοκιμών ή σε αστοχία κατά την διαδικασία της παραγωγής τους. Για τον λόγο αυτό εξαιρέθηκαν οι τιμές με αστερίσκο από τους υπολογισμούς.



Σχήμα 4.2:Γράφημα Αντοχής σε Κάμψη Τριών Σημείων

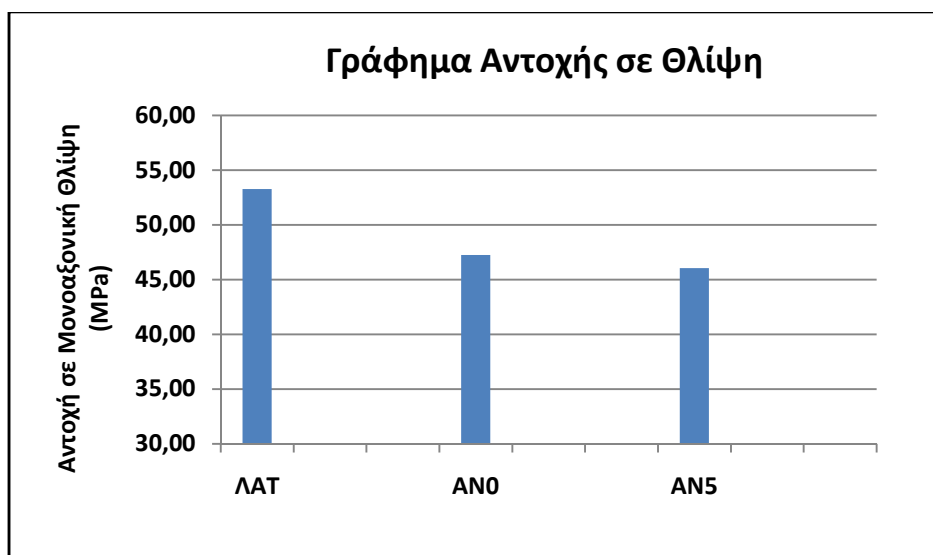
Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με λατομική άμμο εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη έναντι των δοκιμών με ανακυκλωμένη άμμο. Επίσης είναι εμφανές ότι τα δοκίμια τα

οποία έχουν υποστεί αναβάθμιση με μικροκυματική θέρμανση έχουν ελαφρώς υψηλότερη αντοχή από τα δοκίμια απλής ανακυκλωμένης άμμου (4,30 MPa και 4,57 MPa αντίστοιχα). Οι μειωμένες τιμές των αντοχών των δοκιμίων με ανακυκλωμένη άμμο, σε σχέση με εκείνων που παρασκευάστηκαν με λατομική, οφείλεται στο αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονιάς που περιείχαν, γεγονός που οδήγησε σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο και στην μικρότερη πυκνότητα των δοκιμίων αυτών.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον έλεγχο της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 και στο Σχήμα 4.3.

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη

Κωδικός Δοκιμίου	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Επιφάνεια (mm ²)	Μέγιστο φορτίο F (N)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Τυπική Απόκλιση
ΛΑΤ1	39,5	40,0	1600	84993	53,12	53,27	0,35
ΛΑΤ2	40,5	40,0	1600	85865	53,67		
ΛΑΤ3	40,8	40,0	1600	84829	53,02		
ΑΝ0 1	40,6	40,0	1600	75832	47,40	47,26	0,80
ΑΝ0 2	40,8	40,0	1600	76780	47,99		
ΑΝ0 3	41,0	40,0	1600	74253	46,41		
ΑΝ5 1	42,0	40,0	1600	72471	45,29	46,06	0,70
ΑΝ5 2	41,0	40,0	1600	74644	46,65		
ΑΝ5 3	41,0	40,0	1600	73949	46,22		



Σχήμα 4.3: Γράφημα Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με λατομική άμμο εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη έναντι των δοκιμίων με ανακυκλωμένη άμμο, καθώς επίσης ότι τα δοκίμια τα δοκίμια απλής ανακυκλωμένης άμμου παρουσιάζουν μια σχεδόν ανεπαίσθητη αύξηση της αντοχής από τα δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί αναβάθμιση με μικροκυματική θέρμανση (47,26 MPa και 46,06 MPa αντίστοιχα). Οι μειωμένες τιμές των αντοχών των δοκιμίων με ανακυκλωμένη άμμο, σε σχέση με εκείνων που παρασκευάστηκαν με λατομική, οφείλεται στο αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονίας που περιείχαν, γεγονός που οδήγησε σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο και στην μικρότερη πυκνότητα των δοκιμίων αυτών.

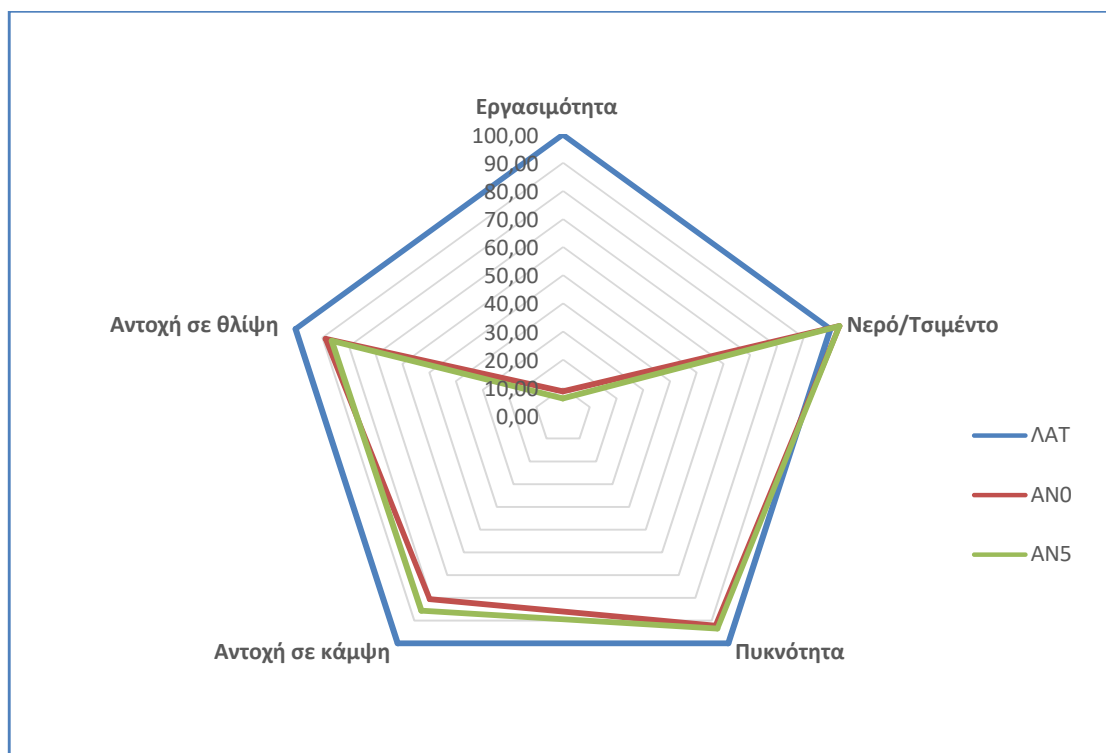
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και η σύγκριση με τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με την λατομική άμμο, που θεωρήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς, δίνονται στον Πίνακα 4.7. και απεικονίζονται σχηματικά στο διάγραμμα του Σχήματος 4.4. Για τη σύγκριση οι επιτευχθείσες τιμές εκφράστηκαν ως ποσοστό (%) των αντίστοιχων τιμών των δοκιμίων αναφοράς με τη λατομική άμμο.

Πίνακας 4.7: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Κωδικός σύνθεσης	Εργασιμότητα (%)	Νερό/Τσιμέντο	Πυκνότητα (kg/m ³)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
ΛΑΤ	19,50	0,50	2204,26	5,34	53,27
ΑΝ0	1,70	0,52	2033,44	4,30	47,26
ΑΝ5	1,20	0,52	2060,76	4,57	46,06

Τιμές ως ποσοστό (%) των δοκιμίων με την λατομική άμμο (ΛΑΤ)

Κωδικός σύνθεσης	Εργασιμότητα	Νερό/Τσιμέντο	Πυκνότητα	Αντοχή σε κάμψη	Αντοχή σε θλίψη
ΛΑΤ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ΑΝ0	8.72	103.34	92.25	80.52	88.72
ΑΝ5	6.15	103.28	93.49	85.58	86.47



Σχήμα 4.4. Τιμές των ιδιοτήτων των τσιμεντοκονιαμάτων με την ανακυκλωμένη άμμο (AN0, AN5) ως ποσοστό (%) των αντίστοιχων ιδιοτήτων των δοκιμών με την λατομική άμμο (LAT).

Παρατηρούμε από τις τιμές του Πίνακα 4.7 και το Σχήμα 4.4 ότι την μεγαλύτερη απόκλιση την εμφανίζουν στην εργασιμότητα (πολύ μειωμένη σε σχέση με εκείνη των κονιαμάτων με λατομική άμμο). Για την επίτευξη μεγαλύτερης εργασιμότητας θα απαιτείτο ακόμη μεγαλύτερη προσθήκη νερού γεγονός που θα υποβάθμιζε σημαντικά τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η προσθήκη υπερευστοποιητών θα μπορούσε να συνεισφέρει στην αύξηση της εργασιμότητας χωρίς να απαιτηθεί σημαντική προσθήκη επιπλέον νερού (Yihao X., 2023). Όσο αφορά τον λόγο νερού προς τσιμέντο τα δοκίμια με ανακυκλωμένη άμμο AN0 και AN5 εμφανίζουν όμοια τιμή, ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτά της λατομικής άμμου, λόγω της ύπαρξης είτε παιπάλης είτε κάποιων εναπομεινάντων ποζολανικών υλικών από το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Επίσης η πυκνότητα των τσιμεντοκονιαμάτων από λατομική άμμο ήταν αρκετά μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτά από απλή ανακυκλωμένη άμμο και με ανακυκλωμένη άμμο με θέρμανση, κάτι το οποίο πιθανώς οφείλεται στο ακανόνιστο σχήμα των κόκκων, στις ρωγματώσεις λόγω θερμικής ή θλιπτικής καταπόνησης ή στον μεγαλύτερο λόγο νερού/τσιμέντου. Κλείνοντας, οι μηχανικές ιδιότητες των τσιμεντοκονιαμάτων τόσο σε αντοχή σε κάμψη τριών σημείων, όσο και σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, έδειξαν ότι τα δοκίμια από λατομική άμμο εμφανίζουν

σημαντικά υψηλότερες τιμές από τα δοκίμια ανακυκλωμένης άμμου AN0 και AN5. Πιο συγκεκριμένα η μείωση της αντοχής σε κάμψη είναι 15% για τα δοκίμια όπου η λατομική άμμος υποκαταστάθηκε πλήρως από την αναβαθμισμένη ανακυκλωμένη άμμο και 20% για τα δοκίμια όπου η λατομική άμμος υποκαταστάθηκε πλήρως από την ανακυκλωμένη άμμο που δεν είχε υποστεί αναβάθμιση. Η μείωση αυτή είναι παραπλήσια εκείνης που αναφέρεται στην βιβλιογραφία που είναι της τάξης του 7-17% (Thomas et al., 2018).

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα για την παραγωγή προϊόντων τσιμεντοκονιάματος και την αναβάθμιση των ιδιοτήτων της με την εφαρμογή μικροκυματικής θέρμανσης.

Τα αποτελέσματα από την ορυκτολογική ανάλυση με XRD έδειξαν ότι η ανακυκλωμένη άμμος που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία περιέχει υψηλές ποσότητες ασβεστίτη, γεγονός που συνδέεται στενά με την σύνθεση αδρανών στην Ελλάδα. Από την ανάλυση υπέρυθρης φασματοσκοπίας παρατηρείται και πάλι υψηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο CaCO_3 . Επιπλέον εμφανίζονται ποσότητες χαλαζία SiO_2 , πορτλανδίτη Ca(OH)_2 και ενυδατωμένων φάσεων του τσιμέντου (C-S-H). Η κοκκομετρική ανάλυση του υλικού έδειξε ότι περισσότερο από το 50% έχει διάμετρο κόκκων μικρότερο από 2.00 mm, ενώ μόλις το 5% είναι μικρότερο από 0,125mm.

Με βάση τη μελέτη της αποδέσμευσης των δυο φάσεων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος (κόκκοι αδρανών και κόκκοι συνδετικής κονίας) σε σχέση με το χρόνο μικροκυματικής θέρμανσης (0-40min) φάνηκε ότι η επίδραση του χρόνου θέρμανσης στα πρώτα 5 λεπτά είναι σημαντική και οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού αποδέσμευσης της τάξης του 20%. Συνεπώς ο χρόνος θέρμανσης των 5 λεπτών είναι ο αποδοτικότερος. Με βάση το συμπέρασμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω μελέτη οι τρεις τύποι άμμου (λατομική, ανακυκλωμένη και ανακυκλωμένη μετά από μικροκυματική θέρμανση διάρκειας 5 λεπτών).

Στην συνέχεια από τον έλεγχο των δοκιμών τσιμεντοκονιαμάτων που παρασκευάστηκαν προέκυψε ότι τα δοκίμια που περιείχαν λατομική άμμο έχουν τη μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων (53,27MPa και 5,34MPa, αντίστοιχα). Παρατηρήθηκε επίσης ότι η αντοχή σε θλίψη των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με άμμο αδρανών χωρίς αναβάθμιση και αυτή των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με την αναβαθμισμένη άμμο (θραύση μετά από μικροκυματική θέρμανση 5 λεπτών) είναι παραπλήσιες (47,26 MPa και 46,06 MPa αντίστοιχα). Στην δοκιμή κάμψης τριών σημείων τα δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων με

αναβαθμισμένη άμμο έχουν ελαφρώς υψηλότερη αντοχή από τα δοκίμια με ανακυκλωμένη άμμο που δεν έχουν υποστεί αναβάθμιση (4,57 MPa και 4,30 MPa αντίστοιχα).

Οι μειωμένες τιμές των αντοχών των δοκιμίων με ανακυκλωμένη άμμο, σε σχέση με εκείνων που παρασκευάστηκαν με λατομική, οφείλεται στο αυξημένο ποσοστό προϋπάρχουσας συνδετικής κονιάς (τσιμεντόπαστα) που περιείχαν οι κόκκοι των ανακυκλωμένων αδρανών γεγονός αυτό οδήγησε σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο για την επίτευξη της ελάχιστης απαιτούμενης εργασιμότητας και κατά συνέπεια σε μειωμένη αντοχή. Η απομάκρυνση της συνδετικής κονιάς από τους κόκκους των ανακυκλωμένων αδρανών μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος (Kathy B. et al, 2013).

Η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 2005 έως 2068 kg/m³ και είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με την πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με πρότυπη λατομική άμμο που κυμάνθηκε από 2201 έως 2207 kg/m³. Η μείωση της πυκνότητας των δοκιμίων που παρατηρείται στα δοκίμια που παρασκευάζονται από ανακυκλωμένη άμμο, οφείλεται στην αύξηση του πορώδους του ανακυκλωμένου σκυροδέματος κατά την μικροκυματική θέρμανση (Yihao X. et al 2023) και συνεπώς στον μεγαλύτερο λόγο νερού/τσιμέντου που απαιτήθηκε, στην περιεχόμενη συνδετική κονία και στην διαφορετικά κοκκομετρική κατανομή τους.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι παρόλο που η μικροκυματική θέρμανση που εφαρμόστηκε αυξάνει τον βαθμό αποδέσμευσης της συνδετικής κονιάς από τους κόκκους των αδρανών, δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων κατά τη χρήση αυτής για παραγωγή τσιμεντοκονιαμάτων. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην χαμηλή ισχύ του φούρνου μικροκυμάτων του εργαστηρίου (80-800W) . Από την βιβλιογραφία παρατηρείται ότι σε αντίστοιχες μελέτες ποιοτικής αναβάθμισης ανακυκλωμένων αδρανών χρησιμοποιούνται βιομηχανικοί φούρνοι μικροκυματικής θέρμανσης οι οποίοι έχουν μέγιστη ισχύς έως 10kW και μήκος κύματος 2,45 GHz και οι χρόνοι θέρμανσης που εφαρμόζονται είναι αρκετά μικρότεροι των 5 λεπτών (Kathy B. et al 2013, Yihao X. et al 2023, Akbarnezhad A. et al, 2011). Επίσης είναι πιθανό να μην επιτεύχθηκε η βέλτιστη απομάκρυνση της συγκολλητικής κονιάς (παιπάλη) κατά την παραγωγή της ανακυκλωμένης άμμου. Μία άλλη αιτία των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων του

ανακυκλωμένου σκυροδέματος που παράχθηκε στην παρούσα εργασία πιθανώς να αποτελεί η ζημιά στην δομή των ανακυκλωμένων αδρανών λόγω της απότομης μετανάστευσης υγρασίας και της θερμικής καταπόνησης κατά την μικροκυματική θέρμανση (Yihao X. etal 2023).

5.2 Προτάσεις

Για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος προτείνεται:

- Η χρήση βιομηχανικού φούρνου μικροκυμάτων ώστε να επιτευχθεί υψηλής ισχύος μικροκυματική θέρμανση και μικροί χρόνοι θέρμανσης.
- Η μικροκυματική θέρμανση του υλικού αφότου αυτό έχει κορεσθεί σε νερό.
- Η διερεύνηση της χρήσης άλλων τεχνικών εκλεκτικής αποδέσμευσης αδρανών-κονίας, όπως εκείνης της χρήσης ηλεκτρικού τόξου.
- Η λεπτομερέστερη διερεύνηση της διαδικασίας της θραύσης του υλικού (π.χ. με μεταβολή της κοκκομετρίας του υλικού τροφοδοσίας).
- Η διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών για τον πληρέστερο χαρακτηρισμό των ανακυκλωμένων αδρανών που παρήχθησαν όπως, η δοκιμή του μπλε του μεθυλενίου, το ισοδύναμο της άμμου και η δοκιμή microDeval.
- Ο προ-κορεσμός της ανακυκλωμένης άμμου ή και η χρήση χημικών πρόσθετων (υπερρευστοποιητές) που μπορούν να βελτιώσουν την εργασιμότητα χωρίς την προσθήκη επιπλέον νερού.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Akbarnezhad A., (2011), Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates, National University of Singapore, 1 Engineering Drive 2, E1A 07-03, Singapore 117576, Singapore.

Arm M, (2001), Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), SE-581 95 Linköping, Sweden.

Caijn S., Yake L., Zhang J., Wengui L., Chong L. and Zhaobin X., (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review, Journal of Cleaner Production, 112:466-472.

Eurostat, (2017), Generation of Waste by Waste Category, Hazardousness and NACE Rev 2 Activity.

Eurostat, (2020), Total amount of waste generated by households and businesses, by waste category (EWC-Stat 4) and year.

Galetakis M, Komnitsas K, Leventakis K, Vasiliou A, Piperidi C, Zaharaki D, Stavroulakis N, Ginos M, (2014), Assessment of construction and demolition wastes as raw material for the building industry. 4th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania, Crete, Greece (2-5 September).

Galetakis M, Soultana A., (2016), A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. Constr Build Mater 102:769-781.

George, C.E., Rao, G.V.N., Thalakola, V., (1994),. Thermal desorption of contaminants using microwave heated rotary mixture. Proceedings, 29th Microwave Power Symposium. Chicago, IL.

Hansen, T. C., (1992), "Recycling of Demolished Concrete and Masonry: Report of Technical 29 Committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete." RILEM (The International 30 Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). E & FN 31 Spon, London.

Haque K.E., (1999), Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International journal of mineral processing*.57:1-24.

Jongsung W. and Cheng J. C.P., (2017), Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization, *Automation in Construction*, 79:3-18.

Kathy B. et al, (2013), Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste, BRGM, Water, Environment and Ecotechnologies Division — Waste and Raw Materials & Recycling Unit, 3 Avenue Claude Guillemin, BP 36009, Orléans 45060 Cedex 2, France.

Kingston, H.M., Jassie, L.B., (1988), Introduction to microwave sample preparation: Theory and practice : H. M. Kingston and Lois B. Jamie (editors), ACS Professional Reference Book, ACS, Washington, D.C.

Liyin S, H. Y and Griffith A., (2006), Improving environmental performance by means of empowerment of contractors. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 17(3):242–57.

Metaxas, A.C., Meredith, R.J., (1983), *Industrial Microwave Heating*. Chapter 10, Peter Peregrinus, London, UK.

Poon C.S., (2003), The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

Ryu, J. S., (2002), "Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made 40 from crushed concrete coarse aggregate." *Journal of Materials Science Letters*, 41 21(20), 1565-1567.

S.M. Javard Koleini, K. Barani K. & Razaee B. (2012) The Effect of Microwave Treatment on Dry Grinding Kinetics of Iron Ore, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 33:3, 159-169.

Sagoe-Crentsil K. et al, (2001), Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled coarse aggregate. *Cement and Concrete Research* 31(5):707-712.

Silva R.V., Brito J. and Dhir R.K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials*, 65:201-217.

Sri Ravindrarajah, and Tam, C. T.(1988). "Methods of improving the quality of recycled aggregate concrete." *RILEM Proc., Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Y. Kasai, ed., Chapman and Hall, U.K., 575-584.

Tam VWY, Soomro M, Evangelista ACJ, (2018), A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Constr Build Mater* 172:272-292.

Thomas J., Thaickavil N. N. and Wilson P.M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering*, 19:349-365.

Yihao X. et al, (2023), Effect of microwave pretreatment on mechanical behavior of concrete and aggregate recovery, School of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China.

Yihao X. et al, (2023), Effect of moisture on concrete damage and aggregate recycling under microwave irradiation, School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China.

Yoda, K., Yoshikane, T., Nakashima, Y., and Soshiroda, T., (1988). "Recycled cement and recycled concrete in Japan." *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(5):443-450.

Zaharieva et al., (2004). R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, E. Wirquin. Resistance of recycled aggregate concrete to freeze-thaw and deicing salts, Building Materials and Insulation Department, Civil Engineering and Geodesy, University of Architecture, 1, Blvd Christo Smirnensky, 1421, Sofia, Bulgaria.

Ελληνική

Γρύλλης Ε., (2017), Εναλλακτικά συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και η εφαρμογή τους στον ελλαδικό χώρο, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ανώτατο Τεχνολογικό Ιδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

Δασκαλάκης Θ., (2019), Παραγωγή και έλεγχος ποιότητας αναβαθμισμένων αδρανών υλικών από απόβλητα εκσκαφών και κατεδαφίσεων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΕΛΣΤΑΤ, (2020), Στατιστικές Στερεών Αποβλήτων.

Ιωάννου Χ., (2012), Ανακύκλωση σκυροδέματος-ενεργειακό ισοζύγιο και αποτύπωμα άνθρακα, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Βόλος.

Λογοθέτη Α., (2022), Έλεγχος ποιότητας ανακυκλωμένης άμμου για παραγωγή κονιαμάτων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μοροπούλου, Λαμπρόπουλος, (2010), Δομικά Υλικά, Τσιμέντο & Σκυρόδεμα-Σημειώσεις, Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Ομάδα εργασίας ΤΕΕ/ΤΔΕ, (2012), Αναστασοπούλου Μ., Βασιλείου Β., Καράλης Κ., Παπανικολάου Π., Ανακύκλωση οικοδομικών απορριμμάτων, Πάτρα.

Παναγιωτακόπουλος Π., (2008), Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η Διάσταση της Βιωσιμότητας στην Κατασκευή, Αθήνα.

Πιπερίδη Χ., (2017), Εργαστηριακή διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών υλικών για παραγωγή δομικών στοιχείων, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σάββα Α.Ε., (2015), Αντοχή και υδατοαπορροφητικότητα σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, Πρακτικά 4ου Πανελλήνιου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη (11-12 Ιουνίου), 318- 332.

Σταμπολιάδης Η., (2008), Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων. Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά.

Σταμπολιάδης Η., (2008), Μηχανική των τεμαχιδίων. Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά.

Τσακαλάκης Κ. (2009) Τεχνικοοικονομική διερεύνηση διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος Τ.Ε.Ε. & Ε.Τ.Ε.Κ., Πάφος, Κύπρος, 21-23 Οκτωβρίου, σελ. 23-25.

Διαδικτυακές πηγές

[Matetest: Material testing equipment](#)

[Orykta.gr](#)

[ResearchGate | Find and share research](#)

[ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books](#)

[TUCeclass](#)

[ANABE Ανακύκλωση Αδρανών Βορείου Ελλάδος](#)

[ANAKEM A.E. – Ανακύκλωση ΑΕΚΚ Κεντρικής Μακεδονίας Α.Ε.](#)

[Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης \(duth.gr\)](#)

[ΕΟΑΝ- Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης](#)

[Εργαστήριο Βιομηχανικών Δοκιμών - EUROLAB](#)

[Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής \(uniwa.gr\)](#)

[ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΚΑΙΧΑΛΥΒΑΣ \(skyrodemanet.gr\)](#)

