



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

**Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση
Κατασκευών και Αειφόρος Ανάπτυξη**
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

**Διερεύνηση της επίδρασης του ελαφροσκυροδέματος στη
σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μαρία Γ. Νομικού

Επιβλέπων Καθηγητής:
Κωνσταντίνος Ρεπαπής

Αθήνα 2020

Περιεχόμενα

Εκτεταμένη περίληψη.....	4
Extended Summary.....	7
Λέξεις - Κλειδιά.....	9
Key Words.....	9
Πρόλογος.....	10
Σύμβολα και Συντομογραφίες.....	12
Εισαγωγή.....	13
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ.....	16
1. Εργαστηριακές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη.....	16
1.1. Διερευνητικές συνθέσεις σκυροδέματος.....	16
1.2. Τελικές συνθέσεις κισηροδέματος.....	21
1.3. Μηχανικές ιδιότητες και δοκιμές ανθεκτικότητας.....	22
1.4. Αποτελέσματα φυσικομηχανικών δοκιμών δειγμάτων τσιμέντου και ελαφρόπετρας.....	24
2. Μετρήσεις χαρακτηρισμού, ανθεκτικότητας και μη καταστρεπτικοί έλεγχοι.....	28
2.1. Συμπληρωματικές ιδιότητες δομικού κισηροδέματος.....	28
2.2. Ταχύτητα ενανθράκωσης.....	30
2.3. Φαινόμενο Βάρος νωπού συμπυκνωμένου κισηροδέματος.....	34
2.4. Βάθος διείσδυσης νερού σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-08.....	35
2.5. Επιταχυνόμενη διείσδυση χλωριόντων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1202.....	36
2.6. Μετρήσεις πορώδους σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642.....	38
2.7. Κύκλοι ψύξης – απόψυξης σύμφωνα με το πρότυπο CEN 15177.....	40
2.8. Μέτρηση υπερήχων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 597.....	41
2.9. Ηλεκτροχημικό δυναμικό σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 876.....	43
2.10. Μεταβολή μήκους δοκιμίων σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 157.....	45
2.11. Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών με αποτελέσματα κρουσιμέτρησης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 823.....	47
2.12. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	48
3. Πιλοτική Παραγωγή σε μονάδα Ετοιμού Σκυροδέματος.....	49
3.1. Εξοπλισμός – Διαδικασία παραγωγής.....	50
3.2. Πρώτες ύλες.....	50
3.2.1. Τσιμέντο CEM II /B-M (P-W-L) 42,5 ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ.....	50
3.2.2. Κίσηρη 0/8 ΛΑΒΑ ΑΕ.....	51

3.2.3.	Άμμος θραυστή ασβεστολιθική 0/4	51
3.2.4.	Πρόσθετα σκυροδέματος	52
3.2.5.	Μεταλλικές ίνες 60 mm, ZS/N 60/1,0 (hook end steel fibers)	52
3.3.	Βιομηχανικά αναμίγματα	53
3.3.1.	Δοκιμές και μετρήσεις σε νωπό σκυρόδεμα	53
3.3.2.	Δοκιμές και μετρήσεις σε σκληρυμένα δοκίμια	53
3.3.3.	Προκαταρτικές βιομηχανικές δοκιμές με κίσηρη. Τα αναμίγματα 14046-8p.....	54
3.4.	Σύνοψη αποτελεσμάτων και εμπειρικοί συσχετισμοί	57
3.4.1.	Σχέση θλιπτικής αντοχής μεταξύ κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών	58
3.4.2.	Σχέση καμπτικής αντοχής μεταξύ πρισματικών δοκιμών	61
3.4.3.	Σχόλια σχετικά με την πυκνότητα.....	61
3.4.4.	Εκτίμηση αντοχής 28 ημ.	63
3.4.5.	Σχόλια σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας.....	65
3.5.	Αναφορά στα πρότυπα ACI 211.2-98 και ACI 213R-03	68
3.6.	Συμπεράσματα κεφαλαίου 3.....	72
	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ	73
4.	Κανονιστικό Πλαίσιο.....	73
4.1.	Γενικά	73
4.2.	Σχεδιασμός πλαισίων	78
4.3.	Τεκμηρίωση σχετικά με την κατηγορία αντοχής, πυκνότητα, εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας.....	82
4.4.	Παράμετροι υπολογισμών.....	84
4.5.	Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	86
4.5.1.	Σεισμική μάζα, ιδιοπερίοδος, σχετική μετακίνηση	86
4.5.2.	Δοκοί.....	90
4.5.3.	Υποστυλώματα	96
4.5.4.	Μειωμένες διατομές υποστυλωμάτων	104
5.	Συμπερασματικές παρατηρήσεις	105
6.	Προτάσεις	107
7.	Βιβλιογραφία	108
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	110
	Διαγράμματα ροπών	111
	Πινακοποιημένα αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού δοκών και υποστυλωμάτων πλαισίων.....	121

Εκτεταμένη περίληψη

Από πρακτική άποψη, ως **δομικό** χαρακτηρίζεται το **ελαφροκυρόδεμα** που προορίζεται για την ανάληψη φορτίων στην κατασκευή. Σημαντικές μελέτες για τις εφαρμογές του δομικού ελαφροκυροδέματος, κυρίως με ορυκτής προέλευσης τεχνητά αδρανή, έχουν γίνει από χώρες της ΕΕ και από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα EuroLightCon (1998).

Η ανάπτυξη των διαφόρων τύπων ελαφροκυροδέματος με αδρανή ορυκτής προέλευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα τοπικά διαθέσιμα ελαφροβαρή αδρανή τα οποία μπορεί να είναι φυσικά (κίσηρη, βασαλτική σκωρία) ή τεχνητά (διογκωμένος περλίτης, διογκωμένη άργιλος). Τελευταία χρησιμοποιούνται τεχνητά ελαφροβαρή αδρανή με βάση την ιπτάμενη τέφρα.

Το φυσικό ελαφροβαρές αδρανές που βρίσκεται στην Ελλάδα είναι η κίσηρη, η οποία εξορύσσεται από την ΛΑΒΑ ΑΕ. Η κίσηρη είναι φυσικό ηφαιστειογενές υλικό για την διόγκωση του οποίου δεν απαιτείται θερμική ενέργεια σε αντίθεση με τα άλλα τεχνητά ελαφροβαρή αδρανή. Μεταξύ των άλλων εφαρμογών χρησιμοποιείται στην παραγωγή ελαφροβαρούς κισηροδέματος. Η ελληνική κίσηρη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή μεταξύ όλων των άλλων ελαφρών αδρανών ορυκτής προέλευσης με αντίστοιχη επίδραση στην αντοχή του κισηροδέματος.

Το δομικό κισηρόδεμα χαρακτηριστικής αντοχής 25 MPa εμφανίζει το πλεονέκτημα της μειωμένης ξηρής πυκνότητας (~1500 kg/m³) σε συνδυασμό με την μειωμένη θερμική αγωγιμότητα ($\lambda \sim 0,6$ W/m/K). Με την χρήση δομικού κισηροδέματος η μείωση της μάζας της κατασκευής διευρύνει το πλήθος των δομικών λύσεων (προσθήκες καθ' ύψος, εφαρμογές σε σεισμικό περιβάλλον, αλλαγή δομής οπλισμού) και συμβάλλει στην θερμομόνωση των κατασκευών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να συμβάλλει περαιτέρω στην διερεύνηση της βιομηχανικής παραγωγής και χρήσης του δομικού κισηροδέματος που παράγεται σε ορισμένες μονάδες της Lafarge Beton (Όμιλος Εταιρειών ΗΡΑΚΛΗΣ) και να επεκτείνει την δομοστατική αξιολόγηση του. Διαμορφώνεται σε δύο κύριες ενότητες, την **πειραματική** και την **υπολογιστική**:

- A. Η **Πειραματική Θεώρηση** αφορά στην **τεχνολογία του δομικού κισηροδέματος**. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον Όμιλο Εταιρειών ΗΡΑΚΛΗΣ (ΕΚΕΤ, Lafarge Beton) στο ερευνητικό εγχείρημα 716-BET-2013. Στο ίδιο ερευνητικό εγχείρημα συμμετείχε το Εργ. Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ όπου σε εκτεταμένες δοκιμές σε δοκίμια πραγματικών διαστάσεων δείχθηκε ότι οι τεχνικές ιδιότητες του δομικού κισηροδέματος συμμορφώνονται πλήρως με τους Ευρωκώδικες EC2 και EC8.
- B. Η **Υπολογιστική Θεώρηση** διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και αφορά στην δομοστατική σύγκριση μεταξύ πολυώροφων κτηρίων από σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας και από κισηρόδεμα με βάση τους ευρωκώδικες EC2 και EC8. Εστιάζει στην ανάλυση **πλαισίων ισογείου** σε κτήρια χρήσης κατοικίας 4, 8, 12, 16 και 20 ορόφων και περιλαμβάνει τις ενότητες:
- **Κανονιστικό πλαίσιο**, όπου γίνεται ανασκόπηση των κανόνων σχεδιασμού των EC2 και EC8 με δομικό ελαφροκυρόδεμα.
 - Τεκμηρίωση σχετικά με την **πυκνότητα**.
 - Τον καθ' αυτό **σχεδιασμό των πλαισίων** με ύψος 3 m και με δύο ανοίγματα πλάτους 6 m το καθένα. Τα κτήρια επιλύονται με την χρήση του εμπορικού κώδικα CSI ETABS2016 και τα πλαίσια ελέγχονται και συγκρίνονται στην οριακή κατάσταση αστοχίας και στον σεισμικό συνδυασμό (μέγιστη ροπή, μέγιστη τέμνουσα, συχνοτική ανάλυση).

- **Σχολιασμός** των υπολογιστικών ευρημάτων.

Συνοπτικά τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, είναι:

Τεχνολογία δομικού κισηροδέματος

- Με την χρήση κίσηρης ΛΑΒΑ ΑΕ κοκκομετρίας 0/8 mm και περιεκτικότητα σε τσιμέντο CEM II42,5 από 390 έως και 477 kg/m³ παράγεται σε μονάδα σκυροδέματος δομικό ελαφροβαρές σκυρόδεμα με κατηγορίες αντοχής κατά EN 206 από LC20/22 έως και LC35/38 ή και μεγαλύτερες.
- Το δομικό ΚΣ που παράγεται με αδρανή κίσηρης που αντικαθιστούν εν όλω ή εν μέρει τα ασβεστολιθικά αδρανή έχει ίδιο βάρος νωπού στην περιοχή των 1600-1800 kg/m³. Η πυκνότητα των παραγομένων συνθέσεων βρίσκεται στην περιοχή των τιμών του ελαφροβαρούς σκυροδέματος κατά EN 206 από D1,4 έως και D1,8.
- Το δομικό κισηρόδεμα μπορεί να είναι ινοπλισμένο ή να περιέχει και θραυστή άμμο για την επίτευξη οικονομικών συνθέσεων για προεντεταμένα στοιχεία.
- Η παραγωγή, μεταφορά, άντληση και η διάσθρωση του δομικού κισηροδέματος δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες του σκυροδέματος κανονικού βάρους.
- Η διατήρηση της εργασιμότητας του νωπού δομικού κισηροδέματος επιτυγχάνεται για τουλάχιστον 3 h με την χρήση συνήθων προσθέτων σκυροδέματος (επιβραδυντής πήξης, μειωτής νερού, υπερρρευστοποιητής) και την προσθήκη υπερρρευστοποιητή έργου.
- Ο σχεδιασμός των συνθέσεων δομικού κισηροδέματος, η παραγωγή, μεταφορά, άντληση και διάσθρωση, οι ιδιότητές του και οι συσχετισμοί τους βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206 και τα αμερικανικά πρότυπα ACI.
- Τα αποτελέσματα της επιταχυνόμενης διάχυσης χλωριόντων σε δοκίμια ελαφροσκυροδέματος υποδεικνύουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα.
- Με την χρήση δομικού κισηροδέματος επιτυγχάνεται μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 60% σε σχέση με το σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας.
- Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φυσικής και επιταχυνόμενης ενανθράκωσης υποδεικνύουν διάρκεια ζωής της κατασκευής περί τα 40 έως 50 έτη, που είναι συγκρίσιμη με το σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας C20/25.

Δομοστατικοί υπολογισμοί σε πλαίσια

- Η μείωση της πυκνότητας του κισηροδέματος συγκριτικά με το σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σεισμικής μάζα σε ποσοστό 21% σε όλα τα πλαίσια. Η μείωση της σεισμικής μάζας προκαλεί με τη σειρά της ανάλογη μείωση της τέμνουσας βάσης, η οποία οδηγεί σε μικρότερη σεισμική καταπόνηση.
- Η ιδιοπερίοδος αυξάνεται σε όλα τα πλαίσια από κισηρόδεμα και είναι μεγαλύτερη από T_c. Ετσι, οι επιταχύνσεις σχεδιασμού μειώνονται και βρίσκονται στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος σχεδιασμού.
- Το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του κισηροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερες οριζόντιες σχετικές μετακινήσεις στα πλαίσια σε ποσοστό από 8,0% (4 όρ.) έως και 20% (16 και 20 όρ.).
- Στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας το ποσοστό μείωσης των ροπών στις δοκούς των πλαισίων υπολογίσθηκε ίσο με 12% σε όλα τα πλαίσια.
- Στην Σεισμική Δράση το ποσοστό μείωσης των ροπών στις δοκούς κυμαίνεται από 18 έως 22% με την μεγαλύτερη μείωση στα πλαίσια 4 και 8 ορόφων.
- Στις δοκούς υπολογίζεται μείωση στον οπλισμό του κισηροδέματος σε σχέση με τον οπλισμό του σκυροδέματος κανονικής πυκνότητας.
 - Στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας το ποσοστό μείωσης ανέρχεται σε 12% για τα πλαίσια 4 έως και 16 ορόφων ενώ δεν υπολογίζεται διαφορά για το πλαίσιο των 20 ορόφων.
 - Στην Σεισμική Δράση το ποσοστό μείωσης ανέρχεται σε ~26% για όλα τα πλαίσια.

- Στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας το ποσοστό μείωσης των ροπών στα υποστυλώματα υπολογίσθηκε ίσο με 12% σε όλα τα πλαίσια.
- Στην Σεισμική Δράση το ποσοστό μείωσης των ροπών στα υποστυλώματα κυμαίνεται από 19% έως 27% με την μεγαλύτερη μείωση στα πλαίσια 4 και 8 ορόφων.
- Στα υποστυλώματα υπολογίσθηκε η μείωση στον οπλισμό του κισηροδέματος σε σχέση με τον οπλισμό του σκυροδέματος κανονικής πυκνότητας.
 - Στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας και στην Σεισμική Δράση δεν παρατηρείται διαφορά στον οπλισμό των υποστυλωμάτων στα πλαίσια 4, 8 και 12 ορόφων.
 - Στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας και στην Σεισμική Δράση ο οπλισμός υπολογίζεται μειωμένος κατά 60% στο κεντρικό υποστυλωμα (C2) στα πλαίσια 16 και 20 ορόφων.
- Υπολογισμοί με μειωμένη την διατομή των υποστυλωμάτων σε σχέση με την διατομή αναφοράς υποδεικνύουν ότι στα δομήματα 4 και 8 ορόφων δεν υπάρχει μείωση στον οπλισμό. Στα υπόλοιπα η μείωση εμφανίζεται μόνο στο κεντρικό υποστυλωμα (C2). Παρατηρείται παράλληλα ότι η μείωση της διατομής του υποστυλώματος επιφέρει μικρότερο ποσοστό μείωσης οπλισμού.

Αξίζει να σημειωθούν στο πρωτότυπο οι παρατηρήσεις των P.Kuman Mehta και Paulo J.M. Monteiro, ("CONCRETE, Microstructure, Properties and Materials", Third Edition, McGraw-Hill, New York, (2006), pp.457-458) σχετικά με τα ειδικά πλεονεκτήματα της χρήσης δομικού ελαφροσκυροδέματος:

"...While light-weight concrete will cost more than normal-weight concrete per cubic-yard, the structure will cost less as a result of the reduced dead weight and lower foundation..."

...application of lightweight concrete can result in lower costs for foundations and reinforcing steel...

...Strength is not a major consideration in floor slabs; therefore, a large amount of lightweight concrete is used to reduce the dead weight of concrete in floors of high-rise buildings...

...One Shell Plaza, Houston, Texas, is an all-lightweight concrete structure of 52 stories, containing a 70 by 52 by 2.5 m lightweight concrete pad, 18 m below grade. A concrete mixture of 1840 kg/m³ density and 41.2 MPa compressive strength was used for shear walls, columns, and mat foundation. If normal concrete had been used, only a 35-story structure could have been safely designed due to the limited bearing capacity of the soil...

...Kulka and Polivka state that the basic economy of lightweight-aggregate concrete can be demonstrated by the savings in reinforcement...

...Among other advantages of reduction in the weight of concrete is the higher resistance of shear elements to earthquake loading since seismic forces are largely a direct function of the dead weight of the structure...

...Although expanded clay and shale aggregates are most suitable for the production of structural-quality lightweight concrete, the escalation of fuel costs in the 1970s has priced these aggregates out of many markets..."

Extended Summary

As structural one is characterized the lightweight aggregate concrete intended to bear loads in the construction. Significant studies on the applications of structural lightweight concrete, mainly produced with artificial lightweight aggregates, have been carried out by EU countries and the European program EuroLightCon (1998).

The development of different types of lightweight concrete with aggregate of mineral origin depends mainly on the local availability of lightweight aggregates which can be natural (pumice, basaltic slag) or artificial (expanded perlite, expanded clay). Recently, artificial lightweight aggregates based on fly ash are used.

Pumice is the natural lightweight aggregate found in Greece, quarried by LAVA SA. As pumice is a product of volcanic eruption no thermal energy is required for its expansion in contrast to other artificial lightweight aggregates. Among other applications, it is used in the production of lightweight concrete. Greek pumice has the highest compressive strength among all other lightweight aggregates of mineral origin affecting on the strength of pumice concrete.

The structural pumice concrete of 25 MPa strength has the advantage of reduced dry density ($\sim 1500 \text{ kg/m}^3$) combined with low thermal conductivity ($\lambda \sim 0,6 \text{ W/m/K}$). The use of structural pumice concrete reduces the mass of a building expanding the number of structural solutions (additions or stories, applications in seismic environment, change of reinforcement structure) and contributes to energy savings.

The aim of this dissertation is to further contribute to the investigation of the industrial production and the use of structural pumice concrete produced in certain units of Lafarge Beton (HERACLES Group of Companies) and to continue the structural studies. It is formed into two main sections, the experimental and the computational:

- A. The experimental section concerns the technology of the structural pumice concrete. It includes the results from the tests carried out at the 'HERACLES Group of Companies (EKET, Lafarge Beton) in the research project 716-BET-2013. The results are presented and commented on. In the same research project, the Laboratory of Reinforced Concrete NTUA participated, where extensive testing on real-size specimens showed that the technical properties of the structural crossover fully comply with EC2 and EC8 Eurocodes.
- B. The computational section was conducted at the University of West Attica and concerns the structural comparison between multi-story buildings constructed with Normal Density Concrete and Pumice Concrete. Analysis was based on the European codes EC2 and EC8. It focuses on the analysis of ground floor frames in residential buildings of 4, 8, 12, 16 and 20 stories and includes the sections:
 - Regulatory framework, where the design rules of EC2 and EC8 are reviewed with structural lightweight aggregate concrete
 - Documentation regarding the density of structural pumice concrete
 - The actual design of the frames with a height of 3 m and with two openings 6 m wide each. The buildings were solved using the CSI ETABS2016 commercial code and the frames are checked and compared at ultimate limit state and at the seismic combination according to Eurocodes EC2 and EC8 (maximum torque, maximum shear force, modal analysis)
 - Comments on the computational results

Briefly, the conclusions of the dissertation are:

Structural pumice concrete technology

- Using LAVA SA pumice with granulometry 0/8 mm and with cement content CEM II42.5 from 390 to 477 kg/m³, a structural lightweight concrete is produced in a Ready mix giving strength classes according to EN 206 from LC20/22 to LC35/38 or even larger.
- The structural lightweight concrete produced with pumice aggregates that replace entirely or partially the limestone aggregates has fresh density in the range of 1600-1800 kg/m³. The density of the concrete mixtures covers the range of lightweight concrete according to EN 206 from D1.4 to D1.8.
- The structural pumice concrete may be steel fiber reinforced or contain crushed sand to achieve economical compositions for prestressed elements.
- Production, transport, pumping and placing of the structural pumice concrete do not differ from the corresponding normal density concrete.
- Workability of the fresh structural pumice concrete is maintained at least for 3 h by using ordinary concrete additives (setting retarder, water reducer, superplasticizer) and with the of superplasticizer at the jobsite.
- The mix design of structural pumice concrete composition, production, transport, pumping and placing, its properties and their correlation fully comply with the European standard EN 206 and the American standards ACI.
- The results of the accelerated diffusion of chlorides in lightweight concrete specimens indicate very low permeability.
- Using structural pumice concrete, a reduction of the thermal conductivity coefficient of 60% is achieved compared to normal density concrete.
- The results of natural and accelerated carbonation experiments indicate a lifespan of construction of about 40 to 50 years, which is comparable to the conventional C20/25 concrete.

Structural calculations in frames

- The decrease of pumice concrete density results in a 21% reduction in seismic mass for all frames in comparison with normal density concrete. The reduction in seismic mass in turn causes a reduction of the shear force at the base of the columns of the frames, which leads to less seismic stress.
- The fundamental period increases in all frames of pumice concrete and is greater than T_c . Thus, the design accelerations are reduced and are in the declining branch of the elastic response spectrum.
- The smaller modulus of elasticity of pumice concrete leads to larger horizontal relative movements in frames ranging from 8.0% (4 story building) up to 20% (16 and 20 story building).
- At ultimate limit state, the reduction rate of torque on the frame beams was calculated to be equal to 12% in all frames.
- At seismic action the rate of reduction of torque on the beams ranges from 18 to 22% with the largest reduction for 4 and 8 story building.
- A decrease of the reinforcement of the pumice concrete beams is calculated in relation to the reinforcement of normal density concrete beams.
 - At ultimate limit state, the reduction rate is 12% for frames of 4 to 16 story building, while no difference is calculated for the frame of 20 story building.
 - At seismic action the reduction rate is ~ 26% for all frames.
- At ultimate limit state, the rate of reduction of the torque on the columns was estimated at 12% in all frames.

- At seismic action, the rate of reduction of torque on the columns ranges from 19% to 27% with the largest decrease for 4 and 8 story building.
- The reduction of the reinforcement of the columns with pumice concrete in relation to the reinforcement of the columns with normal density concrete was calculated.
 - At ultimate limit state and at seismic action, there is no difference in the reinforcement of the columns for 4, 8 and 12 story building.
 - At ultimate limit state and at seismic action, the reinforcement is estimated to be reduced by 60% in the central column (C2) for 16 and 20 story building.
- Calculations with reduced column cross-section in relation to the reference cross-section indicate that there is no reduction in reinforcement for 4 and 8 story building. In the rest, the decrease occurs only in the central column (C2). In addition, it is observed that the reduction of the cross section of the column results in a smaller rate of reduction of reinforcement.

It is worth mentioning at the prototype P.Kuman Mehta και Paulo J.M. Monteiro comments ("CONCRETE, Microstructure, Properties and Materials", Third Edition, McGraw-Hill, New York, (2006), pp.457-458) regarding advantages of structural lightweight concrete use:

"...While light-weight concrete will cost more than normal-weight concrete per cubic-yard, the structure will cost less as a result of the reduced dead weight and lower foundation..."

...application of lightweight concrete can result in lower costs for foundations and reinforcing steel...

...Strength is not a major consideration in floor slabs; therefore, a large amount of lightweight concrete is used to reduce the dead weight of concrete in floors of high-rise buildings...

...One Shell Plaza, Houston, Texas, is an all-lightweight concrete structure of 52 stories, containing a 70 by 52 by 2.5 m lightweight concrete pad, 18 m below grade. A concrete mixture of 1840 kg/m³ density and 41.2 MPa compressive strength was used for shear walls, columns, and mat foundation. If normal concrete had been used, only a 35-story structure could have been safely designed due to the limited bearing capacity of the soil...

...Kulka and Polivka state that the basic economy of lightweight-aggregate concrete can be demonstrated by the savings in reinforcement...

...Among other advantages of reduction in the weight of concrete is the higher resistance of shear elements to earthquake loading since seismic forces are largely a direct function of the dead weight of the structure...

...Although expanded clay and shale aggregates are most suitable for the production of structural-quality lightweight concrete, the escalation of fuel costs in the 1970s has priced these aggregates out of many markets..."

Λέξεις - Κλειδιά

Ελαφροσκυρόδεμα, κίσηρη, κισηρόδεμα, δομικό κισηρόδεμα, δομικός σχεδιασμός

Key Words

Lightweight concrete, pumice, pumice concrete, structural pumice concrete, structural design

Πρόλογος

*"If you are not having fun, you're not learning.
There's a pleasure in finding things out"*
Richard Feynman

Σε μια εποχή που οι περισσότεροι κατευθύνονται σε μεταπτυχιακά με αντικείμενο στην διοίκηση των επιχειρήσεων ή στα χρηματοοικονομικά, η γράφουσα επέλεξε το μεταπτυχιακό του ΠΑΔΑ «Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος Ανάπτυξη» με σκοπό να επεκτείνει και να εμβαθύνει τις γνώσεις της ως πολιτικού μηχανικού στα γνωστικά πεδία της δομοστατικής και των επισκευών σκυροδέματος, θεωρώντας ότι η μαθητεία αυτή αποτελεί πολύτιμο συμπλήρωμα των επιστημονικών της αναζητήσεων και της επαγγελματικής της δραστηριότητας στο αντικείμενο της τεχνολογίας σκυροδέματος.

Ο διετής κύκλος του μεταπτυχιακού «Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος Ανάπτυξη» περιλαμβάνει συνεκτικό σύνολο μαθημάτων και ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες των μηχανικών με την επικαιροποίηση και αναβάθμιση των γνώσεων. Επίσης διακρίνεται για την ισόρροπη προσέγγιση μεταξύ της θεωρητικής θεμελίωσης και των εφαρμογών στην πράξη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «**Διερεύνηση της επίδρασης του ελαφροσκυροδέματος στη σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών**» συνδυάζει τα πεδία της τεχνολογίας σκυροδέματος και του δομοστατικού σχεδιασμού εστιάζοντας στο δομικό ελαφροσκυρόδεμα με αδρανές την κίσηρη. Το δομικό κισηρόδεμα και τα δομικά προϊόντα κίσηρης αποτελούν αντικείμενο εφαρμοσμένης έρευνας για τον Όμιλο ΗΡΑΚΛΗΣ στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος του οποίου είναι προϊσταμένη η γράφουσα.

Στην σχετική ερευνητική δραστηριότητα, η ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ και το Εργ. Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ υλοποίησαν το ερευνητικό εγχείρημα 716-BET-2013 "Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεσματικότητας με κίσηρη" με σκοπό την τεχνική τεκμηρίωση του δομικού κισηροδέματος στην Ελλάδα και τη δυνητική εισαγωγή του στο ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο.

Στην ενότητα της τεχνολογίας σκυροδέματος συγκεντρώνονται και σχολιάζονται στην διπλωματική εργασία τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για το 716-BET-2013 στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου του Ομίλου ΗΡΑΚΛΗΣ.

Στην ενότητα της δομοστατικής ανάλυσης επεκτείνεται η έρευνα του παραπάνω εγχειρήματος με την σύγκριση πλαισίων ισογείου πολυορόφων κτηρίων από δομικό κισηρόδεμα και σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας. Το τμήμα αυτό έδωσε την αξιοσημείωτη ευκαιρία μελέτης στην γράφουσα των ευρωκωδίκων EC2 και EC8.

Για την συμβολή τους στην εκπόνηση της διατριβής ευχαριστούνται θερμά:

Ο αναπληρωτής καθηγητής, κος Κωνσταντίνος Ρεπαπής, για την καθοδήγηση και την εκπαίδευση στον δομοστατικό σχεδιασμό.

Οι συνάδελφοι, Χαράλαμπος Ντέτσικας, Ιωάννης Μακρυγιάννης, Σάββας Μιχαηλίδης, Σωκράτης Παραθύρας, Δημήτρης Κανάκης και Fotis Fotiev, τεχνικοί του τμήματος Φυσικών και Μηχανικών Δοκιμών του εργαστηρίου ΕΚΕΤ, για τη συνεισφορά και την άψογη συνεργασία κατά τη διάρκεια του προγράμματος 716-BET-2013.

Ο συνάδελφος Βασίλης Καλοϊδής, Δρ. Χημικός Μηχανικός για την αμέριστη υποστήριξή του στις επιστημονικές αναζητήσεις της γράφουσας.

Ευχαριστώ τους γονείς μου, Γιώργο και Αντωνία για την ανιδιοτελή υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

Εκτός από την ολοκλήρωση ενός προσωπικού της στόχου με την παρούσα διπλωματική εργασία στόχου, η γράφουσα ελπίζει να έχει συμβάλει τόσο στην εκπαιδευτική διαδικασία του ΠΑΔΑ όσο και στην έρευνα για το δομικό κισηρόδεμα.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Σύμβολα και Συντομογραφίες

δ.ε.	διπλωματική εργασία
ΕΣ	ελαφροσκυρόδεμα
ΚΣ	κισηρόδεμα
ΣΚΠ	σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας, συμβατικό σκυρόδεμα
ΟΚΑ	οριακή κατάσταση αστοχίας
ΣΔ	σεισμική δράση

Οι συμβολισμοί του κεφαλαίου 4 που αναφέρονται στα πρωτότυπα κείμενα EC2 και EC8, ακολουθούν τον συμβολισμό των EC2 και EC8.

Οι αναφορές σε διαγράμματα, πίνακες ή παραγράφους που είναι γραμμένες με πλάγιους χαρακτήρες αφορούν στην ταυτότητά τους στο πρωτότυπο κείμενο.

Εισαγωγή

Το ΕΣ είναι ελαφροβαρές κατασκευαστικό υλικό γνωστό από την αρχαιότητα. Το Κολοσσαίο και το Πάνθεον κατασκευάστηκαν εν μέρει από παρόμοιο υλικό, το οποίο περιέχει μίγμα ελαφροβαρών αδρανών από λάβα, θραυστούς οπτόπλινθους και κίσηρη (ελαφρόπετρα).

Από πρακτική άποψη, ως **δομικό** χαρακτηρίζεται το ΕΣ που προορίζεται για την ανάληψη φορτίων στην κατασκευή. Από τις πρώτες εφαρμογές του υλικού αυτού αναφέρεται κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο η ναυπήγηση στις ΗΠΑ 104 πλοίων χωρητικότητας από 3 έως 140.000 τόνους. Οι επιδόσεις του δομικού ελαφροσκυροδέματος σε αυτή την εφαρμογή οδήγησαν στην συνέχεια στην εκτεταμένη χρήση του για την κατασκευή κτηρίων και γεφυρών. Σημαντικές μελέτες για τις εφαρμογές του δομικού ελαφροσκυροδέματος, κυρίως με ορυκτής προέλευσης τεχνητά αδρανή, έχουν γίνει από χώρες της ΕΕ και από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα EuroLightCon (1998).

Η χρήση δομικού ΕΣ στην Ελλάδα δεν προβλέπεται από τον ΚΤΣ2016 ούτε από τον ΕΚΩΣ2000. Το παραγόμενο σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή (κίσηρη, διογκωμένη πολυστερίνη, διογκωμένος περλίτης) χρησιμοποιείται μόνο σε μη δομικές εφαρμογές (γεμίσματα δαπέδων, δημιουργία ρύσεων, θερμομόνωση-ηχομόνωση). Αντίθετα, στο ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο (Ευρωκώδικας-2, EN 206) προβλέπεται από το 2000 η χρήση ελαφροσκυροδέματος με κατηγορίες αντοχής που εκτείνονται από LC8/9 έως και LC80/88.

Σχετικά με την πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος και των ελαφροβαρών αδρανών, το πρότυπο EN 206 ορίζει ότι η ξηρή πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή από 800 έως 2000 kg/m³, τα δε αδρανή χαρακτηρίζονται ως ελαφροβαρή όταν η ξηρή πυκνότητα κόκκου είναι μικρότερη από 2000 kg/m³ ή όταν η ξηρή και χαλαρή πυκνότητα σωρού είναι μικρότερη από 1200 kg/m³.

Τα ευρωπαϊκά πρότυπα δεν ορίζουν περιοχή αντοχών για το δομικό ΕΣ, ενώ το ACI ορίζει ως ελάχιστη αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου τα 17 MPa. Σύμφωνα με τις τρέχουσες εφαρμογές στην Ελλάδα, θα μπορούσε η κατηγορία αντοχής LC20/22 να θεωρηθεί ως η ελάχιστη για το δομικό ΕΣ χωρίς φυσικά αυτό να αποτελεί προδιαγραφή.

Το δομικό ΕΣ χαρακτηριστικής αντοχής 25 MPa εμφανίζει το πλεονέκτημα της μειωμένης ξηρής πυκνότητας (~1500 kg/m³) σε συνδυασμό με την μειωμένη θερμική αγωγιμότητα ($\lambda \sim 0,6$ W/m/K). Με την χρήση δομικού ελαφροσκυροδέματος η μείωση της μάζας της κατασκευής διευρύνει το πλήθος των δομικών λύσεων (προσθήκες καθ' ύψος, εφαρμογές σε σεισμικό περιβάλλον, αλλαγή δομής οπλισμού) και συμβάλλει στην θερμομόνωση των κατασκευών.

Η ανάπτυξη των διαφόρων τύπων ελαφροσκυροδέματος με αδρανή ορυκτής προέλευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα τοπικά διαθέσιμα ελαφροβαρή αδρανή τα οποία μπορεί να είναι φυσικά (κίσηρη, βασαλτική σκωρία) ή τεχνητά (διογκωμένος περλίτης, διογκωμένη άργιλος). Τελευταία χρησιμοποιούνται τεχνητά ελαφροβαρή αδρανή με βάση την ιπτάμενη τέφρα.

Το φυσικό ελαφροβαρές αδρανές που βρίσκεται στην Ελλάδα είναι η κίσηρη, η οποία εξορύσσεται από την ΛΑΒΑ ΑΕ. Η κίσηρη είναι φυσικό ηφαιστειογενές υλικό για την διόγκωση του οποίου δεν απαιτείται θερμική ενέργεια σε αντίθεση με τα άλλα τεχνητά ελαφροβαρή αδρανή. Μεταξύ των άλλων εφαρμογών χρησιμοποιείται στην παραγωγή ελαφροβαρούς κισηροδέματος. Η ελληνική κίσηρη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή μεταξύ όλων των άλλων ελαφρών αδρανών ορυκτής προέλευσης με αντίστοιχη επίδραση στην αντοχή του κισηροδέματος.

Η Lafarge Γαλλίας χρησιμοποιεί την κίσηρη για την σύνθεση του θερμομονωτικού ελαφροσκυροδέματος

Thermedia©. Ανεξάρτητα, η Lafarge Beton στη Ελλάδα έχει αναπτύξει την τεχνογνωσία για την παραγωγή και διάθεση κισηροδέματος σε μη δομικές εφαρμογές (ελαφροβαρή γεμίσματα, θερμοηχομονωτικές εφαρμογές, δάπεδα από ΚΣ με επιφανειακή επεξεργασία).

Συστηματική μελέτη του δομικού κισηροδέματος στη Ελλάδα έχει γίνει μέχρι τώρα:

- A. Από το Τμ. Πολιτικών Μηχανικών του Παν. Πατρών, σε **ερευνητικό επίπεδο** σε θέματα σχεδιασμού σύνθεσης κισηροδέματος, συνάφειας κισηροδέματος με χάλυβα, μηχανικής στοιχείων οπλισμένου κισηροδέματος υπό κάμψη και διάτμηση και χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας και δοκιμών πεδίου (Paranicolaou et al, 1999, Paranicolaou et al, 2002, Καφφετζάκης, 2014)
- B. Από την ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ και το Εργ. Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ (716-BET-2013, Ζέρης κ.α.,2016, Μάνος, 2014, Μάνος κ.α.,2016) με το ερευνητικό εγχείρημα 716-BET-2013 “Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη” με σκοπό την **τεχνική τεκμηρίωση του δομικού κισηροδέματος** στην Ελλάδα και την εισαγωγή του στο **ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο**, με έμφαση στις εξής ενότητες εργασίας:
- Συνθέσεις δομικού κισηροδέματος, παραγωγή συνθέσεων σε μονάδα ετοιμού σκυροδέματος, σκυροδέτηση δομικών στοιχείων πραγματικού μεγέθους στο Εργ. Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ
 - Μετρήσεις χαρακτηρισμού κισηροδέματος και ινοπλισμένου κισηροδέματος σε καμπτική και αξονική καταπόνηση
 - Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς οπλισμένων διεπιφανειών από ΚΣ
 - Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς κοντών υποστυλωμάτων από περισφιγμένο ΚΣ
 - Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκών, υποστυλωμάτων από ΚΣ σε σεισμική καταπόνηση
 - Πειραματική διερεύνηση δοκών από προεντεταμένο ΚΣ υπό μακροχρόνια εγκάρσια φόρτιση λειτουργίας
 - Σχεδιασμός 5 όροφου κτηρίου από ΚΣ και σύγκριση με παρόμοιο κτίριο από ΣΚΠ

Η σημαντική συνεισφορά του εγχειρήματος 716-BET-2013 είναι η διεξοδική πειραματική και θεωρητική τεκμηρίωση ότι ο δομοστατικός σχεδιασμός δομημάτων από δομικό ΚΣ συμμορφώνεται με τους ευρωκώδικες EC2 (2004) και EC8 (2004). Σημειώνεται ότι σε δομήματα από δομικό ΚΣ, με ελαφρά σχετικά κινητά φορτία κατοικίας, η διαστασιολόγηση είναι σε μεγάλο βαθμό ένα πρόβλημα παραμορφώσεων και ελέγχων στην ΟΚΛ, με τον έλεγχο σε ΟΚΑ να μην αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα στην επιλογή των διατομών του φορέα, σε αντίθεση με το ΣΚΠ, όπου ο σχεδιασμός ελέγχεται πρωτίστως από την ΟΚΑ.

Η παρούσα δ.ε. έχει σαν σκοπό να συμβάλλει περαιτέρω στην διερεύνηση της βιομηχανικής παραγωγής και χρήσης του δομικού κισηροδέματος που παράγεται σε ορισμένες μονάδες της Lafarge Beton (Ομίλος Εταιρειών ΗΡΑΚΛΗΣ) και να επεκτείνει την δομοστατική αξιολόγηση του. Διαμορφώνεται σε δύο κύριες ενότητες, την **πειραματική** και την **υπολογιστική**:

- A. Η **Πειραματική Θεώρηση** αφορά στην **τεχνολογία του δομικού κισηροδέματος**. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον Όμιλο Εταιρειών ΗΡΑΚΛΗΣ (ΕΚΕΤ, Lafarge Beton) στο ερευνητικό εγχείρημα 716-BET-2013 και περιλαμβάνει:
- Εργαστηριακές συνθέσεις κισηροδέματος και εκτεταμένη θεώρηση της **πilotικής παραγωγής 11 συνθέσεων σε μονάδα ετοιμού σκυροδέματος** και της φόρτωσης/διατήρησης τους σε αυτοκίνητα αναδευτήρες. Από τις συνθέσεις αυτές οι τρεις μεταφέρθηκαν από την μονάδα παραγωγής σε απόσταση 23 km για να

σκυροδετηθούν τα δοκίμια πραγματικών διαστάσεων στο Εργ. Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ. Μεταξύ των δοκιμών περιλαμβάνονται και **2 προεντεταμένες δοκοί μήκους 7,5 m.**

- **Μετρήσεις χαρακτηρισμού**, ανθεκτικότητας και μη καταστρεπτικοί έλεγχοι
 - Σύνοψη αποτελεσμάτων και **εμπειρικοί συσχετισμοί**
 - Αναφορά στα **πρότυπα ACI 211.2-98 και ACI 213R-03**
- B. Η **Υπολογιστική Θεώρηση** αφορά στην δομοστατική σύγκριση μεταξύ πολυόροφων κτηρίων από ΣΚΠ και από ΚΣ με βάση τους ευρωκώδικες EC2 και EC8. Εστιάζει στην ανάλυση **πλαισίων ισογείου** σε κτήρια χρήσης κατοικίας 4, 8, 12, 16 και 20 ορόφων και περιλαμβάνει τις ενότητες:
- **Κανονιστικό πλαίσιο**, όπου γίνεται ανασκόπηση των κανόνων σχεδιασμού των EC2 και EC8 με δομικό ΕΣ
 - Τεκμηρίωση σχετικά με την **πυκνότητα**
 - Τον καθ' αυτό **σχεδιασμό των πλαισίων** με ύψος 3 m και με δύο ανοίγματα πλάτους 6 m το καθένα. Τα κτήρια επιλύονται με την χρήση του εμπορικού κώδικα CSI ETABS2016 και τα πλαίσια ελέγχονται και συγκρίνονται στην οριακή κατάσταση αστοχίας και στον σεισμικό συνδυασμό σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες EC2 και EC8 (μέγιστη ροπή, μέγιστη τέμνουσα, συχνотική ανάλυση)
 - **Σχολιασμός** των υπολογιστικών ευρημάτων

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

1. Εργαστηριακές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη

1.1. Διερευνητικές συνθέσεις σκυροδέματος

Αντικείμενο αρχικά του προγράμματος, ήταν η διερεύνηση των μεταβλητών που επιδρούν στα τεχνικά χαρακτηριστικά του νωπού και σκληρυμένου ΚΣ. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν τα βασικά κριτήρια επιλογής της σύνθεσης του ΚΣ (και του σκυροδέματος) σε κάθε εφαρμογή.

Με στόχο κατηγορίες αντοχής στην περιοχή LC20/22 έως και LC30/33 υλοποιήθηκαν εργαστηριακές συνθέσεις ΚΣ με τις παρακάτω μεταβλητές:

- Τύπος τσιμέντου και περιεκτικότητα ΚΣ σε τσιμέντο
- Κοκκομετρικά κλάσματα κίσηρης και περιεκτικότητα ΚΣ σε μίγματα κοκκομετρικών κλασμάτων
- Περιεκτικότητα σε ασβεστολιθικά θραυστά αδρανή (κοκκομετρίας γαρμιλίου και άμμου).
- Τύπος ρευστοποιητή και περιεκτικότητα ΚΣ σε ρευστοποιητή
- Επιπλέον έγιναν πειράματα με χρήση ενός είδους μεταλλικών ινών μήκους 3 cm.

Το αποτέλεσμα των εργαστηριακών συνθέσεων ήταν ποσότητες νωπού ΚΣ και δοκίμια σκληρυμένου ΚΣ (κυβικά, πρισματικά, κυλινδρικά) στα οποία μετρήθηκαν ιδιότητες που αφορούν στα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως εργασιμότητα, θλιπτική αντοχή και καμπτική αντοχή καθώς και φαινόμενη πυκνότητα. Πρόσθετα δοκίμια παρασκευάστηκαν για τις ανάγκες της ΕΕ 2.

Όλες οι εργαστηριακές συνθέσεις και οι μετρήσεις των ιδιοτήτων τους πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΕΚΕΤ της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ.

Πίνακας 1.1: Προκαταρκτικές συνθέσεις ΚΣ που ελέγχθησαν

Αριθμός σύνθεσης			1	2	3	4
Αριθμός αναμίγματος ΕΚΕΤ			6117	6118	6119	6125
Τύπος τσιμέντου			CEM I 52.5N	CEM I 52.5N	CEM I 52.5N	CEM II 42.5N
Κωδικός ΕΚΕΤ τσιμέντου			36270	36270	36270	36390
Εργ. Παραγωγής			LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ
Πόσότητα τσιμέντου		kg/m ³	443	409	424	421
Ποσότητα ελαφρόπετρας 0 - 8 mm επί ξηρής βάσης	36371	kg/m ³	683	788	817	811
Ποσότητα ελαφρόπετρας 2 - 10 mm επί ξηρής βάσης	36370	kg/m ³				
Ποσότητα ελαφρόπετρας 0 - 16 mm επί ξηρής βάσης	36369	kg/m ³				
Θραυστό γαρμπίλι (ξηρό)	35916	kg/m ³				

Ποσότητα νερού λόγω της υγρασίας των αδρανών		kg/m ³	203	234	243	241
Προσθήκη νερού		kg/m ³	282	173	169	165
Τύπος χημικού προσμίκτη		-	GLEMIUM SKY 645	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900
Ποσότητα χημικού προσμίκτη		kg/m ³	5.0	4.6	4.7	4.7
Υγρασία κίσηρης 0 - 8 mm επί υγρού		%	22.9	22.9	22.9	22.9
Υγρασία κίσηρης 2 - 10 mm επί υγρού		%				
Υγρασία κίσηρης 0 - 16 mm επί υγρού		%				
Φαινόμενη πυκνότητα 28 ημερών (νωπών δοκιμών) – υπολογιζόμενη		kg/m ³	1616	1609	1658	1642
Περιεκτικότητα αέρα		%	7.0	11.4	9.2	9.7
Εξάπλωση		cm		55	55	55
Θλιπτικές αντοχές 7 ημερών		MPa		21.8	24.0	22.2
Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών		MPa		30.2	31.8	27.0
Φαινόμενη πυκνότητα 28 ημερών (νωπών δοκιμών) – μετρούμενη		kg/m ³		1621	1638	1627
Σχόλια			Μερική απόμιξη	Πολύ καλή συμπεριφορά	Προσθήκη υλικών σύμφωνα με την παρακάτω σειρά: (α) Τσιμέντο, (β) νερό, (γ) υπερευστοποιητής και (δ) ελαφρόπετρα	Πολύ καλή συμπεριφορά

Πίνακας 1.2: Προκαταρκτικές συνθέσεις ΚΣ που ελέγχθησαν

Αριθμός σύνθεσης			5	6	7	8	9
Αριθμός αναμίγματος ΕΚΕΤ			6126	6127	6137	6138	6139
Τύπος τσιμέντου			CEM II 42.5N	CEM II 42.5N	CEM II 42.5N	CEM II 42.5N	CEM II 42.5N
Κωδικός ΕΚΕΤ τσιμέντου			36390	36390	36390	36390	36390
Εργ. Παραγωγής			LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ	LAFARGE ΒΟΛΟΣ
Ποσότητα τσιμέντου		kg/m ³	354.4	409	373	376	373
Ποσότητα ελαφρόπετρας 0 - 8 mm επί ξηρής βάσης	36371	kg/m ³		394	811	862	811
Ποσότητα ελαφρόπετρας 2 - 10 mm επί ξηρής βάσης	36370	kg/m ³	674.3				
Ποσότητα ελαφρόπετρας 0 - 16 mm επί ξηρής βάσης	36369	kg/m ³		389			
Θραυστό γαρμπίλι (ξηρό)	35916	kg/m ³			62		62
Ποσότητα νερού λόγω της υγρασίας των αδρανών		kg/m ³		239	241	256	241
Προσθήκη νερού		kg/m ³	211.8	160	131	131	131
Τύπος χημικού προσμίκτη		-	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900
Ποσότητα χημικού προσμίκτη		kg/m ³	4.0	4.6	6.0	5.8	6.0
Υγρασία κίσηρης 0 - 8 mm επί υγρού		%		22.9	23.9	23.9	23.9
Υγρασία κίσηρης 2 - 10 mm επί υγρού		%	23.9				
Υγρασία κίσηρης 0 - 16 mm επί υγρού		%		23.9			
Φαινόμενη πυκνότητα 28 ημερών (νωπών δοκιμών) – υπολογιζόμενη		kg/m ³	1384	1595	1624	1631	1624
Περιεκτικότητα αέρα		%	23.4	12.0	12.6	11.1	12.6
Εξάπλωση		cm	41	51			
Θλιπτικές αντοχές		MPa	10.4	21.3	21.6	21.6	21.6

7 ημερών							
Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών		MPa	16.0	27.3	29.8	29.0	29.8
Φαινόμενη πυκνότητα 28 ημερών (νωπών δοκιμίων) – μετρούμενη		kg/m ³	1412	1610	1666	1631	1666
Σχόλια			Διαχωρισμός της πάστας του τσιμέντου από τα ασδρανή	Εξίδρωση			

Όπως φαίνεται στις δοκιμές των πινάκων 1.1 και 1.2, η ποσότητα του τσιμέντου στις παραπάνω συνθέσεις μεταβλήθηκε από περίπου 350 έως 440 Kg/m³. Η περιοχή τιμών που επιλέχθηκε βασίστηκε τόσο σε αντίστοιχες εργασίες που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία όσο και στην βιομηχανική εμπειρία που έχει αποκτηθεί από την παραγωγή μη δομικού ΚΣ πληρώσεων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι όλα τα αναμίγματα παράχθηκαν σε εργαστηριακό αναμικτήρα (βλ. Φωτογραφία 1.3) ωφέλιμου όγκου 30 L.

Η συντήρηση των δοκιμίων έγινε σε υγρό θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας (20 deg C) και υγρασίας (σχετική υγρασία άνω του 95%).

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων θλιπτικών αντοχών 28 ημερών των συνθέσεων (1)-(9) γίνεται σαφές ότι η χρήση του τύπου τσιμέντου CEM I 52.5N δεν προσδίδει σημαντικά διαφοροποιημένες θλιπτικές αντοχές 28 ημερών στα εργαστηριακά ΚΣ που εξετάστηκαν.

Πιο συγκεκριμένα με χρήση τύπου τσιμέντου CEM I 52.5N η μέγιστη θλιπτική αντοχή 28 ημερών δεν ξεπερνά τα 32MPa (συνθέσεις #1-2) ενώ η αντίστοιχη αντοχή με χρήση τσιμέντου τύπου CEM II/B 42.5N είναι περί τα 30MPa (σύνθεση #8).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς επίσης και το παράγοντα της οικονομικότητας της σύνθεσης δεδομένου της διαφοράς της τιμής αγοράς των δύο παραπάνω τύπων τσιμέντου, επικεντρωθήκαμε στην ανάπτυξη και περαιτέρω έλεγχο ΚΣ με χρήση τσιμέντου τύπου CEM II/B-M (P-W-L) 42.5N.

Επιπλέον από την σύγκριση των παραπάνω συνθέσεων φαίνεται ότι η χρήση ελαφρόπετρας (κίσηρης) κοκκομετρίας 0-8mm δίνει βέλτιστα αποτελέσματα δεδομένου ότι τα εργαστηριακά αναμίγματα που ελέγχθηκαν ήταν αρκετά συνεκτικά με πολύ καλή αρχική εργασιμότητα και διατήρηση αυτής.

Η χρήση ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 2-10 mm (σύνθεση #5) λόγω της απουσίας λεπτών σωματιδίων οδηγεί σε αναμίγματα στα οποία παρατηρείται στο διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την σκλήρυνση του ΚΣ, διαχωρισμός της πάστας του τσιμέντου από τους κόκκους των αδρανών που οδηγεί σε σημαντικά μικρότερες θλιπτικές αντοχές.

Τέλος η χρήση κίσηρης κοκκομετρίας 0-16mm (σύνθεση #6) αντί της 0-8mm δεν οδηγεί σε βελτιωμένα αποτελέσματα (βλ. συνθέσεις #6 & 7-8).

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι υπερεστοποιητών ίδιας τεχνολογίας της εταιρείας SIKA με εμπορική ονομασία MKC900 και της εταιρείας BASF με την εμπορική ονομασία GLENIUM SKY 645. Τα αποτελέσματα αυτών στην εργασιμότητα και διατήρηση εργασιμότητας των ήταν απολύτως συγκρίσιμα. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το χημικό πρόσμικτο της εταιρείας SIKA δεδομένου ότι αυτό ήταν διαθέσιμο στις μονάδες RMx όπου θα παραγόντουσαν ποσότητες ΚΣ σε βιομηχανική κλίμακα.

Τα δύο παραπάνω χημικά πρόσμικτα ανήκουν στην κατηγορία των υπερεστοποιητών συμφ. με το πρότυπο EN 934-2 T.3.1 & T.3.2 (High range water reducing – Superplasticizing admixture) and T.11.1 & T.11.2 (Set retarding / high range water reducing / superplasticizing admixture)

Η χρήση μικρής ποσότητας θραυστού γαρμπιλιού (περί τα 60 Kg/m³) δεν διαφοροποιεί τις τελικές αντοχές των αντιστοίχων ΚΣ (29.8 MPa έναντι 29.0 MPa) παρόλη την πολύ μικρή αύξηση θλιπτικών αντοχών που παρατηρείται η οποία όμως ενδεχομένως να οφείλεται σε εργαστηριακό “θόρυβο”.

Μεταξύ όλων των παραπάνω συνθέσεων, αυτή που κρίθηκε ως η περισσότερο ικανοποιητική είναι η σύνθεση #8 που συνδυάζει χρήση τσιμέντου τύπου CEM II 42.5N σε δοσολογία 375 Kg/m³, χρήση ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 0-8mm (η οποία είναι διαθέσιμη εμπορικά) που δίνει τελικές αντοχές 28 ημερών περί τα 29 MPa και φαινόμενο βάρος περί τα 1650 Kg/m³.

Εν συνέχεια και έχοντας ως βάση τη σύνθεση #8, προχωρήσαμε σε περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων των αδρανών της σύνθεσης (με χρήση ασβεστολιθικής θραυστής άμμου ή/και γαρμπιλιού) καθώς επίσης και μεταλλικών ινών. Επιπλέον για λόγους σύγκρισης, διενεργήθηκε μια επιπλέον σύνθεση με χρήση μόνο θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών (άμμος και γαρμπίλι) η οποία χρησιμοποιήθηκε ως σύνθεση αναφοράς. Λεπτομερής πίνακας των επιπλέον συνθέσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



Φωτογραφία 1.1: Είδος των μεταλλικών ινών που χρησιμοποιήθηκαν

1.2. Τελικές συνθέσεις κισηροδέματος

Πίνακας 1.3: Τελικές συνθέσεις ΚΣ που ελέγχθηκαν

Αριθμός σύνθεσης			10	11	12	13	14
Τύπος τσιμέντου			CEM II 42.5N	CEM II 42.5N	CEM II 42.5N	CEM II 42.5N	CEM II 42.5N
Κωδικός ΕΚΕΤ τσιμέντου			37777	37777	37777	37777	37777
Εργ. Παραγωγής			LAFARGE ΒΟΛΟΣ				
Ποσότητα τσιμέντου		kg/m ³	375	375	375	375	375
Ποσότητα ελαφρόπετρας 0 - 8 mm επί ξηρής βάσης	39061	kg/m ³	1032		943	937.0	1032
Θραυστό άμμος (ξηρό)	35917	kg/m ³		1062	483		
Θραυστό γαρμπίλι (ξηρό)	35916	kg/m ³		713		363	
Μεταλλικές ίνες (μήκους 3 cm)		kg/m ³					70
Προσθήκη νερού		kg/m ³	159	157	158	157	159
Τύπος χημικού προσμίκτου		-	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900	SIKA MKC 900
Ποσότητα χημικού προσμίκτου		kg/m ³	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
Υγρασία κίσηρης 0 - 8 mm επί υγρού		%	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6
Φαινόμενη πυκνότητα 28 ημερών (νωπών δοκιμίων) – υπολογιζόμενη		kg/m ³					
Περιεκτικότητα αέρα		%	7.0	3.3	5.2	3.3	5.1
Αρχική κάθιση		cm	22.5	21.0	21.0	20.0	21.0
Θλιπτικές αντοχές 7 ημερών		MPa	29.4	53.5	33.0	26.0	21.4
Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών		MPa	38.9	64.2	38.1	35.1	30.8
Θλιπτικές αντοχές 90 ημερών			44.7	67.9	45.3	42.3	32.7
Θλιπτικές αντοχές 180 ημερών			48.8	76.4	44.4	43.5	41.0
Φαινόμενη πυκνότητα 28 ημερών (νωπών δοκιμίων) – μετρούμενη		kg/m ³	1642	2363	1802	1815	1735

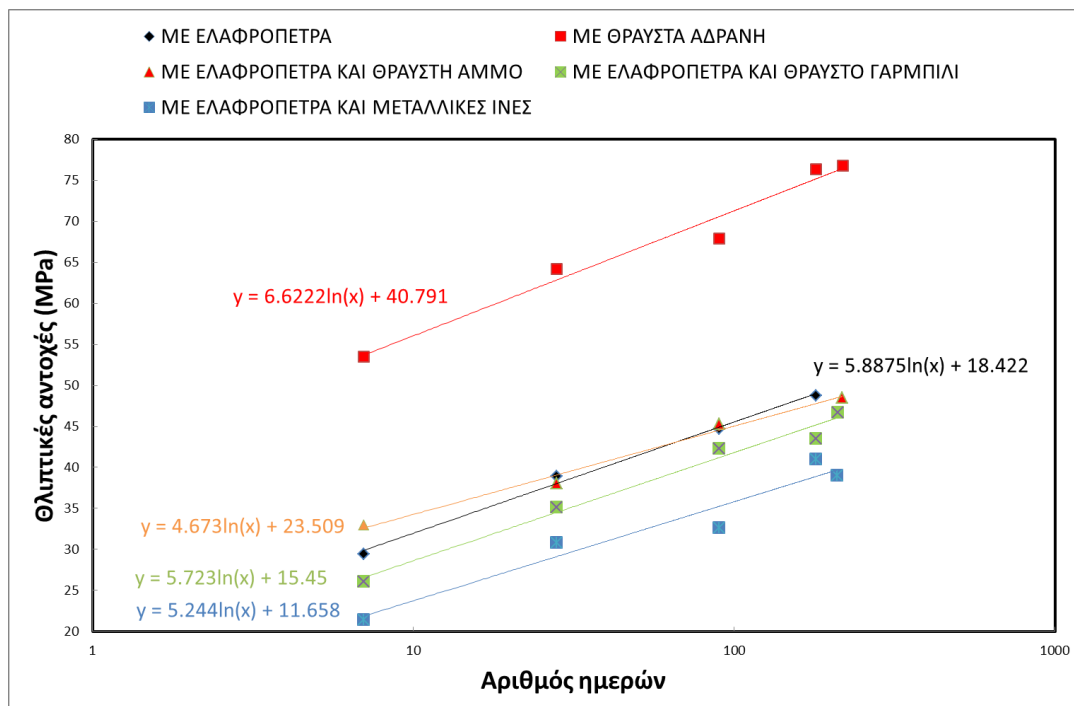
Καμπτικές αντοχές 7 ημερών	MPa	4.2	7.4	4.6	4.1	4.1
Καμπτικές αντοχές 28 ημερών	MPa	5.4	8.7	5.4	4.8	4.4

Για κάθε μια από τις συνθέσεις #10 έως #14 παρασκευάστηκαν δοκίμια πρισματικά, κυλινδρικά και κυβικά για την διενέργεια διαφόρων δοκιμών ανθεκτικότητας συνολικού όγκου περί τα 215 L ανά σύνθεση.

1.3. Μηχανικές ιδιότητες και δοκιμές ανθεκτικότητας

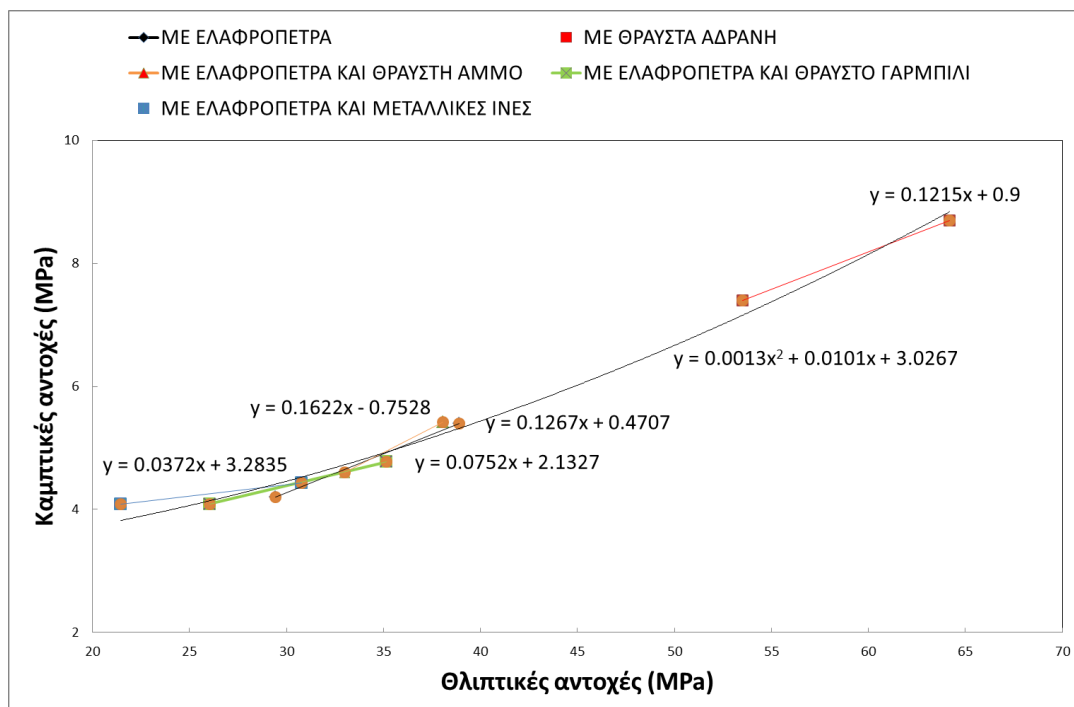
Πίνακας 1.4: Μηχανικές δοκιμές και δοκιμές ανθεκτικότητας που ελέγχθηκαν

Τύπος δοκιμής	Τύπος και μέγεθος δοκιμίων	Αριθμός απαιτούμενων δοκιμών ανά δοκιμή	Ηλικίες εξέτασης (ημέρες)	Περιβάλλον συντήρησης		Απαιτούμενος όγκος κισηροδέματος (L)
				Έκθεση στο περιβάλλον του εργαστηρίου	Έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον	
Θλιπτικές αντοχές	ΚΥΒ (15x15x15)	2 δοκίμια ανά ηλικία	3, 7, 28, 90, 180, 360	12		41
Καμπτικές αντοχές	ΠΡΙΣΜ (15x15x60)	2 δοκίμια ανά ηλικία	3, 28	4		54
Συρρίκνωση	ΠΡΙΣΜ (10x10x28.5)	2 δοκίμια	28, 56, 90-360/30	4	4	23
Ενανθράκωση με έκθεση στο περιβάλλον	ΠΡΙΣΜ (10x10x20)	2 δοκίμια ανά ηλικία	42, 56, 90, 180, 360		10	20
Επιταχυνόμενη ενανθράκωση	ΠΡΙΣΜ (10x10x20)	2 δοκίμια ανά ηλικία		10		20
Επιταχυνόμενη διάχυση χλωριόντων	ΚΥΛ (Φ10x20)	2 δοκίμια	56, 180	2	2	6
Προσδιορισμός πορώδους	ΚΥΒ (15x15x15)	2 δοκίμια	56, 90, 180, 360	2	2	14
Μέτρηση υδατοπερατότητας	ΚΥΒ (15x15x15)	4 δοκίμια	28, 180	4		14
Ψύξη - απόψυξη	ΠΡΙΣΜ (10x10x40)	4 δοκίμια	7, 14, 28, 42, 56 cycles	4		16
Κρουσιμέτρηση	ΚΥΒ (15x15x15)		28, 90, 180, 360	10		
Ταχύτητα υπερήχων	ΠΡΙΣΜ (10x10x20)	2 δοκίμια	90, 180, 360	2	2	
Ηλεκτροχημικό δυναμικό	ΠΡΙΣΜ (10x10x20)	2 δοκίμια	28, 56, 90-360/30	2	2	8
Σύνολο						215



Σχήμα 1.1: Μεταβολή των θλιπτικών αντοχών συναρτήσει του χρόνου συντήρησης των δοκιμίων

Στο παραπάνω σχήμα αποτυπώνεται η αύξηση των θλιπτικών αντοχών συναρτήσει του χρόνου συντήρησης των δοκιμίων. Δεδομένου ότι ίδια ποσότητα και ίδιος τύπος τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις παραπάνω συνθέσεις, οι κλίσεις των ευθειών που προκύπτουν δεν διαφοροποιούνται σημαντικά (κυμαίνονται μεταξύ 4.7 έως 6.6). Παρόλα αυτά, το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν διαφοροποιούν σημαντικά τον σταθερό όρο της γραμμικής συσχέτισης με σημαντικά αυξημένο εκείνο που αντιστοιχεί στην περίπτωση χρήσης μόνο ασβεστολιθικών θραυστών αδρανών.



Σχήμα 1.2: Μεταβολή των καμπτικών συναρτήσει των θλιπτικών αντοχών

1.4. Αποτελέσματα φυσικομηχανικών δοκιμών δειγμάτων τσιμέντου και ελαφρόπετρας

Πίνακας 1.5: Αποτελέσματα φυσικομηχανικών δοκιμών δειγμάτων τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις κισηροδεμάτων.

Κωδ. ΕΚΕΤ	39821	37777
Τύπος τσιμέντου	CEM II/B-M (P-W-L) 42.5N	CEM II/B-M (P-W-L) 42.5N
Εργ. παραγωγής	LAFARGE/ Βόλος	LAFARGE/ Βόλος
Ειδικό βάρος (g/cm ³)	2.95	2.87
Blaine (cm ² /g)	4552	4618
Νερό κανονικής συνεκτικότητας (%)	-	32.2
Αρχή χρόνου πήξης (min)	-	195
Τέλος χρόνου πήξης (min)	-	242
Le Chatellier expansion (mm)	-	0.8
Εξάπλωση (%)	84	75
Καμπτική αντοχή – 2ημ. (MPa)	5.4	4.7
Καμπτική αντοχή – 7ημ. (MPa)	7.2	7.1
Καμπτική αντοχή – 28ημ. (MPa)	8.0	7.9
Θλιπτική αντοχή – 2ημ. (MPa)	30.1	27.0
Θλιπτική αντοχή – 7ημ. (MPa)	42.4	39.7
Θλιπτική αντοχή – 28ημ. (MPa)	53.0	51.9

Η ελαφρόπετρα είναι ορυκτό ποζολανικό υλικό που εξορύσσεται στο νησί Γυαλί (Δωδεκανήσου). Τυπικά χαρακτηριστικά του αναφέρονται στους παρακάτω πίνακες.



Φωτογραφία 1.2: Τυπικό δείγμα ελαφρόπετρας 2-10mm

Πίνακας 1.6: Αποτελέσματα κοκκομετρίας ελαφρόπετρας 0-8mm συμφ. με το πρότυπο EN 933-1

Κωδικός ΕΚΕΤ	39061
Κόσκινα	% Πέρασμα
31.5 mm	100,0
16 mm	100.0
8 mm	99.4
4 mm	80.2
2 mm	56.9
1 mm	40.4
250 μm	22.8
75 μm	15.0

Πίνακας 1.7: Τυπικά χημικά και φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά δειγμάτων ελαφρόπετρας

Ιδιότητα	Μονάδες	Μέθοδος	Τυπική περιοχή τιμών		Προδιαγραφή
Υγρασία	%	EN 1075-11	16	27	≤ 3,0 % ASTM C 618 class N
Χημική ανάλυση επί ξηρού					
Απώλεια πύρωσης	%	EN 196-2	4,8	6,8	≤ 10,0 % ASTM C 618 class N
SiO ₂	%	ISO 29581-2	69	73	
Al ₂ O ₃	%		11	12	
Fe ₂ O ₃	%		1,0	2,0	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	%		82	87	≥ 70,0 % ASTM C 618 class N
CaO	%		0,7	2,9	
MgO	%		0,3	1,1	
K ₂ O	%		3,5	4,5	
Na ₂ O	%		3,0	4,2	
SO ₃	%	EN 1744-1	0,003	0,1	≤ 4,0 % ASTM C 618 class N
Δραστικό SiO ₂	%	EN 196-2	47	66	≥ 25,0 % EN 197-1 §5.2.3
Απόλυτη πυκνότητα	g/cm ³	ASTM C 188	2,27	2,33	Μεταβολή περί της μέσης τιμής ≤ 5 % ASTM C 618 class N
Δραστικότητα					
7 ημερών	%	Σύμφ. με ASTM C 311 Παρασκευή, διατήρηση και θραύση συμφ. με EN 196-1	77	82	≥ 75 % ASTM C 618 class N
28 ημερών	%		79	89	
90 ημερών	%		87	100	

Πίνακας 1.8: Αποτελέσματα φαινόμενου βάρους σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C29

Υγρασία (%)	4,5	0,0
	ΦΕΒ, kg/m ³	
Χαλαρό	835	798
Στοιβαχτό	1035	988
Ραβδιστό	944	901

Ο συντελεστής Bond δειγμάτων κίσηρης κυμαίνεται μεταξύ 11,3 και 11,8 kWh/short ton. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο αντίστοιχος δείκτης Bond του ασβεστόλιθου (που αποτελεί το κατεξοχήν ευάλεστο υλικό στη βιομηχανική παραγωγή κλίνκερ, τσιμέντου) είναι περί του 11.5 kWh/short ton ενώ του κλίνκερ περί τα 16 kWh/short ton (το οποίο συγκαταλέγεται στα πλέον δυσάλεστα υλικά της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου).

Πίνακας 1.9: Αποτελέσματα μετρήσεων μπλε του μεθυλενίου σε δείγμα ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 0-8 mm

Κλάσμα	g/kg
<2 mm	0,85
<0,125 mm	1,38

Πίνακας 1.10: Αποτελέσματα μετρήσεων μπλε του μεθυλενίου σε δείγμα ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 2-10 mm

Κλάσμα	g/kg
<2 mm	2,16
<0,125 mm	2,57

Οι παραπάνω τιμές μπλε του μεθυλενίου εμφανίζονται υψηλές σε σχέση με εκείνες της άμμου του σκυροδέματος για την οποία θεωρούνται αποδεκτές τιμές μικρότερες από 1 g/kg. Όμως στην άμμο, η τιμή του μπλε του μεθυλενίου εκφράζει το ποσοστό των (επιβλαβών) αργιλικών προσμίξεων, οι οποίες προσροφούν το μπλε του μεθυλενίου. Αντίθετα, στην κίσηρη δεν περιέχονται αργιλικές προσμίξεις αλλά οι υψηλές τιμές οφείλονται στην προσρόφηση του μπλε του μεθυλενίου στους πόρους της κίσηρης.

Πίνακας 1.11: Αποτελέσματα ειδικού βάρους και υδαταπορρόφησης δείγματος ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 0-8 mm

Κλάσμα di/Di		Mm	4-8		
Ποσοστό κλάσματος 4-8 mm στο δείγμα 0-8 mm		%	28,0		
			1	2	M.O.
Φαινόμενο ειδικό βάρος	ρ_a	Mg/m ³	1,59	1,53	1,56
Φαινόμενο ειδικό βάρος ξηρού υλικού	ρ_{rd}	Mg/m ³	1,20	1,17	1,19
Φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού υλικού	ρ_{ssd}	Mg/m ³	1,44	1,40	1,42
Υδαταπορρόφηση μετά από βύθιση 24 ωρών επί ξηρού	WA ₂₄	%	20,8	20,2	20,5
Υδαταπορρόφηση μετά από βύθιση 24 ωρών επί υγρού, $WA_{24} * 100 / (100 + WA_{24})$		%			17,0

Πίνακας 1.12: Αποτελέσματα ειδικού βάρους και υδαταπορρόφησης δείγματος ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 2-10 mm

Κλάσμα di/Di		Mm	4-10		
Ποσοστό κλάσματος 4-8 mm στο δείγμα 0-8 mm		%	83,9		
			1	2	M.O.
Φαινόμενο ειδικό βάρος	ρ_a	Mg/m ³	1,91	1,88	1,90
Φαινόμενο ειδικό βάρος ξηρού υλικού	ρ_{rd}	Mg/m ³	1,14	1,15	1,15
Φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού υλικού	ρ_{ssd}	Mg/m ³	1,54	1,54	1,54
Υδαταπορρόφηση μετά από βύθιση 24 ωρών επί ξηρού	WA ₂₄	%	35,7	34,0	34,9
Υδαταπορρόφηση μετά από βύθιση 24 ωρών επί υγρού, $WA_{24} * 100 / (100 + WA_{24})$		%			25,9

Πίνακας 1.13: Αντοχή σε θραύση δείγματος ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 2-10 mm

			1	2	3	M.O.
Δύναμη που ασκήθηκε στο έμβολο	L	N	93,6	93,6	93,6	
Δύναμη συμπίεσης	F	N	41600	56000	49200	
Επιφάνεια εμβόλου	A	mm ²	10029	10029	10029	
Αντοχή σε θραύση	C _a	N/mm ²	4,2	5,6	4,9	4,9

Πίνακας 1.14: Αντοχή σε ψύξη απόψυξη δείγματος ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 2-10 mm

Κλάσμα di/Di		mm	4-10			
Ποσοστό κλάσματος 4-10 mm στο δείγμα 2-10 mm		%	83,9			
Μέγεθος κοσκίνου		mm	2			
			1	2	3	mean
Αρχική μάζα δείγματος	M ₁	g	288,5	310,7	315,7	
Τελική μάζα δείγματος μετά τους κύκλους ψύξης απόψυξης και κοσκίνιση	M ₂	g	272,5	293,0	310,0	
% απώλεια	F	%	5,5	5,7	1,8	4,3



Φωτογραφία 1.3: Εργαστηριακές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή και τον έλεγχο θλιπτικών και καμπτικών αντοχών των συνθέσεων ΚΣ.

2. Μετρήσεις χαρακτηρισμού, ανθεκτικότητας και μη καταστρεπτικοί έλεγχοι

2.1. Συμπληρωματικές ιδιότητες δομικού κισηροδέματος

Στην ενότητα αυτή σχολιάζονται συγκριτικές δοκιμές σε συνολικά 5 συνθέσεις με και χωρίς τη χρήση κίσηρης που συνοψίζονται στις παρακάτω: (1) σύνθεση με χρήση μόνο κίσηρης (κοκκομετρίας 0-8mm), (2) σύνθεση με χρήση κίσηρης και θραυστής άμμου (κοκκομετρίας 0-4mm), (3) σύνθεση με χρήση κίσηρης και θραυστού αδρανούς κοκκομετρίας γαρμπιλιού (4-16 mm), (4) σύνθεση με κίσηρη και μεταλλικές ίνες και (5) σύνθεση με χρήση μόνο συμβατικών θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών άμμου και γαρμπιλιού.

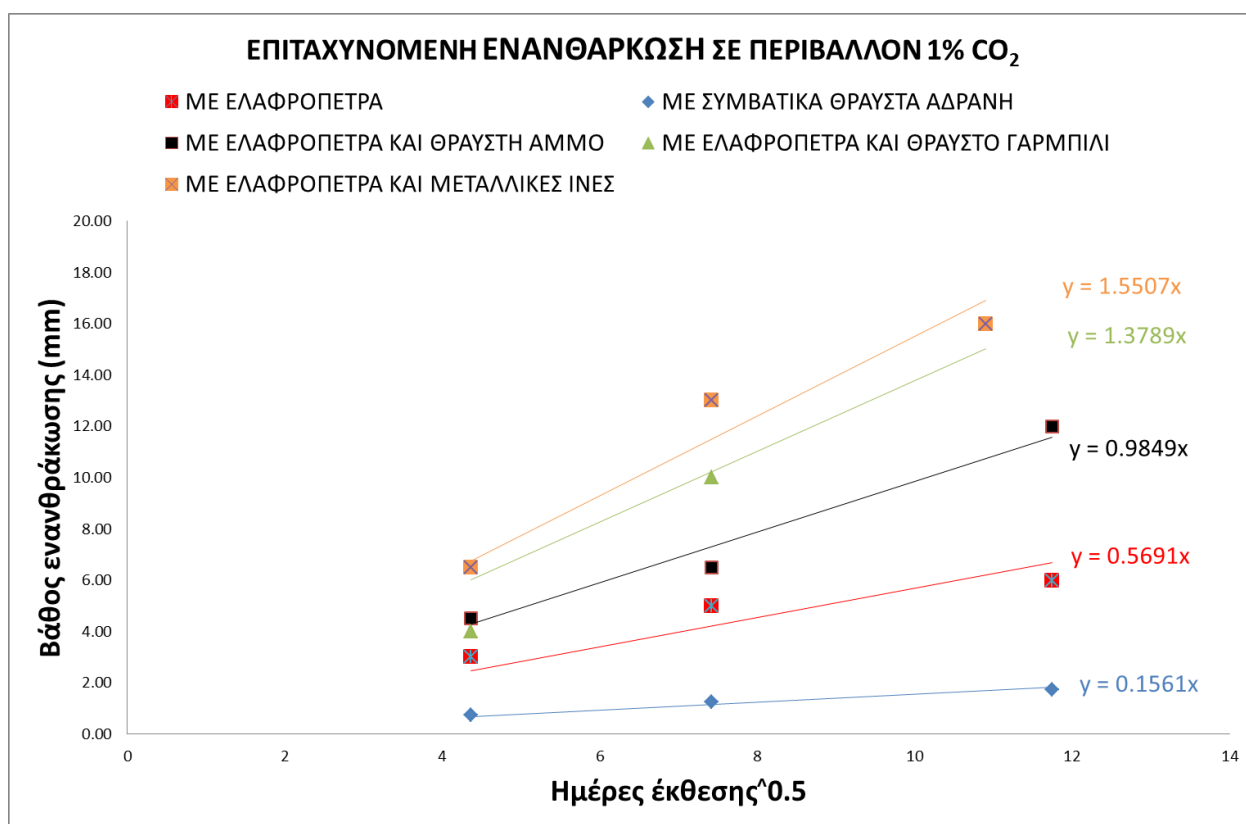
Τα βασικά συμπεράσματα των παραπάνω δοκιμών συνοψίζονται παρακάτω.

- Είναι δυνατή η παραγωγή δομικού ΚΣ με πλήρη αντικατάσταση των συμβατικών θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών. Οι εργαστηριακά μετρούμενες θλιπτικές αντοχές είναι άνω των 30 MPa.
- Η πλήρης υποκατάσταση των συμβατικών αδρανών με κίσηρη οδηγεί σε σημαντική μείωση του φαινόμενου βάρους (έως -30%) του ΚΣ συγκριτικά με το ΣΚΠ ή/και το γαρμπιλόδεμα και η χρήση του μπορεί να οδηγήσει σε κατασκευές με σημαντικά μειωμένο φορτίο λόγω ιδίου βάρους.
- Η πλήρης υποκατάσταση των συμβατικών αδρανών με κίσηρη οδηγεί σε σημαντική μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (έως 60%) του ΚΣ και συνεπώς σε κατασκευές με σημαντικά μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με αυτές από ΣΚΠ.
- Το παραγόμενο ΚΣ εμφανίζει χαμηλή αντίσταση στην δοκιμή της υδατοπερατότητας και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο υδατοστεγάνωσης παρά μόνο εφόσον παρθούεν περαιτέρω μέτρα προστασίας.
- Το δομικό ΚΣ εμφανίζει άριστη αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων και συνεπώς φαίνεται ότι καταρχήν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές πλησίον παραθαλάσσιων περιοχών.
- Βάσει των αποτελεσμάτων των πειραμάτων φυσικής και επιταχυνόμενης ενανθράκωσης υπολογίστηκε ότι απαιτούνται περί τα 40 έτη (σε συνθήκες περιβάλλοντος) για την ενανθράκωση ΚΣ σε βάθος 15 mm. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται απολύτως ικανοποιητικό συγκρινόμενο με τα αντίστοιχα έτη που απαιτούνται για την ενανθράκωση ΣΚΠ κατηγορίας αντοχής 25 MPa που αναφέρονται στην βιβλιογραφία δεδομένου ότι το παραπάνω ΣΚΠ είναι αυτό που χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των έργων.
- Έγιναν μετρήσεις ηλεκτροχημικού δυναμικού σε δοκίμια ΚΣ με οπλισμό. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την αποτελεσματική προστασία του οπλισμού λόγω διάβρωσης από το ΚΣ τόσο σε συνθήκες έκθεσης αυτών στο περιβάλλον εργαστηρίου όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον.
- Δοκίμια ΚΣ υποβλήθηκαν σε διαδοχικούς κύκλους ψύξης-απόψυξης. Κατά την διάρκεια των κύκλων αυτών έγιναν μετρήσεις μεταβολής βάρους καθώς και μετρήσεις ταχύτητας υπερήχων. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα οι διαδοχικοί κύκλοι ψύξης απόψυξης προκαλούν απώλεια βάρους έως και 0.8% της αρχικής μάζας (μετά από περίπου 28 κύκλους) παρόλα αυτά οι μετρήσεις υπερήχων δεν υποδεικνύουν καμία μεταβολή στην μάζα του. Η μερική υποκατάσταση κίσηρης με ασβεστολιθικά θραυστά αδρανή (είτε κοκκομετρίας άμμου ή γαρμπιλιού) βελτιώνουν περαιτέρω των παραπάνω συμπεριφορά.
- Έγιναν μετρήσεις μεταβολής μήκους και προσδιορισμού πορώδους σε δοκίμια ΚΣ με έκθεση στο περιβάλλον εργαστηρίου και στο εξωτερικό περιβάλλον τα αποτελέσματα των οποίων έχουν αναφερθεί παραπάνω.
- Τέλος, διενεργήθηκαν κρουσιμετρήσεις σε δοκίμια ΚΣ σε διαφορετικές ηλικίες.

Οι σύγχρονες απαιτήσεις για το ΚΣ (και γενικότερα για το σκυρόδεμα) αφορούν σε ιδιότητες σχετικές με την επιτελεστικότητα του υλικού κατά την σκυροδέτηση και την μακροχρόνια χρήση όπως ξηρά συρρίκνωση, θερμική αγωγιμότητα, ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση και σε παραθαλάσσιο περιβάλλον. Στα πλαίσια του παρόντος έργου θεωρείται πρωτότυπη η μελέτη της ανθεκτικότητας σε φυσικές και επιταχυνόμενες συνθήκες (ενανθράκωση, διάχυση χλωριόντων) και η διερεύνηση εφαρμογής μη καταστρεπτικών ελέγχων στο δομικό ΚΣ (κρουσιμέτρηση, ταχύτητα υπερήχων, ηλεκτροχημικό δυναμικό διάβρωσης) που θα αποτελέσουν βάση δεδομένων για την μακροχρόνια παρακολούθησή του σε κατασκευές. Ομοίως στην ενότητα αυτή μελετάται η φυσικοχημεία και μικροδομή ορισμένων συνθέσεων δομικού ΚΣ.

Τα δοκίμια για τις παραπάνω δοκιμές παρασκευάστηκαν από επιλεγμένες συνθέσεις του Πίνακα 1.3. Οι μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό πιστοποιημένο κατά ISO 17025 εργαστήριο (ΚΑΠΕ), ενώ όλες οι υπόλοιπες στο εργαστήριο ΕΚΕΤ.

2.2. Ταχύτητα ενανθράκωσης



Σχήμα 2.1: Αποτελέσματα ταχύτητας ενανθράκωσης μετά από έκθεση σε περιβάλλον 1% CO₂ και σχετικής υγρασίας περί του 65%.

Στο παραπάνω σχήμα αποτυπώνεται η αύξηση του βάθους ενανθράκωσης πρισματικών δοκιμίων σκυροδέματος διαστάσεων 10x10x20 cm μετά από έκθεση τους σε περιβάλλον CO₂ 1%. Τα δοκίμια προτού εκτεθούν στο περιβάλλον επιταχυνόμενης ενανθράκωσης συντηρήθηκαν στον υγρό θάλαμο για 28 ημέρες. Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε μετά την θραύση των δοκιμίων και ψεκασμό φαινολοφθαλεΐνης (βλ. Φωτογραφία 2.1).

ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ



ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΗ ΑΜΜΟ



ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ



ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΔΡΑΝΗ



ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ



Φωτογραφία 2.1: Όψεις των δοκιμών μετά την θραύση τους και των ψεκασμό τους με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης



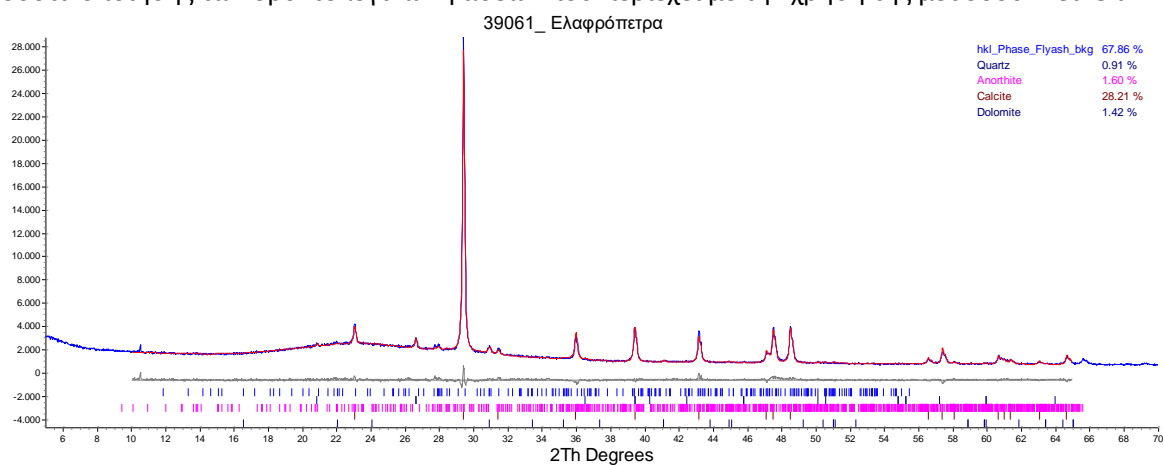
Φωτογραφία 2.2: Στις φωτογραφίες φαίνεται η συσκευή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης που χρησιμοποιήθηκε. Το στεγανό δοχείο τροφοδοτείται με ρεύμα αέρα και CO₂ προς επίτευξη της επιθυμητής συγκέντρωσης η οποία μετράται σε πραγματικό όργανο με φορητό αναλυτή. Επιπλέον στο εσωτερικό του δοχείου που φυλάσσονται τα δοκίμια βρίσκονται τοποθετημένα όργανα μέτρησης της σχετικής υγρασίας του χώρου, ένας μικρός ανεμιστήρας καθώς επίσης και δοχείο με νερό προς επίτευξη και έλεγχο της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θαλάμου.

Πίνακας 2.1: Υπολογισμός ετών που απαιτούνται για την ενανθράκωση 15 mm με έκθεση στο περιβάλλον βάσει των αποτελεσμάτων φυσικής και επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.

Περιγραφή	Έτη που απαιτούνται για την ενανθράκωση 15 mm με έκθεση στο περιβάλλον (ΒΑΣΕΙ ΑΠΟΤΕΛ. ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ)	Έτη που απαιτούνται για την ενανθράκωση 15 mm με έκθεση στο περιβάλλον (ΒΑΣΕΙ ΑΠΟΤΕΛ. ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ)
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ	47	39
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΔΡΑΝΗ	>100	>100
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΗ ΑΜΜΟ	15	39
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ	8	39
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (3 cm)	6	2

Μαρία Γ. Νομικού, Διερεύνηση της επίδρασης του ελαφροσκυροδέματος στη σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών
Ιούλιος 2020

Σχήμα 2.2: Ακτινογράφημα δείγματος ελαφρόπετρας στο οποίο παρουσιάζονται αποτελέσματα ποσοτικοποίησης των ορυκτολογικών φάσεων που περιέχει με την χρήση της μεθόδου Rietveld.

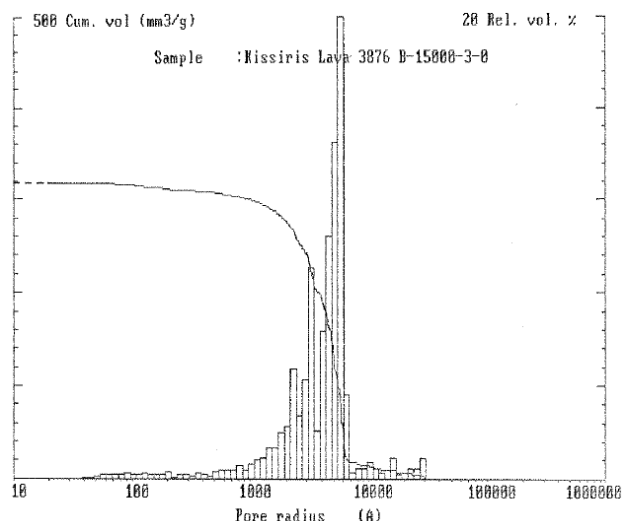


Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης δείγματος ελαφρόπετρας.

Ορυκτολογικές φάσεις	Ποσοστό συμμετοχής
Quartz	0.9%
Anorthite	1.6%
Dolomite	1.4%
Calcite	28.2%
Amorphous	67.9%

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα κατανομής μεγέθους πόρων δείγματος ελαφρόπετρας προσδιορισμένη με την μέθοδο ποροσιμετρίας υδραργύρου

Περιοχή ακτίνων πόρων, nm	% όγκου πόρων	Όγκος πόρων cm ³ /g
52000 - 7500	34.4	0.22
7500 - 750	48.4	0.31
750 - 75	9.4	0.06
75 - 7.5	6.2	0.04
7.5 - 2	1.6	0.01
Σύνολο	100.0	0.64



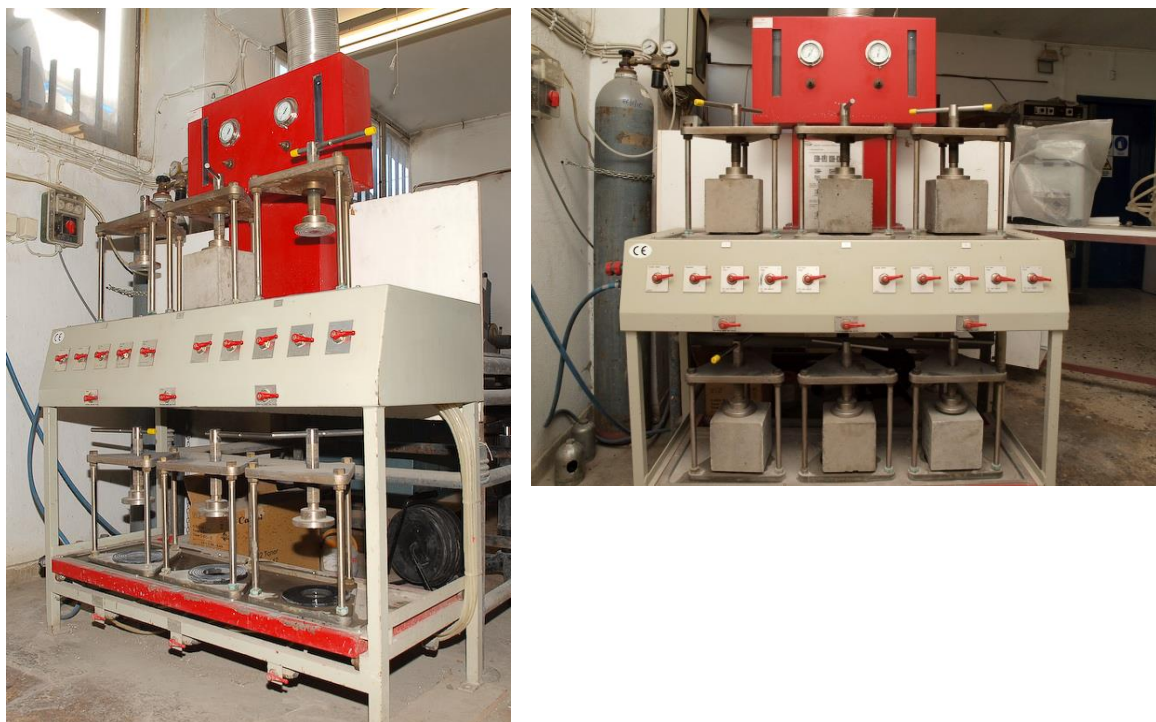
2.3. Φαινόμενο Βάρους νωπού συμπυκνωμένου κισηροδέματος

Πίνακας 2.4: Συγκριτικός πίνακας φαινόμενου βάρους νωπού συμπυκνωμένου κισηροδέματος.

Περιγραφή	Φαινόμενο βάρος νωπού σκυροδέματος (Kg/m ³)	% μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας του ελαφροσκυροδέματος συγκριτικά με το συμβατικό γαρμπιλόδεμα
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ	1642 Κατηγορία D 1,8	-31%
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΔΡΑΝΗ	2363	-
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΗ ΑΜΜΟ	1802 Κατηγορία D 2,0	-24%
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ	1815 Κατηγορία D 2,0	-23%
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (3 cm)	1735 Κατηγορία D 2,0	-27%

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό το συγκριτικό πλεονέκτημα της χρήσης ΚΣ έναντι του ΣΚΠ ή/ και γαρμπιλοδέματος όσον αφορά το φαινόμενο βάρους τους. Φαίνεται λοιπόν ότι η χρήση ΚΣ μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του βάρους της κατασκευής έως και 30%, γεγονός που ενδεχομένως να μπορεί να οδηγήσει σε αισθητή μείωση του συνολικού όγκου του απαιτούμενου ΕΣ λόγω του μικρότερου βάρους της κατασκευής για δεδομένα στατικά χαρακτηριστικά. Το τελευταίο όμως χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

2.4. Βάθος διείσδυσης νερού σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-08



Φωτογραφία 2.3: Συσκευή μέτρησης υδατοπερατότητας που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της υδατοπερατότητας σε κυβικά δοκίμια ΚΣ και συμβατικού γαρμπιλοδέματος σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-8.

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα μέτρησης υδατοπερατότητας σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 15x15x15 cm σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-8.

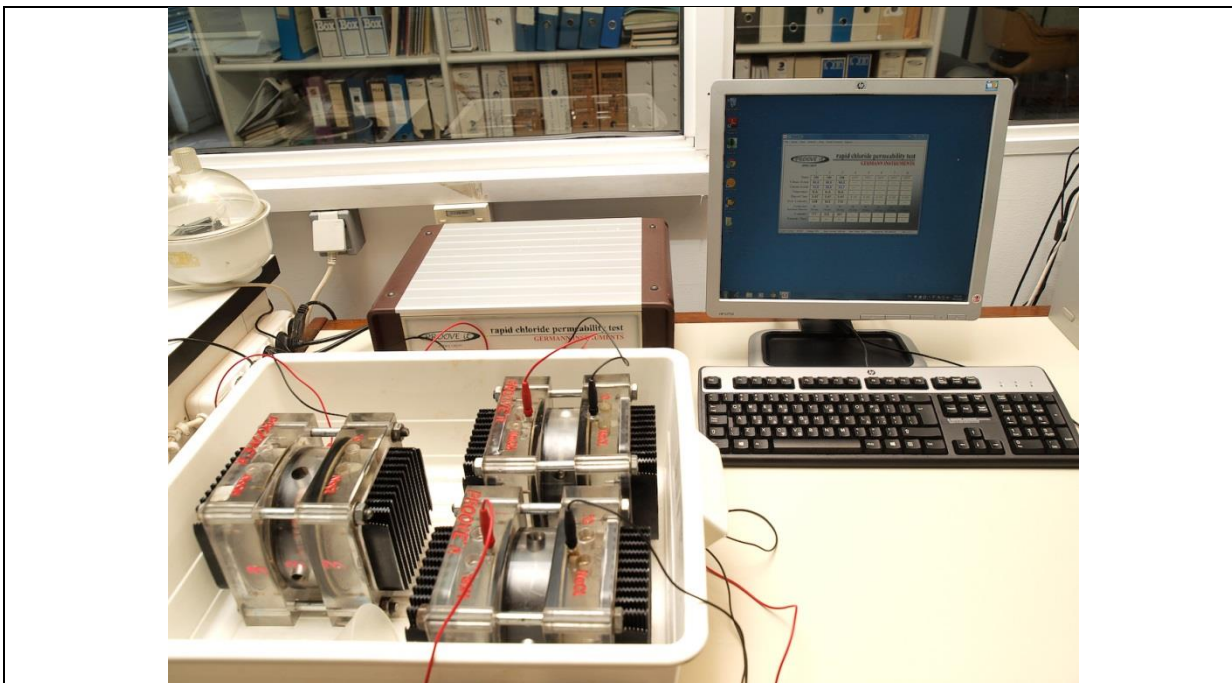
Περιγραφή	Αριθμός ημερών που μεσολάβησε από την παρασκευή των δοκιμών έως την μέτρησή τους	Βάθος διείσδυσης νερού (cm)
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ	194	14
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΔΡΑΝΗ	187	2
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΗ ΑΜΜΟ	180	14
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ	249	13
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (3 cm)	235	12

Η παραπάνω δοκιμή διενεργήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-8 κατά το οποίο τα δοκίμια σκυροδέματος εκτίθενται σε νερό πίεσης 5 bar για διάστημα 3 ημερών. Στη συνέχεια, τα δοκίμια θραύονται και μετράται η μέγιστη απόσταση που έχει εισχωρήσει το νερό στη μάζα του δοκιμίου από την επιφάνεια έκθεσής του.

Τα δοκίμια που υποβάλλονται στην παραπάνω δοκιμή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 28 ημερών. Στην

περίπτωση μας, τα δοκίμια συντηρήθηκαν στον υγρό θάλαμο του εργαστηρίου για διάστημα 28 ημερών και εν συνεχεία εκτέθηκαν στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Η γενική παρατήρηση είναι ότι τα ΕΣ που εξετάστηκαν ήταν πλήρως υδατοπερατά.

2.5. Επιταχυνόμενη διείσδυση χλωριόντων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1202



Φωτογραφία 2.4: Συσκευή επιταχυνόμενης μέτρησης χλωριόντων σε δοκίμια ΚΣ και συμβατικού γαρμπιλοδέματος συμφ. με το πρότυπο ASTM C 1202.

Πίνακας 2.6: Κατηγοριοποίηση της διαπερατότητας σε χλωριόντα δοκιμίων σκυροδέματος βάσει της μετρούμενης τιμής (Cb) συμφ. με το πρότυπο ASTM C 1202.

Περιοχή τιμών (Cb)	Χαρακτηρισμός
>4000	Υψηλή διαπερατότητα
2000 – 4000	Μέτρια διαπερατότητα
1000 – 2000	Χαμηλή διαπερατότητα
100 – 1000	Πολύ χαμηλή διαπερατότητα
< 100	Αμελητέα διαπερατότητα

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα μέτρησης ικανότητας διάχυσης χλωριόντων σε δοκίμια ΚΣ και συμβατικού γαρμπιλοδέματος.

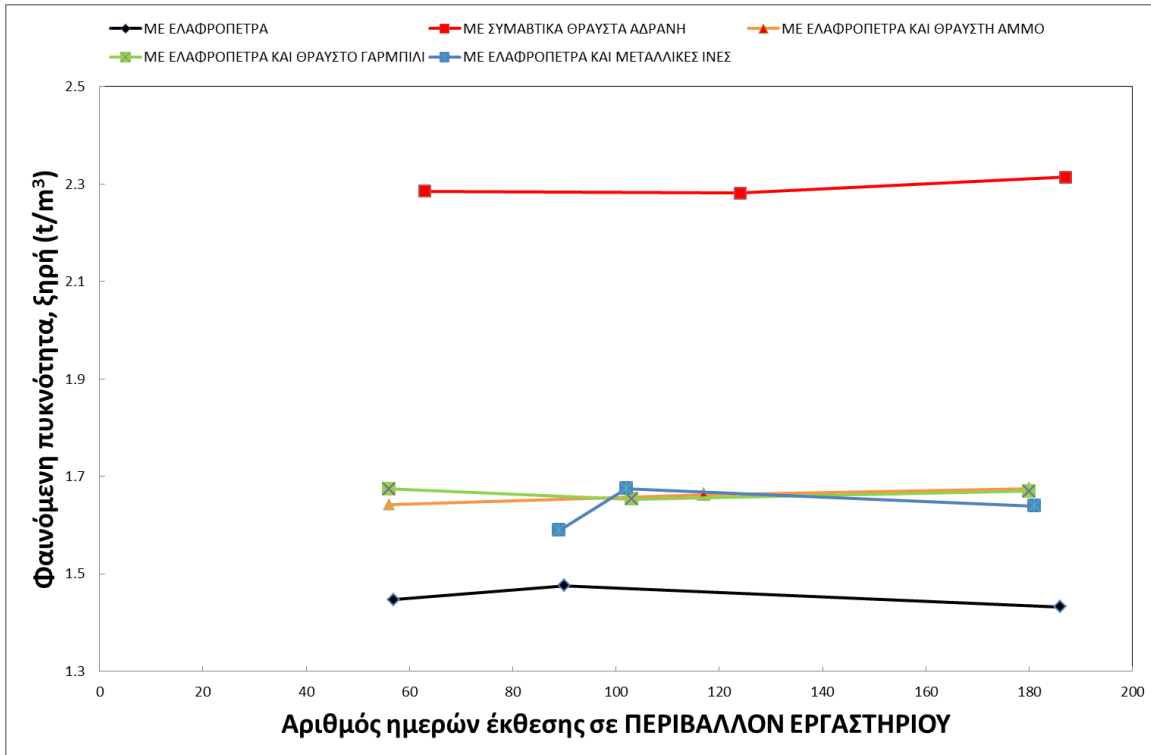
Περιγραφή	Αριθμός ημερών που μεσολάβησε από την παρασκευή των δοκιμών έως την μέτρηση τους	Φορτίο (Cb)	Ικανότητα διάχυσης χλωριόντων
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ	88	559	Πολύ χαμηλή
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΔΡΑΝΗ	81	905	Πολύ χαμηλή
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΗ ΑΜΜΟ	110	434	Πολύ χαμηλή
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ	145	316	Πολύ χαμηλή
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (3 cm)	131	2529	Μέτρια

Η παραπάνω δοκιμή έγκειται στην έκθεση δείγματος σκυροδέματος (ελαφροβαρές ή μη) σε διαφορετικά περιβάλλοντα (η μια πλευρά εκτίθεται σε διάλυμα NaCl 3% και η άλλη σε διάλυμα NaOH 0.3N) υπό σταθερή διαφορά δυναμικού (60V) για διάστημα 6 ωρών. Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι 100 mm διάμετρος και 50 mm πάχος. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετράται σε πραγματικό χρόνο το ρεύμα και άρα το φορτίο που διέρχεται ενώ στο τέλος της δοκιμής καταγράφεται το συνολικό φορτίο που έχει διέρθει και βάσει αυτού του αποτελέσματος το δοκίμιο κατατάσσεται στην αντίστοιχη κατηγορία (βλ. Πίνακα 2.7).

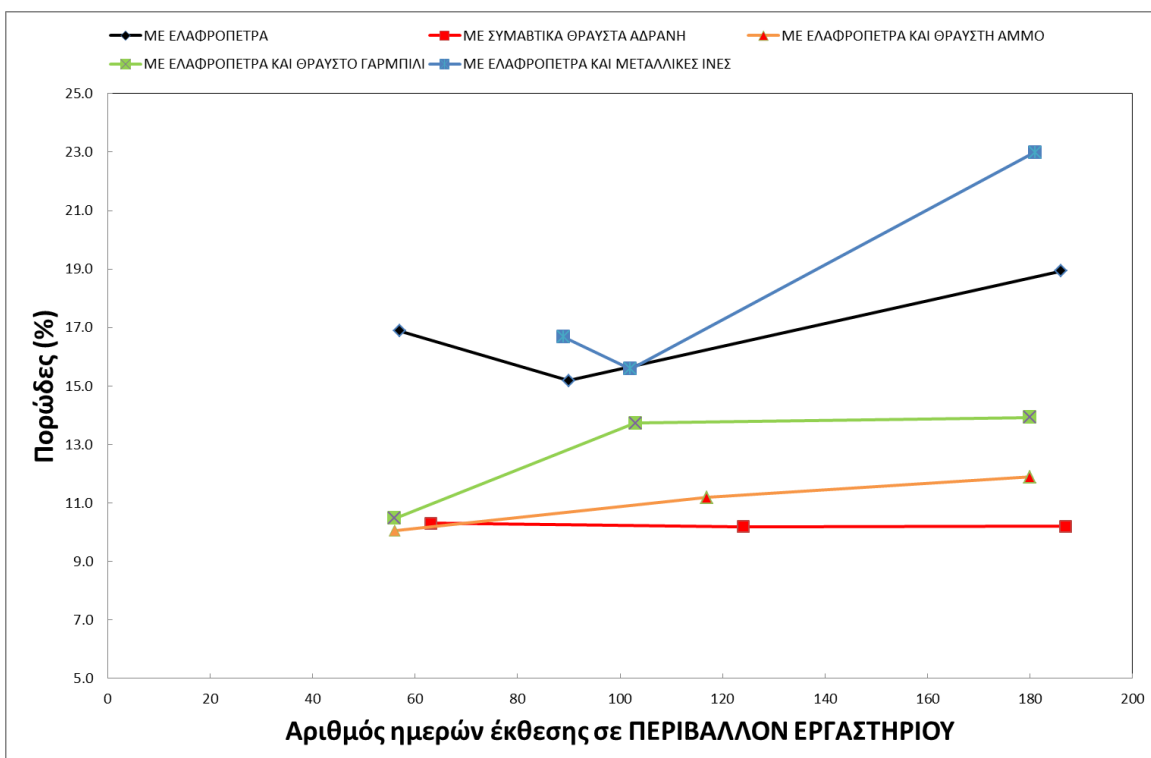
Τα δοκίμια που μετρήθηκαν συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στον υγρό θάλαμο και στη συνέχεια εκτέθηκαν στο εξωτερικό περιβάλλον για το υπόλοιπο διάστημα που μεσολάβησε έως την μέτρησή τους.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω δοκιμής για τους διαφορετικούς τύπους ΚΣ καθώς και του συμβατικού γαρμπιλοδέματος φαίνονται στον Πίνακα 20. Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αμέσως σαφές ότι η χρήση της ελαφρόπετρας οδηγεί σε σκυροδέματα πολύ χαμηλής ικανότητας διάχυσης χλωριόντων και άρα ανθεκτικών σε αυτά. Εκείνο που διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με τα υπόλοιπα είναι το ΚΣ με τις μεταλλικές ίνες. Το τελευταίο αποτέλεσμα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης το οποίο ενδέχεται να οφείλεται στην μη καλή διασπορά των μεταλλικών ινών στη μάζα του ΚΣ δεδομένου ότι όλα τα παραπάνω αναμίγματα παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακό mixer.

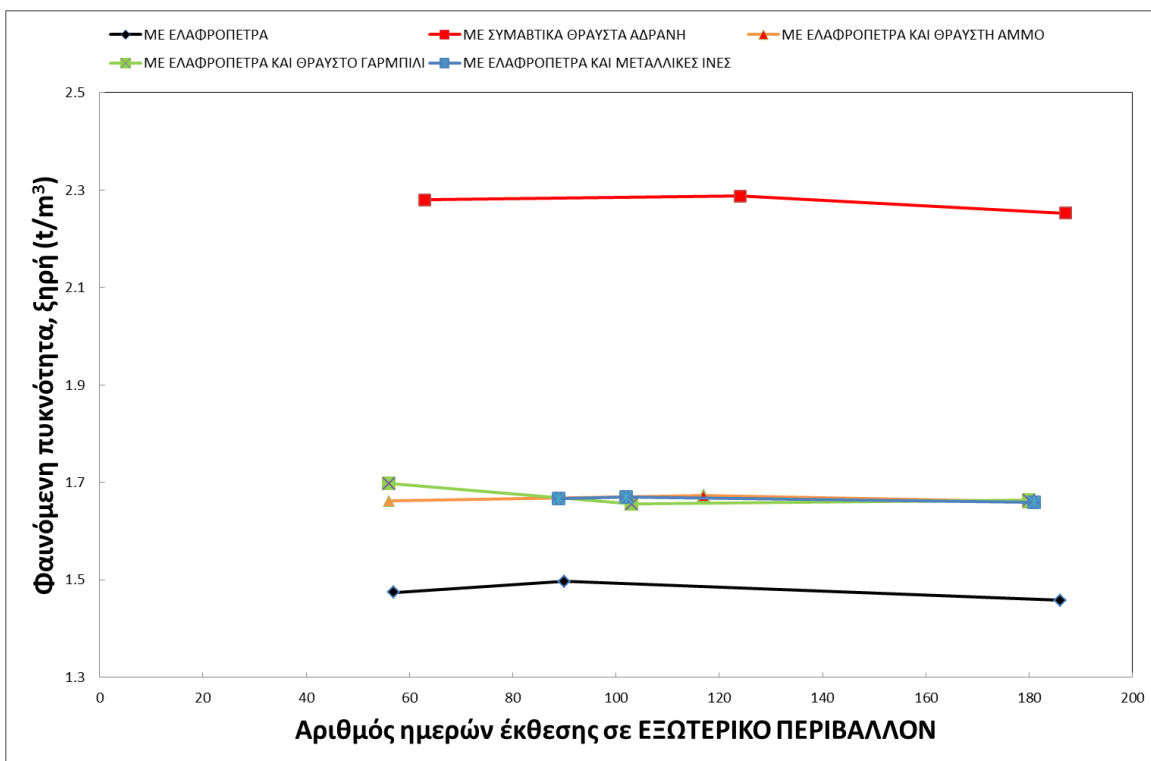
2.6. Μετρήσεις πορώδους σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642



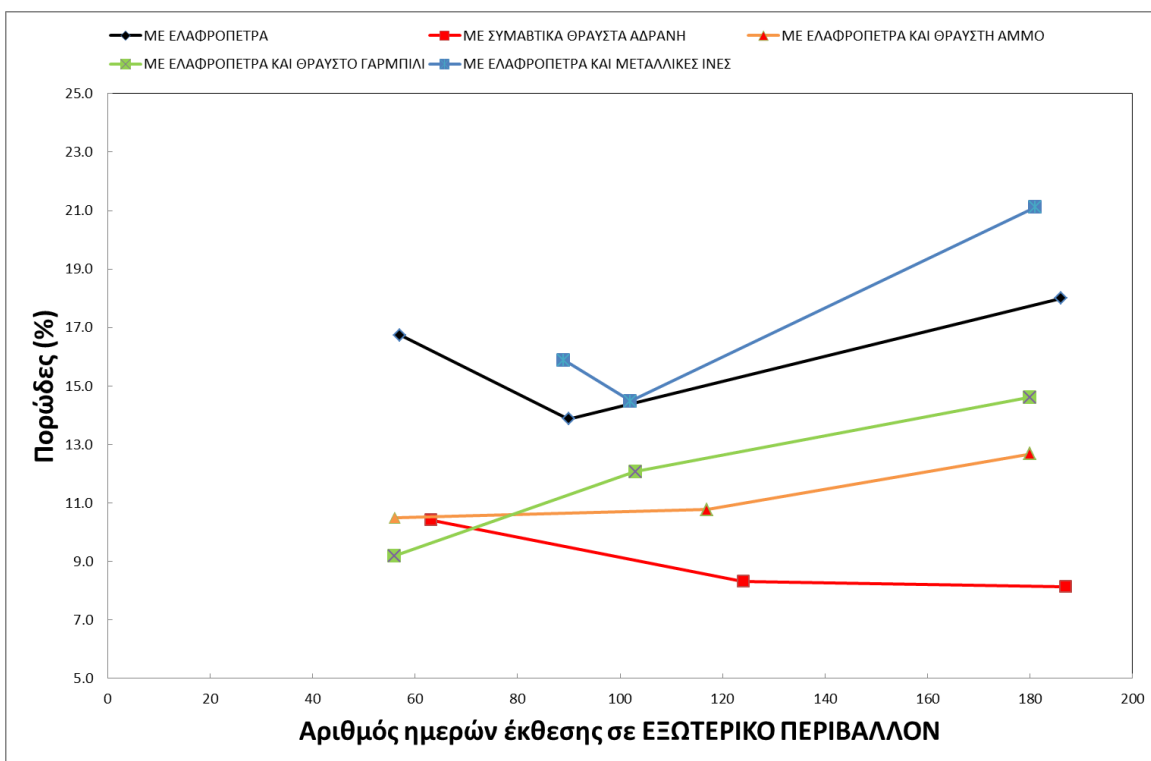
Σχήμα 2.3: Μεταβολή της φαινόμενης ξηρής πυκνότητας με έκθεση στο περιβάλλον εργαστηρίου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642.



Σχήμα 2.4: Μεταβολή του πορώδους δοκιμίων με έκθεση στο περιβάλλον εργαστηρίου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C642.



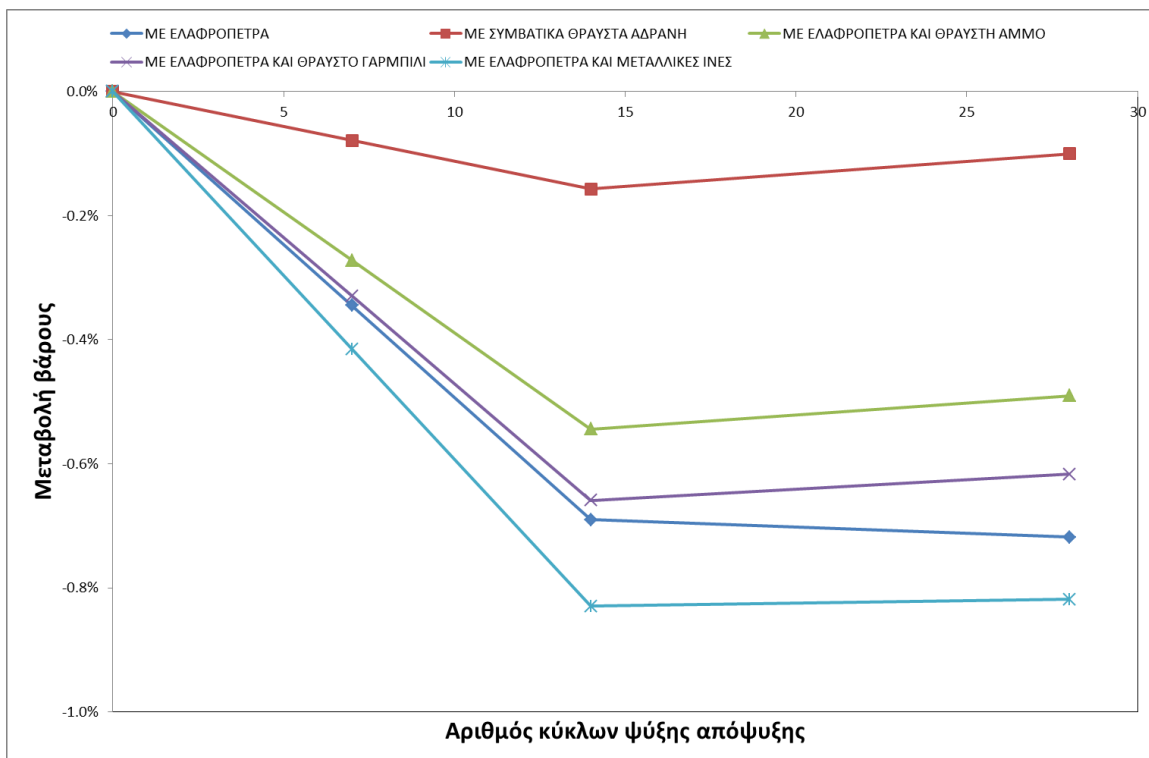
Σχήμα 2.5: Μεταβολή της ξηρής φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων με έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642.



Σχήμα 2.6: Μεταβολή του πορώδους δοκιμίων με έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642.

Η δοκιμή προσδιορισμού του πορώδους δοκιμίων σκυροδέματος συνίσταται από τα παρακάτω βήματα: (α) προσδιορισμό του ξηρού βάρους του δοκιμίου με θέρμανση στους 100 ως 110 °C, (β) προσδιορισμό βάρους του κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού δοκιμίου και τέλος (γ) προσδιορισμό βάρους του κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού δοκιμίου μετά το βρασμό.

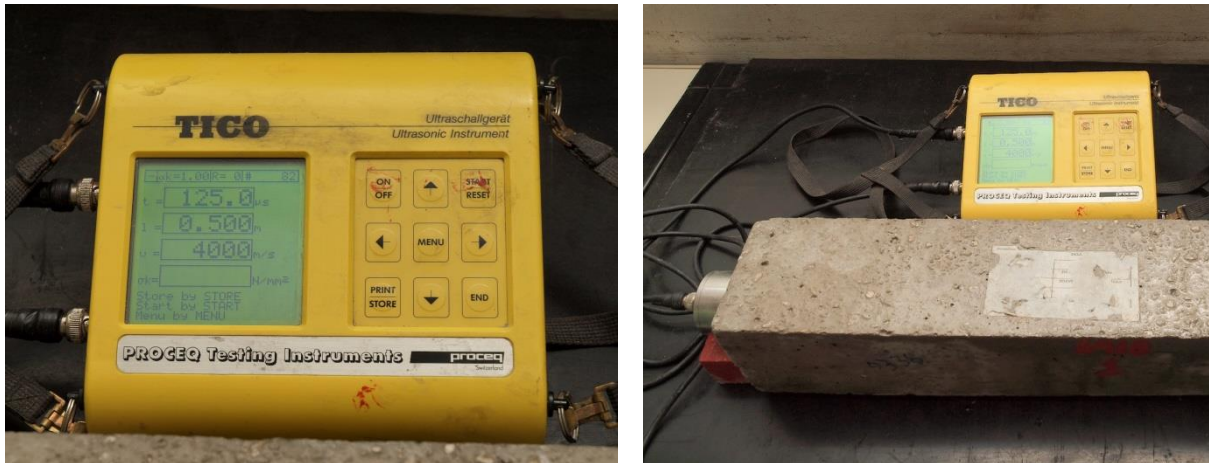
2.7. Κύκλοι ψύξης – απόψυξης σύμφωνα με το πρότυπο CEN 15177



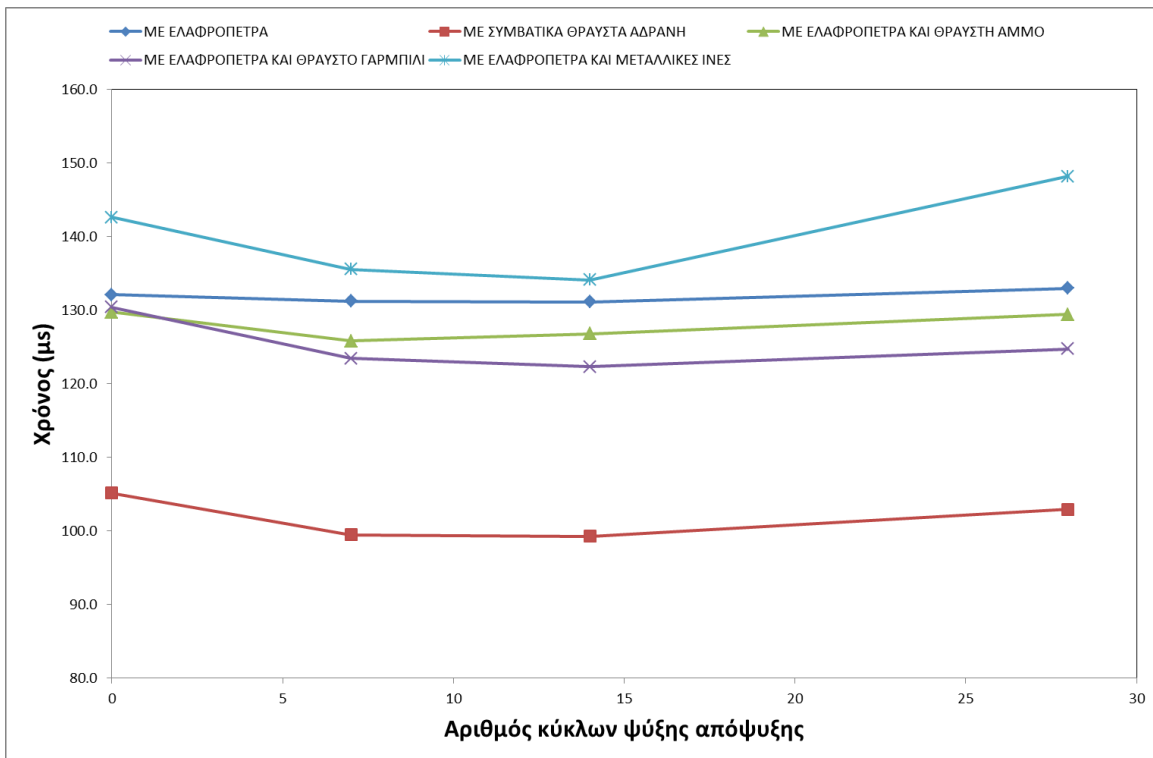
Σχήμα 2.7: Μεταβολή βάρους δοκιμίων σκυροδέματος συναρτήσει του αριθμού των κύκλων απόψυξης συμφ. με το πρότυπο CEN 15177.

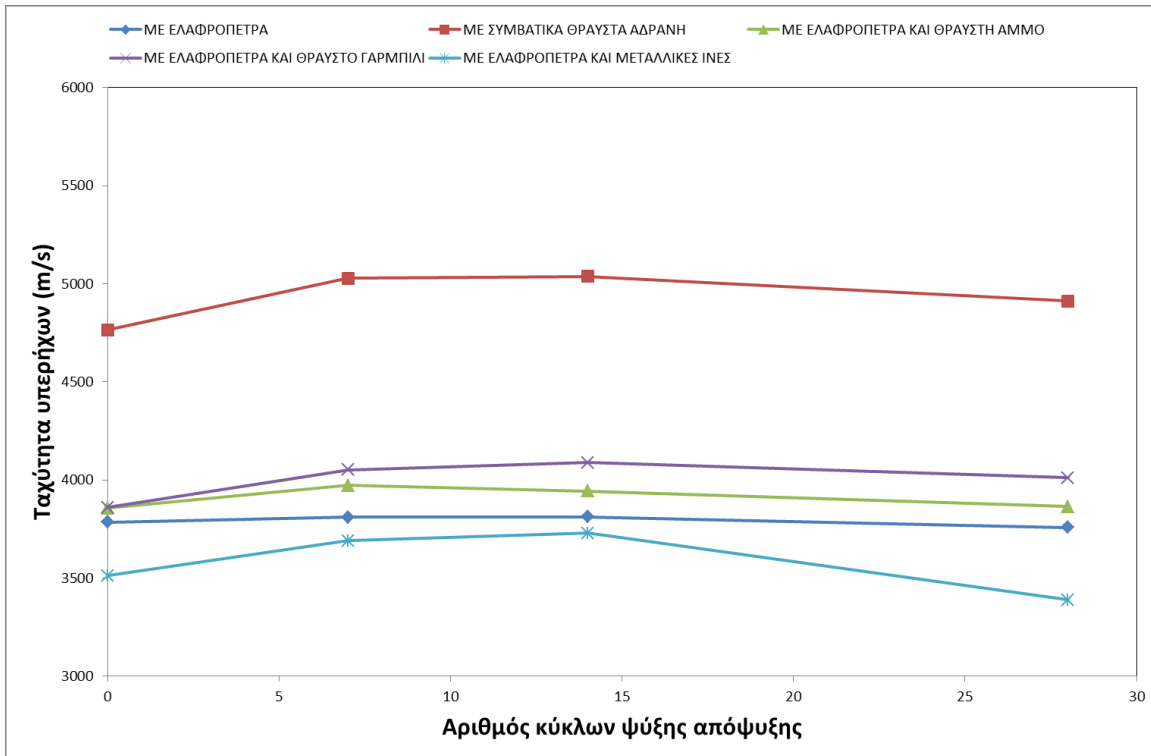
Όλοι οι τύποι ΕΣ που εξετάστηκαν εμφανίζουν απώλεια βάρους μεταξύ 0.5 και 0.8% μετά από 28 κύκλους ψύξης – απόψυξης, εν αντιθέσει με το συμβατικό γαρμπιλόδεμα, όπου η αντίστοιχη τιμή είναι < 0.2%.

2.8. Μέτρηση υπερήχων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 597



Φωτογραφία 2.5: Συσκευή μέτρησης υπερήχων σε πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος



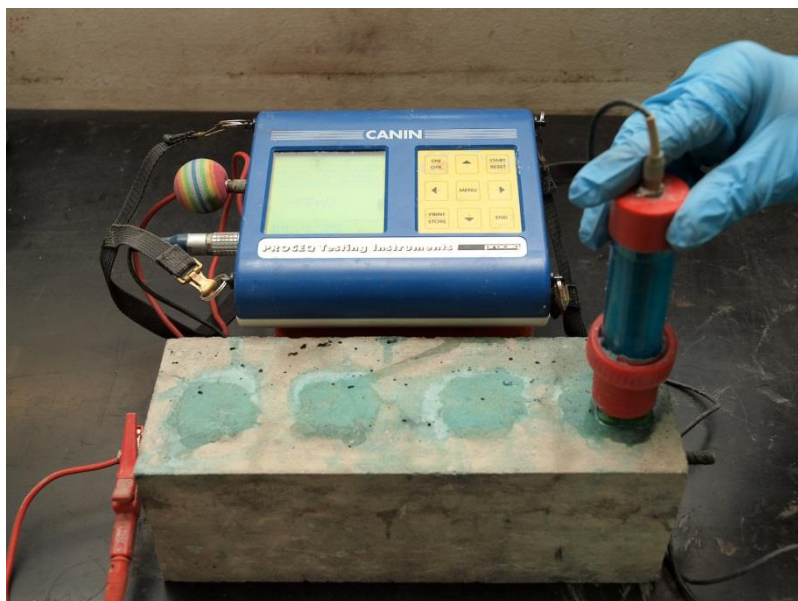


Σχήμα 2.8: Μεταβολή του χρόνου και της ταχύτητας υπερήχων δοκιμών σκυροδέματος συναρτήσει του αριθμού των κύκλων απόψυξης σύμφωνα με το πρότυπο CEN 15177.

Τόσο η ταχύτητα όσο και ο χρόνος μετάδοσης δεν μεταβάλλονται σημαντικά μεταξύ των δοκιμών, εκτός από τη σύνθεση με τις μεταλλικές ίνες.

Το σχετικό δυναμικό μέτρο ελαστικότητας επιδεινώνεται σημαντικά για τη σύνθεση του ΕΣ με τις μεταλλικές ίνες, ενώ για τις υπόλοιπες συνθέσεις ο ρυθμός μεταβολής είναι παρόμοιος με αυτόν του συμβατικού γαρμπιλοδέματος.

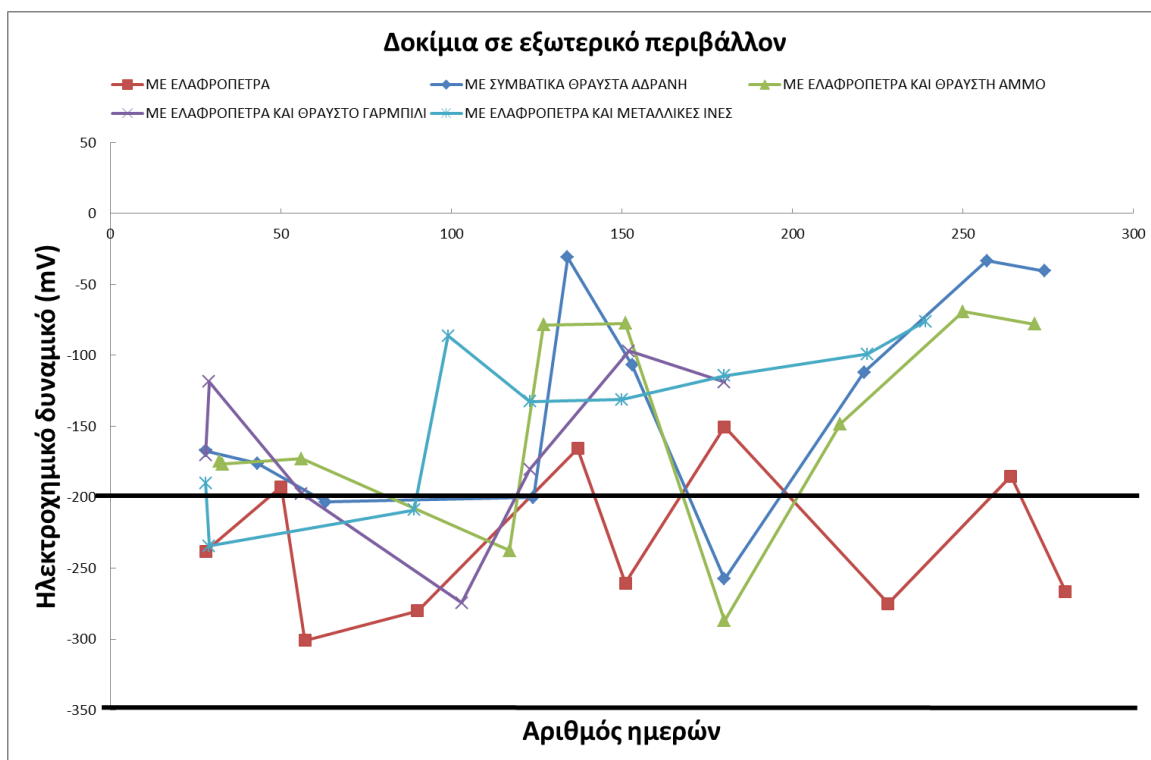
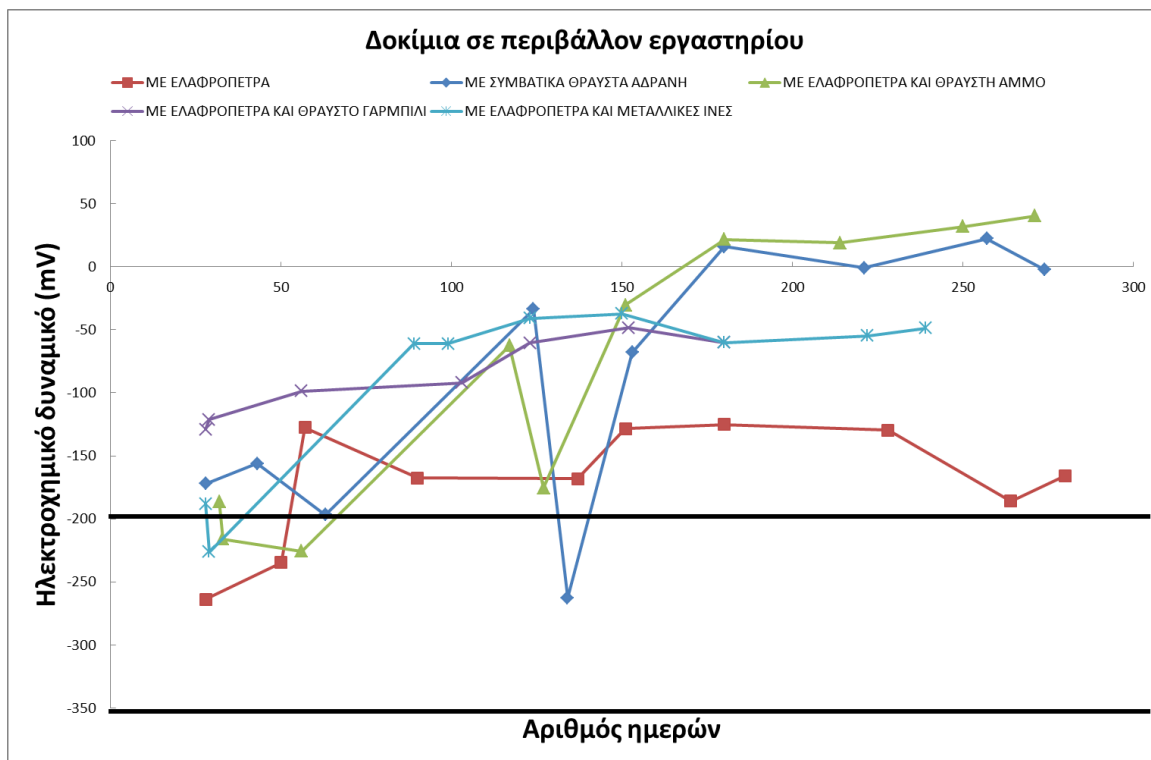
2.9. Ηλεκτροχημικό δυναμικό σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 876



Φωτογραφία 2.6: Συσκευή μέτρησης ηλεκτροχημικού δυναμικού συμφ. με το πρότυπο ASTM C 876.

Πίνακας 2.8: Χαρακτηρισμός της κατάστασης του σπλισμού βάσει του αποτελέσματος μέτρησης του ηλεκτροχημικού δυναμικού.

Ηλεκτροχημικό δυναμικό	Χαρακτηρισμός
>-200 mV	Προστασία σπλισμού
Μεταξύ -350 και -200 mV	Μεταβατική ζώνη - Μη ασφαλές συμπέρασμα
<-350 mV	Οξειδωση σπλισμού



Σχήμα 2.9: Μεταβολή του ηλεκτροχημικού δυναμικού δοκιμίων σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο περιβάλλον εργαστηρίου και στο εξωτερικό περιβάλλον.

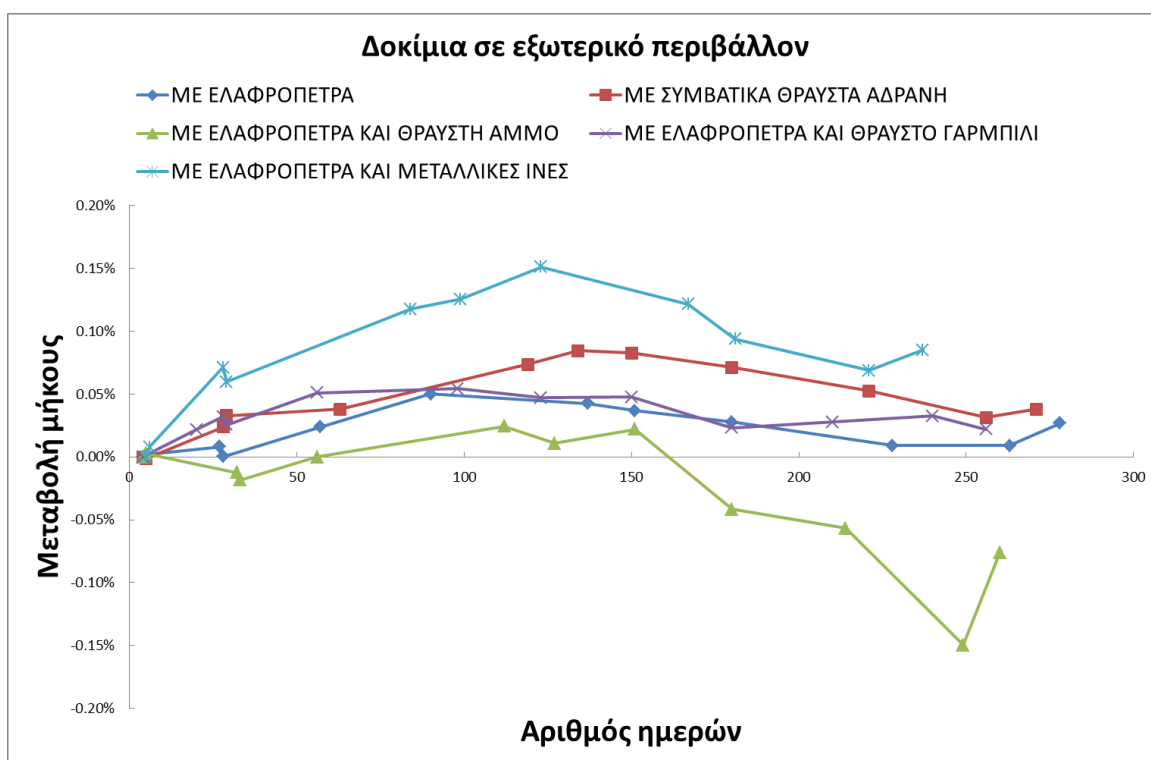
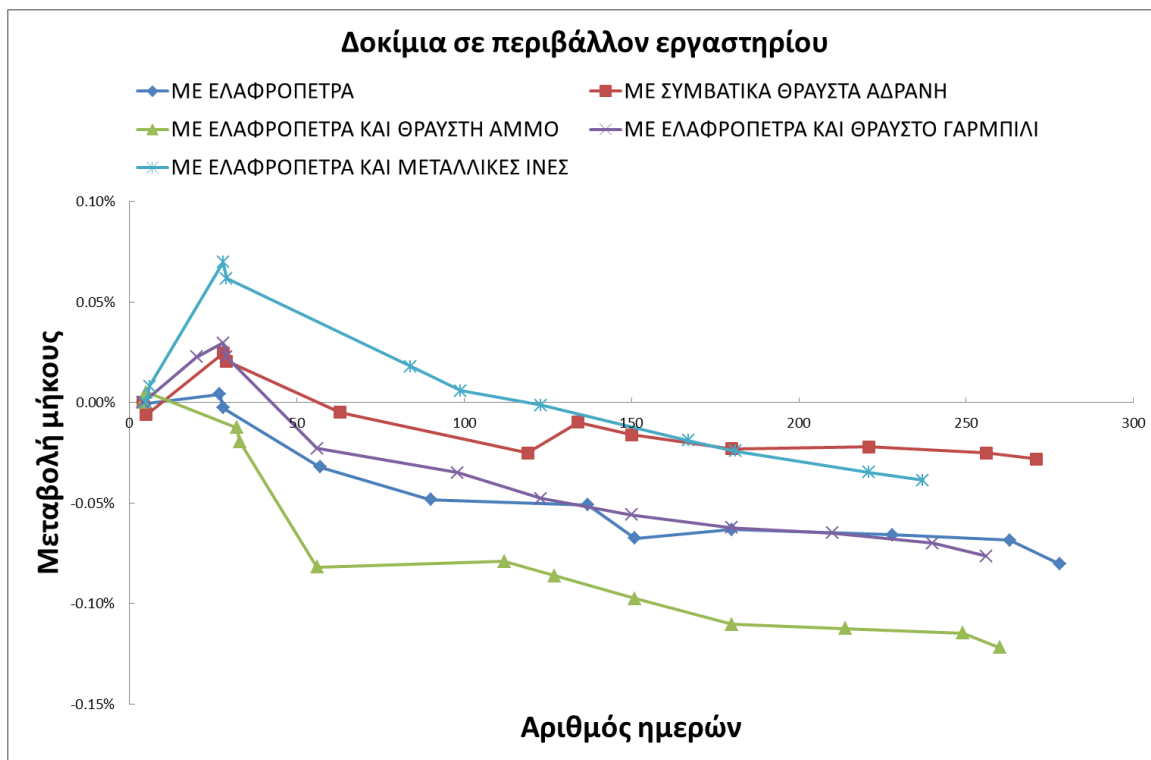
Οι τιμές του ηλεκτροχημικού δυναμικού υποδεικνύουν ότι για την περίπτωση έκθεσης των δοκιμίων σε περιβάλλον εργαστηρίου την μη οξείδωση του σπλισμού για όλα τα σκυροδέματα που εξετάστηκαν (ΕΣ και ΣΚΠ).

Για την περίπτωση έκθεσης των δοκιμίων σε εξωτερικό περιβάλλον την μη οξείδωση του οπλισμού για όλα τα σκυροδέματα που εξετάστηκαν (ΕΣ και ΣΚΠ) εκτός αυτού με την ελαφρόπετρα, για το οποίο δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα βάσει αυτής της μέτρησης μόνο.

2.10. Μεταβολή μήκους δοκιμίων σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 157



Φωτογραφία 2.7: Συσκευή μέτρησης του μήκους των δοκιμίων



Σχήμα 2.10: Μεταβολή του μήκους δοκιμίων σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο περιβάλλον εργαστηρίου και στο εξωτερικό περιβάλλον σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 157.

Το ΕΣ με κίσηρη συμπεριφέρεται παρόμοια με το συμβατικό γαρμπιλόδεμα ως προς τη μεταβολή του μήκους του με το χρόνο.

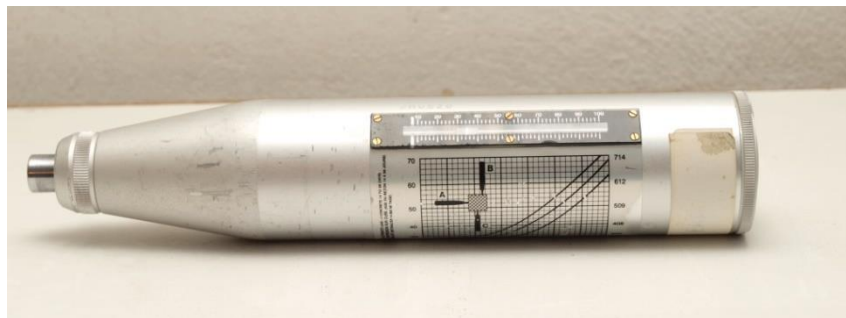
Σχεδόν όλα τα δοκίμια εμφανίζουν μικρή συρρίκνωση (αυτό που περιέχει ελαφρόπετρα και θραυστή

άμμο εμφανίζει τη μεγαλύτερη μεταβολή) όταν αυτά εκτίθενται στις ήπιες συνθήκες του εργαστηρίου.

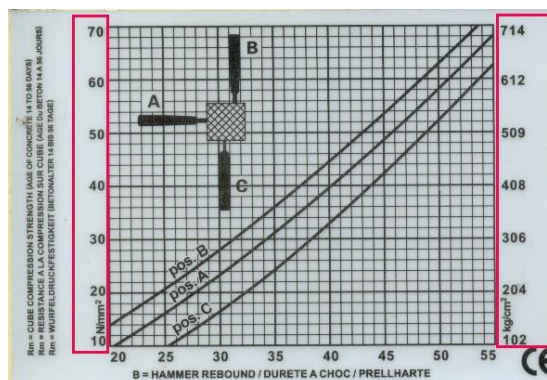
Το ΕΣ με κίσηρη συμπεριφέρεται παρόμοια με το συμβατικό γαρμπιλόδεμα ως προς τη μεταβολή του μήκους του με το χρόνο.

Σχεδόν όλα τα δοκίμια εμφανίζουν μικρή διόγκωση (εκτός αυτού που περιέχει ελαφρόπετρα και θραυστή άμμο που εμφανίζει συρρίκνωση) όταν αυτά εκτίθενται στις υγρές συνθήκες του περιβάλλοντος.

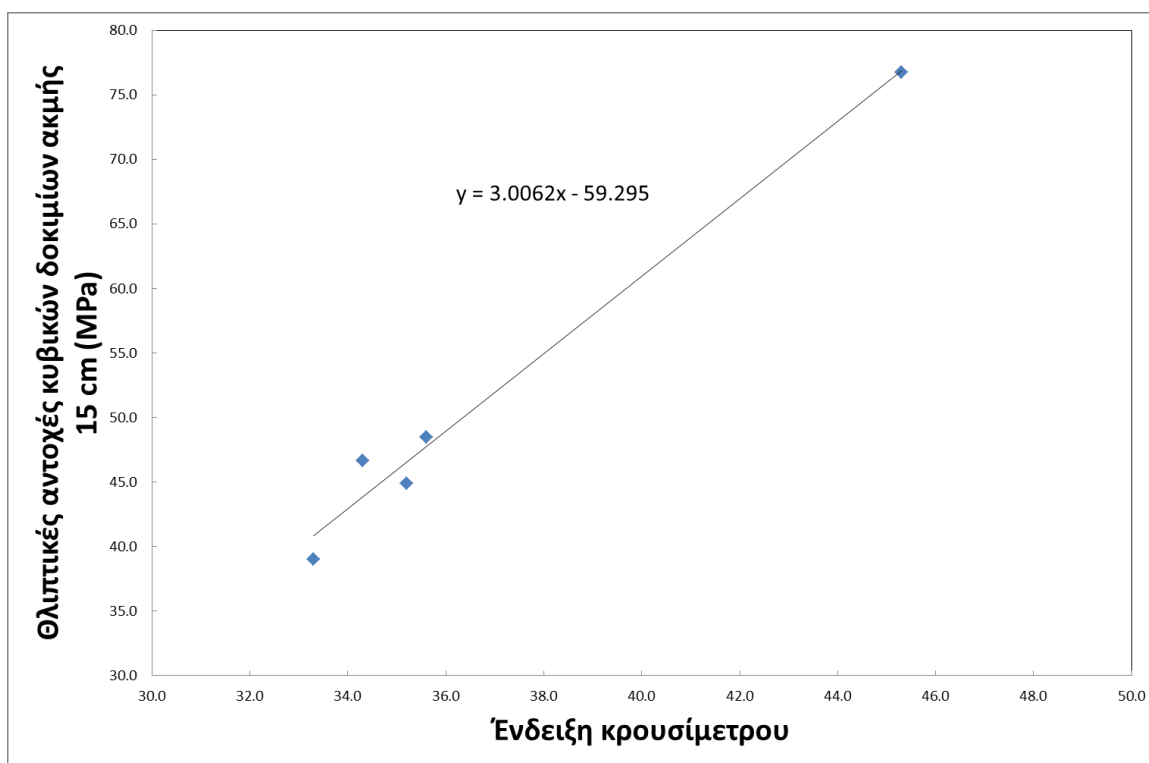
2.11. Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών με αποτελέσματα κρουσιμέτρησης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 823



Φωτογραφία 2.8: Κρουσίμετρο (που χρησιμοποιήθηκε)



Φωτογραφία 2.9: Διάγραμμα συσχέτισης ένδειξης κρουσίμετρου με την θλιπτική αντοχή



Σχήμα 2.11: Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών με αποτελέσματα κρουσίμετρησης συμφ. με το πρότυπο ASTM C823.

2.12. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Πίνακας 2.9: Συγκριτικός πίνακας συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σκληρυμένου ελαφροβαρούς ΚΣ και συμβατικού γαρμπιλοδέματος.

Περιγραφή	Μέση πυκνότητα μετά την ξήρανση (Kg/m ³)	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (W/m/K)	% μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ελαφροσκυροδέματος συγκριτικά με το συμβατικό γαρμπιλόδεμα
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ	1618 Κατηγορία D 1,8	0.624	-61%
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΔΡΑΝΗ	2299	1.616	-
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΗ ΑΜΜΟ	1706 Κατηγορία D 1,8	0.747	-54%
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ	1747 Κατηγορία D 1,8	0.789	-51%
ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (3 cm)	1659 Κατηγορία D 1,8	0.679	-58%

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα δείχνουν ότι η χρήση ΚΣ παραγόμενου είτε αμιγώς με χρήση

κίσηρης είτε με μερική προσθήκη θραυστών αδρανών μειώνουν σημαντικά τόσο την πυκνότητα των σκληρυμένων δοκιμών (τουλάχιστον -25%) όσο και τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (τουλάχιστον -51%).

3. Πιλοτική Παραγωγή σε μονάδα Ετοιμού Σκυροδέματος

Σειρά βιομηχανικών δοκιμών για παραγωγή παρτίδων δομικού ΚΣ πραγματοποιήθηκε στην μονάδα ετοιμού σκυροδέματος της Lafarge Beton Ραφίνας. Στόχος των δοκιμών ήταν:

- Η διερεύνηση προβλημάτων κατά την παραγωγή δομικού ΚΣ:
 - Καταλληλότητα εξοπλισμού παραγωγής σκυροδέματος κανονικού βάρους και ενδεχόμενες τροποποιήσεις στον εξοπλισμό και στην παραγωγική διαδικασία.
 - Εκτίμηση επαναληψιμότητας στην ποιότητα του παραγόμενου δομικού ΚΣ.
 - Παραγωγή ΚΣ για την κατασκευή μεγάλων δοκιμών (υποστυλώματα, δοκοί, ινοπλισμένες πλάκες κλπ) για δοκιμές μετρήσεις από Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΟΣ) του ΕΜΠ.
- Η απόκτηση εμπειρίας στην παραγωγή.
- Ο έλεγχος και η τροποποίηση των ιδιοτήτων κατά την παραγωγή, την μεταφορά και την διάσθρωση.
- Η αντιμετώπιση απρόβλεπτων καταστάσεων (troubleshooting).
- Η διαμόρφωση εμπειρικών κανόνων.
- Η κατασκευή σημαντικού πλήθους μικρών δοκιμών για εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας κλπ).

Παρήχθησαν 11 βιομηχανικά αναμίγματα ΚΣ με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στο ΕΚΕΤ και τις πειραματικές και σχεδιαστικές προτάσεις του ΕΟΣ/ΕΜΠ για την επίτευξη επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων.

Τα βιομηχανικά αναμίγματα διακρίνονται σε

- ΚΣ με αδρανές μόνο κίσηρη
- ΚΣ με μεταλλικές ίνες
- ΚΣ με προσθήκη θραυστής άμμου

Από τις βιομηχανικές δοκιμές για την παραγωγή δομικού ΚΣ συνάγεται ότι:

- Με την χρήση κίσηρης ΛΑΒΑ ΑΕ κοκκομετρίας 0/8 mm και περιεκτικότητα σε τσιμέντο CEM II42,5 από 390 έως και 477 kg/m³ παράγεται σε μονάδα σκυροδέματος δομικό ελαφροβαρές σκυρόδεμα με κατηγορίες αντοχής κατά EN 206-1 από LC20/22 έως και LC35/38 η και μεγαλύτερες με τον κατάλληλο σχεδιασμό.
- Ουδεμία τροποποίηση απαιτείται στον εξοπλισμό ή στην παραγωγική διαδικασία μιας μονάδας παραγωγής σκυροδέματος κανονικού βάρους για την παραγωγή δομικού ΚΣ
- Το δομικό ΚΣ μπορεί να είναι ινοπλισμένο ή να περιέχει και θραυστή άμμο για την επίτευξη οικονομικών συνθέσεων για προεντεταμένα στοιχεία.
- Η πυκνότητα των παραγομένων συνθέσεων βρίσκεται στην περιοχή των τιμών του ελαφροβαρούς σκυροδέματος κατά EN 206-1 από D1,4 έως και D1,8.
- Η διατήρηση της εργασιμότητας του νωπού δομικού ΚΣ επιτυγχάνεται για τουλάχιστον 3 h με την χρήση συνήθων προσθέτων σκυροδέματος (επιβραδυντής πήξης, μειωτής νερού, υπερρευστοποιητής) και την προσθήκη υπερρευστοποιητή έργου.

- Η μεταφορά και η διαστρωση του δομικού ΚΣ δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες του σκυροδέματος κανονικού βάρους.
- Το δομικό ΚΣ είναι αντλήσιμο.
- Οι βιομηχανικές δοκιμές έδειξαν ελεγχόμενη επαναληψιμότητα στην σύνθεση και στις ιδιότητες του δομικού ΚΣ η οποία μπορεί να βελτιωθεί στην κανονική παραγωγή.
- Διαμορφώθηκαν εμπειρικοί κανόνες σχεδιασμού δομικού ΚΣ ώστε να επιτυγχανεται η επιθυμητή πυκνότητα και αντοχή.
- Σε μεγάλο πλήθος μικρών δοκιμών έγιναν εργαστηριακές δοκιμές σε ηλικίες δομικού ΚΣ από 3 έως και 90 ημ. και προσδιορίστηκαν και συσχετίστηκαν οι τεχνικές ιδιότητες των διαφόρων συνθέσεων.
 - Θλιπτική αντοχή σε κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια.
 - Πυκνότητα νωπού και ξηρού σε κλίβανο ΚΣ.
 - Αντοχή σε διάρρηξη.
 - Καμπτική αντοχή σε πρισματικά δοκίμια.
 - Μέτρο ελαστικότητας.
 - Έγινε εκτίμηση της επαναληψιμότητας/αβεβαιότητας των μετρήσεων.
- Αναπτύχθηκε ημ εμπειρική σχέση για την απορροφητικότητα της κίσηρης στο σύστημα του ΚΣ.
- Αναπτύχθηκε μοντέλο που συσχετίζει την θλιπτική αντοχή με την ηλικία του ΚΣ. Με το μοντέλο είναι δυνατή η πρόβλεψη της αντοχής των 28 ημερών από την αντοχή δύο νεώτερων ηλικιών.
- Ο σχεδιασμός των συνθέσεων δομικού ΚΣ με κίσηρη 0/8 της ΛΑΒΑ ΑΕ, η παραγωγή, μεταφορά, άντληση και διάστρωση, οι ιδιότητές του και οι συσχετισμοί τους βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206-1 και τα αμερικανικά πρότυπα ACI.

3.1. Εξοπλισμός – Διαδικασία παραγωγής

Η μονάδα ετοιμού σκυροδέματος της Lafarge Beton στην Ραφήνα διαθέτει μονοαξονικό αναμκτήρα βίαιης ανάμιξης ονομαστικού όγκου 4 m³. Ο όγκος των παραγομένων παρτίδων (batch) στον αναμκτήρα ήταν από 2 έως και 3,25 m³. Ο συνολικός χρόνος ανάμιξης καθορίστηκε στα 60 s με βάση προηγούμενη εμπειρία παραγωγής ΚΣ πληρώσεων. Το ΚΣ φορτωνόταν σε αυτοκίνητο-αναδευτήρα (βαρέλα) με τελικό φορτίο συνολικού όγκου από 2 έως 6,5 m³.

Τα συστατικά του ΚΣ τροφοδοτούνται στον αναμκτήρα με την εξής σειρά με επικάλυψη των χρονικών διαστημάτων τροφοδότησης.

- Αδρανή
- Νερό
- Πρόσθετα σκυροδέματος
- Τσιμέντο

3.2. Πρώτες ύλες

Κατά τις βιομηχανικές δοκιμές για την παραγωγή δομικού ΚΣ χρησιμοποιήθηκαν οι εξής πρώτες ύλες:

3.2.1. Τσιμέντο CEM II /B-M (P-W-L) 42,5 ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ

Η θλιπτική αντοχή του CEM II 42,5 στις ηλικίες των 2, 7 και 28 ημ. φαίνεται στον Πιν.3.1

Πίνακας 3.1: Φυσικομηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου CEM II 42,5

Αντοχή 2 d EN 196-1	MPa	30,1
Αντοχή 7 d	MPa	42,4
Αντοχή 28 d	MPa	53,0
Ειδική επιφάνεια, Blaine EN 196-6	cm ² /g	4552

3.2.2. Κίσηρη 0/8 ΛΑΒΑ ΑΕ

Χρησιμοποιήθηκε κίσηρη της ΛΑΒΑ ΑΕ τυπικού μεγέθους κόκκου 0-8 mm με την φυσική της υγρασία. Η κίσηρη της ΛΑΒΑ ΑΕ εξάγεται σε ποικίλες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και ικανοποιεί τα ακόλουθα πρότυπα μεταξύ των οποίων το ευρωπαϊκό και το αμερικανικό πρότυπο ως ελαφροβαρές αδρανές για το δομικό σκυρόδεμα:

- EN 13055-1:2002 Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout
- EN 13055-2:2004 Lightweight aggregates for bituminous mixtures and surface treatments and for unbound and bound applications
- ASTM C330-09 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete
- ASTM C331-10 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units

Δεν πραγματοποιήθηκε κορεσμός με νερό. Το αντικείμενο σχολιάζεται στις παραγράφους 11 και 16. Η κοκκομετρική κατανομή της κίσηρης φαίνεται στον Πιν.3.2

Πίνακας 3.2: Κοκκομετρική κατανομή της κίσηρης EN 933-1

Ανοιγμα κοσκίνου, mm	Διερχόμενο, %
31,5	100,0
16	100,0
8	99,4
4	80,2
2	56,9
1	40,4
0,25	22,8
0,075	15,0

3.2.3. Άμμος θραυστή ασβεστολιθική 0/4

Ορισμένες συνθέσεις ΚΣ περιείχαν και θραυστή ασβεστολιθική άμμο τυπικού μεγέθους κόκκου 0-4 mm η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή του σκυροδέματος κανονικού βάρους. Τα φυσικά χαρακτηριστικά της άμμου (κοκκομετρία, ισοδύναμο άμμου, μπλε του μεθυλενίου) φαίνονται στον Πιν. 3.3.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά της άμμου 0/4

Κοκκομετρική κατανομή EN 933-1	
Άνοιγμα κοσκίνου, mm	Διερχόμενο, %
4,0	100
3,5	95,9
2,0	75,0
1,0	47,1
0,500	31,3
0,250	23,5

0,125	18,7
0,075	16,5
0,063	15,7
Ισοδύναμο αμμου, % EN 933-8	74
Μπλε του μεθυλενίου g/kg EN 933-9	0,25

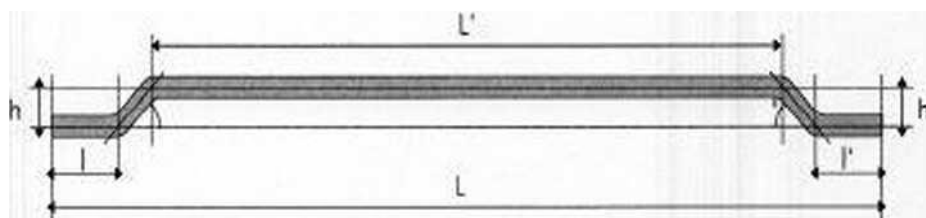
3.2.4. Πρόσθετα σκυροδέματος

Στις βιομηχανικές δοκιμές για την παραγωγή ΚΣ χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια πρόσθετα με εκείνα της παραγωγής σκυροδέματος κανονικού βάρους.

- Επιβραδυντής – ρευστοποιητής EN 934-2 T.10 (Set retarding - Water reducing – Plasticizing admixture)
- Υπερρευστοποιητής EN 934-2 T.3.1 & T.3.2 (High range water reducing – Superplasticizing admixture) and T.11.1 & T.11.2 (Set retarding / high range water reducing / superplasticizing admixture)
- Υπερρευστοποιητής προσθήκης στο έργο (για την διόρθωση της εργασιμότητας στο έργο) EN 934-2 T.3.1 & T.3.2 (High range water reducing – Superplasticizing admixture)

3.2.5. Μεταλλικές ίνες 60 mm, ZS/N 60/1,0 (hook end steel fibers)

Ορισμένες συνθέσεις ΚΣ σχεδιάσθηκαν με την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή έχουν μήκος 60 mm με κεκαμμένα άκρα και ικανοποιούν το πρότυπο EN 14889-1/2006. Σχέδιο των μεταλλικών ινών και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα 3.1 και στον Πιν.3.4.



Σχήμα 3.1: Σχέδιο μεταλλικών ινών

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες μεταλλικών ινών

Διάμετρος	mm	1 ± 0,04
Μήκος L	mm	60 ± 5
l, l'	mm	1 - 4
h, h'	mm	1,8 -0/+1
Γωνίες α, α'	deg	45 (min 30)
Αντοχή εφελκυσμού	N/mm ²	min 1100 - 1500
C	%	max 0,24
Mn	%	0,25 – 0,50
Si	%	max 0,05
P	%	max 0,04
S	%	max 0,05

3.3. Βιομηχανικά αναμίγματα

Παρήχθησαν 11 βιομηχανικά αναμίγματα ΚΣ με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στο ΕΚΕΤ και τις πειραματικές και σχεδιαστικές προτάσεις του ΕΟΣ/ΕΜΠ για την επίτευξη επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων.

Τα βιομηχανικά αναμίγματα διακρίνονται σε

- ΚΣ με αδρανές μόνο κίσηρη - φέρουν στον συμβολισμό την ένδειξη ρ (rumice)
- ΚΣ με μεταλλικές ίνες - φέρουν στον συμβολισμό την ένδειξη f (fibres)
- ΚΣ με προσθήκη θραυστής άμμου - φέρουν στον συμβολισμό την ένδειξη s (sand)

Αναλυτικά σχόλια σχετικά με την παραγωγή και τις επιδόσεις των βιομηχανικών αναμιγμάτων παρουσιάζεται παρακάτω για κάθε ένα από αυτά.

3.3.1. Δοκιμές και μετρήσεις σε νωπό σκυρόδεμα

Το κάθε βιομηχανικό ανάμικτο τροφοδοτείται σε παρτίδες (batch) από τον αναμικτήρα στην βαρέλα απ' όπου αρχικά λαμβάνονται δείγματα για δοκιμές και μετρήσεις σύμφωνα με τις διαδικασίες της καλής πρακτικής, του ΚΤΣ97 και του EN 206-1. Η βαρέλα παραμένει σε λειτουργία για τουλάχιστον 1 h σε χαμηλή συχνότητα περιστροφής και σε ορισμένα χρονικά διαστήματα λαμβάνονται από την βαρέλα δείγματα για την μέτρηση της εργασιμότητας στον χρόνο ή/και για την διόρθωση της εργασιμότητας με υπερρευστοποιητή προσθήκης στο έργο

Οι δοκιμές και μετρήσεις σε νωπό σκυρόδεμα περιλαμβάνουν:

- Μέτρηση της υγρασίας της κίσηρης πριν την ανάμιξη σε διαφορετικές θέσεις της γραμμής παραγωγής
 - Στον σωρό της κίσηρης – αντιπροσωπευτικό δείγμα από όλο τον όγκο
 - Στην καρούτα - άνω και κάτω θέση
 - Στην ταινία μεταφοράς

Η μέση φυσική υγρασία της κίσηρης μετρήθηκε από 10 έως και 29% w-b (σε υγρή βάση). Το ποσοστό εξαρτάται από την εποχή (θέρος, χειμώνας) και από την διάρκεια παραμονής στο περιβάλλον ή στα σιλό τροφοδοσίας (καρούτες). Παρατηρήθηκε ότι η μακροχρόνια παραμονή της κίσηρης στην καρούτα έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική διαφοροποίηση του ποσοστού υγρασίας. Ενδεικτικά σε μια από τις βιομηχανικές δοκιμές μετρήθηκε η μέγιστη διαφορά στο ποσοστό υγρασίας με 19% w-b στην άνω θέση της καρούτας και 25% w-b στην κάτω θέση.

- Κάθιση σκυροδέματος
- Διατήρηση ή/και διόρθωση κάθισης στον χρόνο κατά την παραμονή σε αυτοκίνητο αναδευτήρα
- Περιεκτικότητα σε αέρα (EN 12350-7)

3.3.2. Δοκιμές και μετρήσεις σε σκληρυμένα δοκίμια

Οι βιομηχανικές δοκιμές έχουν το πλεονέκτημα εκτός της κατασκευής μεγάλων δοκιμών, την κατασκευή μεγάλου πλήθους σκληρυμένων δοκιμών. Με τον τρόπο αυτό είναι μπορούν να συσχετισθούν οι μηχανικές ιδιότητες με την ηλικία από το ίδιο ανάμικτο ΚΣ ή οι διαφορετικές ιδιότητες (πχ, αντοχή σε θλίψη αντοχή σε κάμψη) στην ίδια ηλικία.

Οι δοκιμές και μετρήσεις έγιναν σε σκληρυμένα δοκίμια ΚΣ που συντηρήθηκαν σε υγρό θάλαμο

θερμοκρασίας 20 ± 2 °C σε ηλικίες από 3 έως και 90 ημέρες. Το πλήθος των δοκιμών που λαμβάνονταν από κάθε βιομηχανικό ανάμιγμα ήταν από 12 έως και 82.

Οι δοκιμές και μετρήσεις σε σκληρυμένα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν στο ΕΚΕΤ και στο ΕΟΣ/ΕΜΠ και περιλαμβάνουν:

- Θλιπτική αντοχή
 - Κύβοι 150 mm και 100 mm
 - Κύλινδροι 150d x 300h mm
- Αντοχή σε διάρρηξη (Brazilian) EN 12390-6
 - Κύλινδροι 150d x 300h mm
- Καμπτική αντοχή ASTM C 78 (third point loading)
 - Πρίσματα 100 x 100 x 500 mm και 150 x 150 x 600 mm
- Πυκνότητα δοκιμών
 - Συντηρημένων σε υγρό θάλαμο
 - Ξηρών (oven dry) δοκιμών

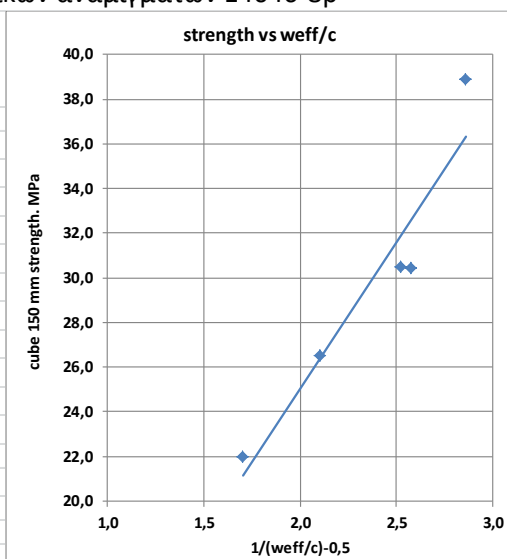
Για κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν από 2 έως και 4 δοκίμια.

3.3.3. Προκαταρτικές βιομηχανικές δοκιμές με κίσηρη. Τα αναμίγματα 14046-8p

Οι δοκιμές αυτές αφορούν στην απόκτηση των πρώτων βιομηχανικών αποτελεσμάτων και αποσκοπούν στην σύγκριση με την βασική εργαστηριακή σύνθεση καθώς και στην επίδραση του λόγου νερού προς τσιμέντο w/c στις ιδιότητες του ΚΣ.

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα των βιομηχανικών αναμιγμάτων 14046-8p

		LAB REF 6137	LAB REF 6700	14046 p	14047 p	14048 p
cement II42,5	kg/m ³	375	375	387	394	400
pumice 0-8 dry	kg/m ³	861	861	813	913	893
sand	kg/m ³					
fibers	kg/m ³					
pumice moist.	kg/m ³	256	171	90	101	99
add water	kg/m ³	144	158	296	227	266
Superplasticizer	kg/m ³	6,1	8,1	4,7	4,7	4,8
Retarder-plasticizer	kg/m ³			2,3	2,4	2,4
wadd/c	kg/m ³	0,38	0,42	0,77	0,58	0,67
wtot/c	kg/m ³	1,06	0,88	1,00	0,83	0,91
weff/c	kg/m ³	0,33	0,30	0,45	0,33	0,38
water abs. dry-b	%	32,2	25,2	25,9	21,7	23,7
total water	kg/m ³	400	329	386	329	365
pumice moist. wet-b	%	22,9	16,6	10,0	10,0	10,0
sand mois. wet-b						
app. dens. wet	kg/m ³	1642	1642	1594	1643	1666
air meas. v/v	%					
air calc. v/v	%	9,9	7,0	12,9	14,2	11,2
flow 10 min	cm	55		75	49	69
flow 30 min	cm			72	42	68
flow 60 min	cm					62
slump 10 min	cm	22	23			
slump 30 min	cm					
slump 60 min	cm					
Strength 15x15x15						
7 d	MPa	22,3	29,4			
12 d	MPa			16,8	24,2	20,7
28 d	MPa	30,4	38,9	22,0	30,5	26,5
90 d	MPa		44,7			
180 d	MPa		48,8			



Παρήχθησαν τρία βιομηχανικά αναμίγματα με κωδ. 14046p, 14047p και 14048p. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.5 και συγκρίνονται με εκείνα της βασικής εργαστηριακής σύνθεσης LABREF 6700. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζεται επίσης η εργαστηριακή σύνθεση LABREF 6137, η οποία παρασκευάστηκε με κίσηρη υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία.

Τα αναμίγματα του Πίνακα 3.5 έχουν περιεκτικότητα σε τσιμέντο από 375 έως 400 kg/m³. Οι τιμές της πυκνότητας του νωπού ΚΣ (app. dens. wet) είναι πρακτικά οι ίδιες και στα εργαστηριακά και στα βιομηχανικά αναμίγματα (1640 kg/m³). Αντίθετα, εμφανίζονται διαφορές μεταξύ των δύο εργαστηριακών αναμιγμάτων καθώς και του LABREF 6700 με τα βιομηχανικά αναμίγματα όσον αφορά στις αντοχές.

Στον Πίνακα 3.5 εμφανίζονται τρεις διαφορετικοί λόγοι w/c. Ο λόγος wtot/c αντιστοιχεί στο συνολικό νερό που περιέχεται στο ανάμιγμα. Ο λόγος wadd/c αντιστοιχεί στο νερό που προστίθεται στο ανάμιγμα (εξαρτάται από την υγρασία των αδρανών και την απορροφητικότητα τους). Ο λόγος weff/c αντιστοιχεί στο δραστικό νερό, δηλαδή στο νερό που δεν είναι απορροφημένο στα αδρανή και συμμετέχει στην εργασιμότητα του σκυροδέματος και στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Ο προσδιορισμός του λόγου weff/c δεν είναι άμεσος όπως στην περίπτωση σκυροδέματος με τα συνήθη αδρανή, τα οποία έχουν μικρή απορροφητικότητα.

Στο σχήμα του Πίνακα 3.5 φαίνεται η σχέση μεταξύ του λόγου w_{eff}/c και της αντοχής του ΚΣ.

Ως μεταβλητή χρησιμοποιείται η εμπειρική $(1/w_{eff} - 0,5)$ όπως περιέχεται στον παρακάτω νόμο Bolomey τροποποιημένο κατά την σταθερά D:

$$S_{con} = Q * S_{cem} * [1/(w_{eff}/c) - 0,5] + D = G * [1/(w_{eff}/c) - 0,5] + D \quad [εξ. 3.1]$$

όπου

S_{con} :	θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
Q:	συντελεστής εξαρτώμενος κυρίως από την ποιότητα των αδρανών
$G = Q * S_{cem}$	
S_{cem} :	θλιπτική αντοχή τσιμέντου
w_{eff}/c :	λόγος δραστικού νερού/τσιμέντο
D:	σταθερά

Έτσι ερμηνεύεται η καλή συμφωνία μεταξύ των αντοχών 30,4 και 30,5 MPa των αναμιγμάτων LABREF 6137 και 14047p, τα οποία έχουν λόγο w_{eff}/c 0,33. Ερμηνεύεται επίσης η διαφορά στις αντοχές 30,4 και 38,9 MPa των εργαστηριακών αναμιγμάτων LABREF 6137 και LABREF 6700 με αντίστοιχους λόγους w_{eff}/c 0,33 και 0,30 αντίστοιχα.

Για την επίτευξη ίδιας εργασιμότητας (κάθιση 22 – 23 cm) μεταξύ των αναμιγμάτων LABREF 6137 και LABREF 6700, η μείωση του λόγου w_{eff}/c αντισταθμίστηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας του υπερρυστοποιητή στο δεύτερο ανάμιγμα (8,1 kg/m³).

Στα βιομηχανικά αναμίγματα η προσθήκη επιβραδυντή στο ΚΣ έγινε με βάση την υπάρχουσα εμπειρία παραγωγής/παράδοσης μη δομικού ΚΣ ακολουθώντας την τυπική πρακτική παραγωγής σκυροδέματος κανονικού βάρους. Σε όλα τα βιομηχανικά αναμίγματα ΚΣ η αναλογία του επιβραδυντή ρυθμίστηκε στα 0,6 kg/100 kg τσιμέντου και του υπερρυστοποιητή στα 1,2 kg/100 kg τσιμέντου.

Είναι εμφανής η επίδραση της αύξησης της περιεκτικότητας του νερού στην αύξηση της εργασιμότητας (εδώ εκφρασμένη ως εξάπλωση) των βιομηχανικών αναμιγμάτων 14046-8p. Σημειώνεται ότι απαιτείται μικρότερη περιεκτικότητα του υπερρυστοποιητή στα βιομηχανικά αναμίγματα (~ 4,7 kg/m³) σε σχέση με τα εργαστηριακά λόγω του αυξημένου διατμητικού έργου που παρέχεται από τον βιομηχανικό αναμικτήρα όπως επίσης και από την προσθήκη του επιβραδυντή που έχει και ιδιότητες ρυστοποιητή. Σε όλα τα βιομηχανικά αναμίγματα η αναλογία του επιβραδυντή ρυθμίστηκε στα 0,6 kg/ 100 kg τσιμέντου και του υπερρυστοποιητή στα 1,2 kg/ 100 kg τσιμέντου.

Θεωρώντας τυπική απόκλιση παραγωγής 3 MPa, το ανάμιγμα 14047p με αντοχή κύβου 28 ημ. 30,5 MPa ικανοποιεί την κατηγορία αντοχής LC20/22.

Οι προκαταρτικές δοκιμές έδειξαν ότι ουδεμία τροποποίηση απαιτείται στον εξοπλισμό ή στην διαδικασία για την παραγωγή δομικού ΚΣ σε σχέση με την παραγωγή του σκυροδέματος κανονικού βάρους.

3.4. Σύνοψη αποτελεσμάτων και εμπειρικοί συσχετισμοί

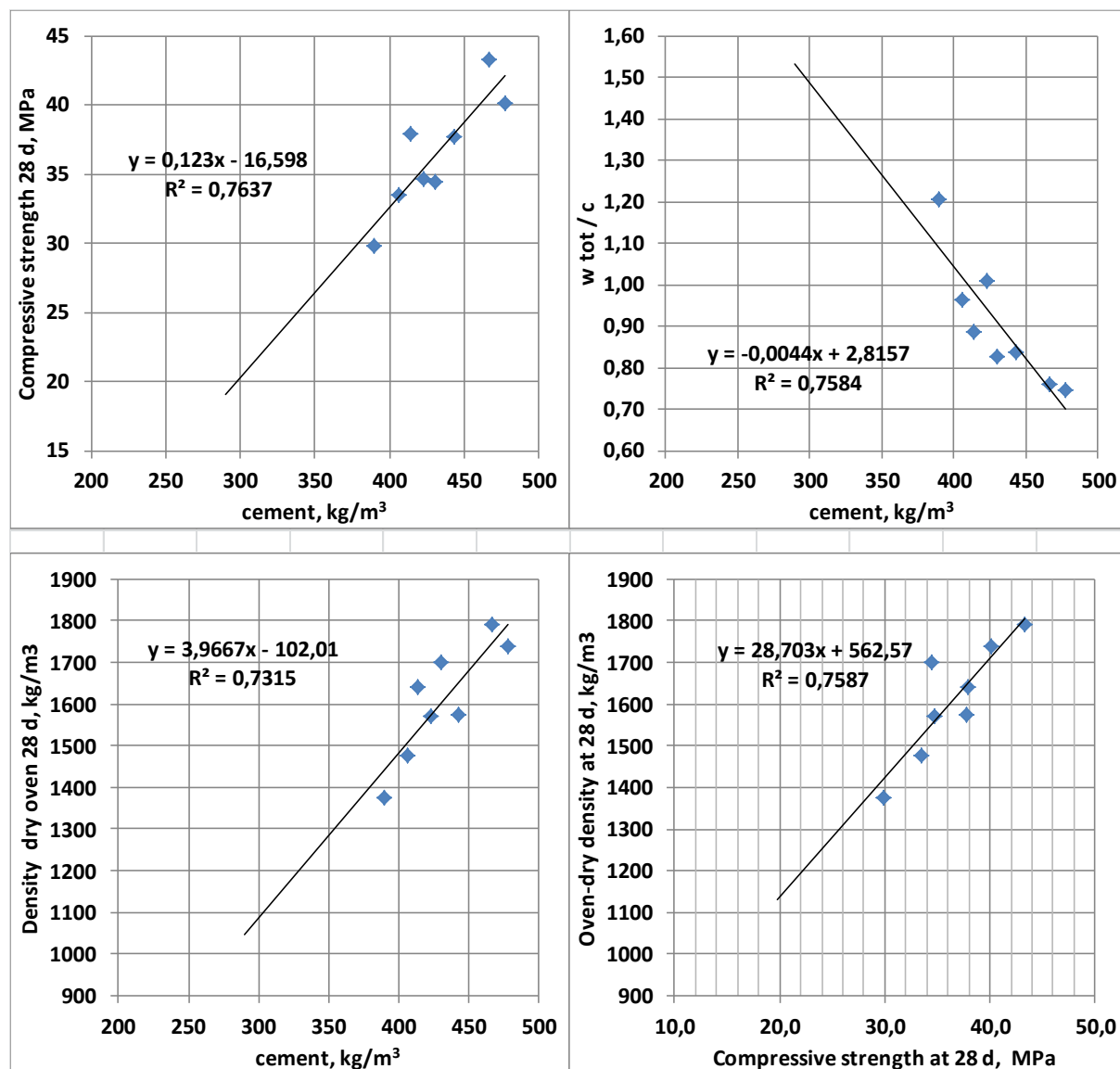
Πίνακας 3.6: Συνοπτική παρουσίαση συνθέσεων κισηροδέματος και ιδιοτήτων

		15151 p	15517 f65	15428 p	NTUA 15538 p	15488 f40	NTUA 15613 f40	15454 s	NTUA 15820 s
cement II42,5	kg/m ³	390	414	406	443	423	430	477	467
pumice 0-8 dry	kg/m ³	803	858	854	876	856	901	665	649
sand	kg/m ³							326	311
fibers	kg/m ³		65			42	42		
pumice moist.	kg/m ³	328	242	271	223	302	200	215	198
add water	kg/m ³	142	125	120	147	124	156	142	157
Superplasticizer	kg/m ³	4,6	5,0	4,9	5,3	5,0	5,2	5,8	5,6
Retarder-plasticizer	kg/m ³	2,3	2,5	2,5	2,7	2,5	2,6	2,9	2,8
wadd/c	kg/m ³	0,36	0,30	0,30	0,33	0,29	0,36	0,30	0,34
wtot/c	kg/m ³	1,21	0,89	0,96	0,84	1,01	0,83	0,75	0,76
weff/c	kg/m ³	0,37	0,28	0,29	0,29	0,31	0,29	0,29	0,32
water abs. dry-b	%	40,7	29,2	31,9	27,7	34,7	25,8	31,9	31,5
total water	kg/m ³	470	367	391	371	426	356	356	355
pumice moist. wet-b	%	29,0	22,0	24,1	20,3	26,1	18,2	24,1	23,1
sand mois. wet-b	%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
app. dens. wet	kg/m ³	1670	1712	1659	1698	1755	1737	1834	1790
air meas. v/v	%	5,2	5,8	5,1	5,9	5,1	5,1	4,2	6,4
air calc. v/v	%	4,9	11,2	10,0	9,9	5,3	10,2	6,9	8,6
slump 10 min	cm	15	11	15	15	12	15	12	15
slump 30 min	cm	15	10	15		10	20	12	11
slump 60 min	cm	20	19	16	15	8	19	11	9
slump >= 120 min adjust.	cm		17						15
app. dens. 28d wet	kg/m ³	1646	1750	1633	1693	1736	1781	1843	1859
app. dens. 28d oven dry	kg/m ³	1374	1640	1477	1576	1573	1700	1738	1791
S7	MPa	23,1	31,2	27,2	33,2	29,8	29,2	34,8	38,2
S28	MPa	29,8	37,9	33,5	37,7	34,7	34,4	40,1	43,3
S60	MPa	33,2	41,5	35,1	40,5	38,2	40,9	45,2	49,3
S7/S28		0,78	0,83	0,81	0,88	0,86	0,85	0,87	0,88
S60/S28		1,11	1,10	1,05	1,07	1,10	1,19	1,13	1,14
Flex 28	MPa	4,2	4,7	4,8	4,9	4,7	5,4	5,3	5,3
Flex 60	MPa	4,8	5,9	5,2	5,1	4,8	5,8	4,7	5,7
Braz 28	MPa	2,4	2,9	2,1		3,0		2,4	
Braz 60	MPa	2,6	3,0	3,1		3,2		3,0	
E modulus	GPa	18,3	20,7	21,1		18,5		23,8	

Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθέσεις των βιομηχανικών αναμιγμάτων ΚΣ και οι ιδιότητές τους. Επιτυγχάνεται θλιπτική αντοχή (κυβικά δοκίμια 150 mm, ηλικία 20 ημ.) στην περιοχή 29,8 – 43,3 MPa (εκτιμώμενες κατηγορίες αντοχής από LC 20/22 έως και LC 35/38), με περιεκτικότητα σε τσιμέντο από CEM II 42,5 από 390 έως 477 kg/m³ και σε κίσηρη (ξηρή μάζα) από 649 έως και 901 kg/m³. Η πυκνότητα του ξηρού σε κλίβανο ΚΣ μετρήθηκε από 1374 (κατηγορία D1,4) έως και 1791 kg/m³ (κατηγορία D1,8).

Στον Πίνακα 3.6 συγκρίνονται τα ζεύγη των αναμιγμάτων (15428 p – 15538 p), (15488 f40 – 15613 f40) (15454 s – 15820 s). Το δεύτερο μέλος του κάθε ζεύγους είναι ανάμιγμα που σκυροδετήθηκε στο ΕΟΣ/ΕΜΠ και σχεδιάσθηκε/τροποποιήθηκε με βάση το ανάμιγμα του πρώτου μέλους. Τα αναμίγματα του κάθε ζεύγους παρήχθησαν με διαφορά 3-4 εβδομάδων μέσα στην κανονική παραγωγή της μονάδας σκυροδέματος. Η συμφωνία είναι ικανοποιητική, τα ζεύγη τα αποτελέσματα δίνουν μια εκτίμηση των αποκλίσεων σε περιστασιακή παραγωγή. Οι διαφορές αναμένεται να μειωθούν όταν η παραγωγή είναι συνεχής.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται εμπειρικοί συσχετισμοί μεταξύ της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και των ιδιοτήτων του δομικού ΚΣ. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο δεν είναι η μοναδική μεταβλητή σχεδιασμού στην πράξη συσχετίζεται όμως γραμμικά με τους λόγους w/c.



Σχήμα 3.2: Εμπειρικές σχέσεις σχεδιασμού κισηροδέματος

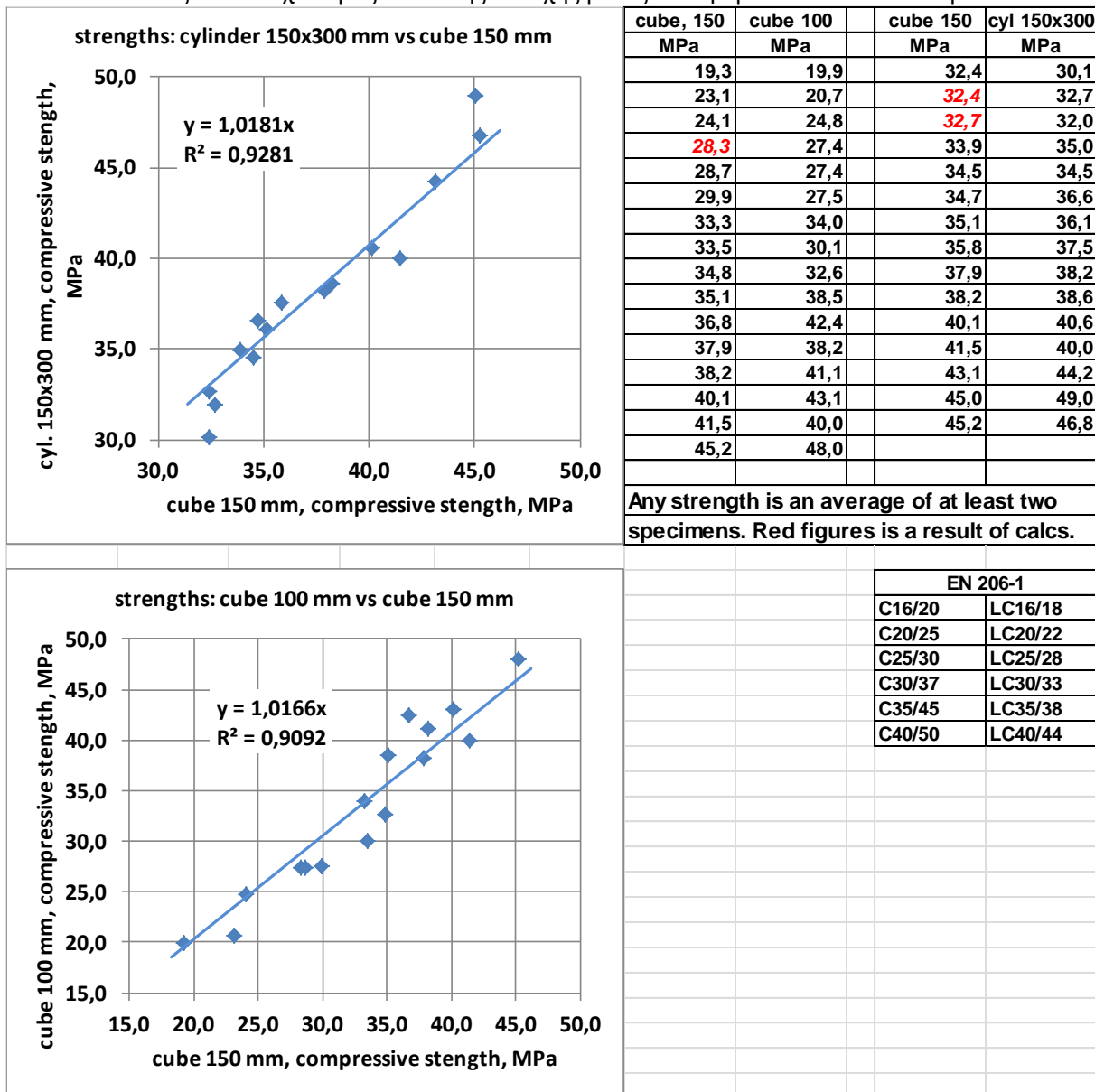
Οι συσχετισμοί αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν με καλή προσέγγιση για τις πρώτες ύλες και τις συνθήκες παραγωγής των αναμιγμάτων του παρόντος ερευνητικού έργου (υγρασία κίσηρης 18-30% w-b) και επίσης ενδεικτικά στον σχεδιασμό δομικού ΚΣ. Πχ. για απαιτούμενη αντοχή 40 MPa η πυκνότητα του ξηρού σε κλίβανο ΚΣ αναμένεται να είναι περίπου 1700 kg/m³ και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο περίπου 430 kg/m³.

3.4.1. Σχέση θλιπτικής αντοχής μεταξύ κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών

Η κατασκευή μεγάλου πλήθους δοκιμών κατά τις βιομηχανικές δοκιμές επιδιώχθηκε ώστε να μελετηθούν σε έκταση οι τεχνικές ιδιότητες του δομικού ΚΣ και οι συσχετισμοί τους και να διαμορφωθούν εμπειρικοί κανόνες για την παραγωγή, τις επιδόσεις και τις ιδιότητες του.

Η θλιπτική αντοχή των βιομηχανικών αναμιγμάτων μετρήθηκε σε κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, που αποτελούν και το μεγαλύτερο πλήθος, σε κυλινδρικά δοκίμια 150d x 300 h mm και σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm. Ο συσχετισμός των μετρήσεων (για την ίδια ηλικία δοκιμών) παρουσιάζεται στον Πιν. 3.7.

Πίνακας 3.7: Συσχετισμός θλιπτικής αντοχής μεταξύ διαφορετικών τύπων δοκιμών



Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.7 δείχνουν ότι με την χρήση των ελληνικών πρώτων υλών η σχέση θλιπτικής αντοχής μεταξύ κυλινδρικών και κυβικών δοκιμών ΚΣ διαμορφώνεται ως:

$$S_{cyl\ 150} = 1,02 S_{cub\ 150}$$

[εξ. 3.2]

όπου:

$S_{cyl\ 150}$: θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμών 150d x 300 h mm

$S_{cub\ 150}$: θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών ακμής 150 mm

Πρακτικά δηλαδή η θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών είναι ίση με την θλιπτική αντοχή των κυλινδρικών δοκιμών.

Κατά την παραγωγή των βιομηχανικών αναμιγμάτων ΚΣ ελήφθησαν περισσότερα κυλινδρικά δοκίμια από αυτά που αντιστοιχούν στις αντοχές του Πίνακα 3.7. Μερικά από αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής χωρίς να έχουν επιπεδωθεί δίνοντας μη συσχετίσιμα αποτελέσματα.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η σχέση αντοχής μεταξύ των κυβικών δοκιμών ακμής 150 mm και των δοκιμών ακμής 100 mm:

$$S_{cub\ 100} = 1,02 S_{cub\ 150} \quad [\text{εξ. 3.3}]$$

όπου:

$S_{cub\ 100}$: θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών ακμής 100 mm

Και σε αυτή την περίπτωση η θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών ακμής 150 mm είναι πρακτικά ίση με την θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών ακμής 100 mm ενώ στο σκυρόδεμα κανονικού βάρους αναμένεται η θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών ακμής 150 mm να είναι μικρότερη από την θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών ακμής 100 mm.

Η σχέση αντοχής μεταξύ κυλινδρικών και κυβικών δοκιμών της εξ. 3.2 διαφέρει από την εξαγόμενη με βάση τις κατηγορίες αντοχής ΕΣ (LC) του προτύπου EN 206-1, η οποία είναι:

$$EN\ 206-1\ S_{cyl\ 150} = 0,909 S_{cub\ 150} \quad [\text{εξ. 3.4}]$$

Όμως στο πρότυπο EN 206-1:2013/Table 13 σημειώνεται με σαφήνεια ότι για τον χαρακτηρισμό του ΕΣ η σχέση χαρακτηριστικής αντοχής του δοκιμίου αναφοράς, που είναι το κυλινδρικό δοκίμιο, και κυβικού δοκιμίου μπορεί να είναι διαφορετική εφ' όσον και τεκμηριώνεται επαρκώς.

Για την σύγκριση σχολιάζονται παρακάτω σχετικά αποτελέσματα από το ερευνητικό έργο EuroLightCon, στο οποίο οι αναφορές σε ΚΣ είναι λίγες. Από τα δεδομένα της τεχνικής έκθεσης BE3942R17 Properties of LWAC made with natural lightweight aggregates /Graph 3, που αφορούν ΚΣ με κίσηρη Ισλανδίας και άμμο, εξάγεται η σχέση εξ. 3.5:

$$EuroLightCon\ S_{cyl\ 150} = 0,935 S_{cub\ 100} \quad [\text{εξ. 3.5}]$$

Στην ίδια τεχνική έκθεση (p. 16) γίνεται αναφορά σε άλλη τεχνική έκθεση κατά την οποία η σχέση αντοχής ελαφροβαρούς σκυροδέματος μεταξύ κυβικών δοκιμών ακμής 150 mm και κυβικών δοκιμών ακμής 100 mm είναι:

$$EuroLightCon\ S_{cub\ 150} = 0,981 S_{cub\ 100} \quad [\text{εξ. 3.6}]$$

Από τις εξ. 3.5 και 3.6 συνάγεται:

$$EuroLightCon\ S_{cyl\ 150} = 0,935/0,981 S_{cub\ 150} = 0,953 S_{cub\ 150} \quad [\text{εξ. 3.7}]$$

Με βάση τον προηγούμενο σχολιασμό τα βιομηχανικά αναμίγματα θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν όπως στον Πίνακα 3.8 με την παραδοχή τυπικής απόκλισης 3 MPa.

Πίνακας 3.8: Κατηγορία αντοχής βιομηχανικών αναμιγμάτων

		15151 p	15517 f65	15428 p	NTUA 15538 p	15488 f40	NTUA 15613 f40	15454 s	NTUA 15820 s
S28 cube 150 mm	MPa	29,8	37,9	33,5	37,7	34,7	34,4	40,1	43,3
S28 cube 150 mm - 1,64*3	MPa	24,9	32,9	28,6	32,8	29,8	29,5	35,2	38,4
EN 206-1 typical		LC 20/22	LC 25/28	LC 25/28	LC 25/28	LC 25/28	LC 25/28	LC 30/33	LC 35/38
Current results acc. EN 206-1, Table 13, note a		LC 20/20	LC 30/30	LC 25/25	LC 30/30	LC 25/25	LC 25/25	LC 35/35	LC 35/35

3.4.2. Σχέση καμπτικής αντοχής μεταξύ πρισματικών δοκιμών

Για την μέτρηση της καμπτικής αντοχής κατά ASTM C 78 χρησιμοποιήθηκαν κυρίως πρισματικά δοκίμια 100x100x500 mm. Στα αναμίγματα 15428 p και 15454 s κατασκευάστηκαν επίσης πρισματικά δοκίμια 150x150x600 mm για την σύγκριση των αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στον Πιν.3.9.

Πίνακας 3.9: Σύγκριση καμπτικής αντοχής μεταξύ πρισματικών δοκιμών

Flexural strength ASTM C 78			
	100x100x500 mm	150x150x600 mm	Δ
	MPa	MPa	MPa
age, d	15428 p		
7	3,3		
28	4,8	4,0	0,8
35		3,3	
38		4,0	
59	5,2	4,3	0,9
	15454 s		
7	5,4	4,8	0,6
28	5,3	5,5	-0,1
59	4,7	5,1	-0,5

Εύκολα και χωρίς την χρήση στατιστικών μεθόδων φαίνεται να μην υπάρχει συσχέτιση, αποτέλεσμα που αποδίδεται στο μικρό πλήθος των δοκιμών με κοινή ηλικία (5) και κυρίως στο μικρό εύρος τιμών της καμπτικής αντοχής (5,4-4,7= 0,7 MPa). Το εύρος των τιμών 0,7 MPa είναι μόλις το διπλάσιο της τυπικής απόκλισης της μέτρησης της καμπτικής αντοχής. Η τυπική απόκλιση υπολογίσθηκε ίση με 0,34 MPa.

Από τα δύο μεγέθη προτιμήθηκε η χρήση μητρών και δοκιμών με διάσταση 100x100x500 mm επειδή είναι πλέον διαχειρίσιμα τόσο για τις διαστάσεις όσο και για το βάρος.

3.4.3. Σχόλια σχετικά με την πυκνότητα

Η πυκνότητα χαρακτηρίζει το ΚΣ ως ελαφροβαρές σκυρόδεμα. Όταν επικρατούν συνθήκες διατήρησης του νερού ανάμιξης η πυκνότητα του νωπού ΚΣ δεν μεταβάλλεται στην κατάσταση σκλήρυνσης. Σημειώνεται ότι επειδή το νωπό ΚΣ περιέχει αέρα η πυκνότητά του είναι μικρότερη από την πυκνότητα του κορεσμένου ΚΣ. Η ξηρή σε κλίβανο (110±5 °C) είναι η πυκνότητα αναφοράς για το ΕΣ. Και οι δύο πυκνότητες που αναφέρθηκαν προσδιορίζονται με εργαστηριακές μεθόδους.

Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μετρήσεις πυκνότητας των βιομηχανικών αναμιγμάτων ΚΣ σε δοκίμια συντηρημένα σε υγρό θάλαμο και σε ξηραμένα σε κλίβανο δοκίμια. Οι μετρήσεις αυτές

αποτελούν και μια ένδειξη της επαναληψιμότητας της συμπύκνωσης των δοκιμών.

Στα υγρά δοκίμια των αναμιγμάτων με κίσηρη (ρ) ή με κίσηρη και άμμο (s) η τυπική απόκλιση των μετρήσεων προσδιορίστηκε από 14 έως και 28 kg/m³. Οι τιμές αυτές φαίνεται να συμφωνούν με το κριτήριο συμμόρφωσης του EN 206-1:2013/Table 22 για μια μέτρηση/δοκιμή: για την πυκνότητα ΕΣ η μέγιστη αποδεκτή απόκλιση είναι ±30 kg/m³ από τις οριακές τιμές ή από την ανοχή για μια ορισμένη τιμή ή από τα όρια μιας κατηγορίας.

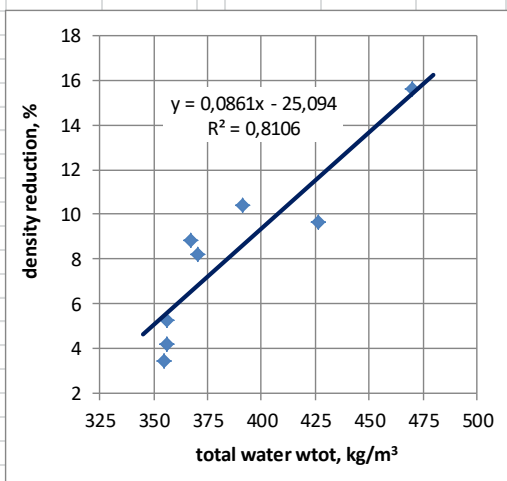
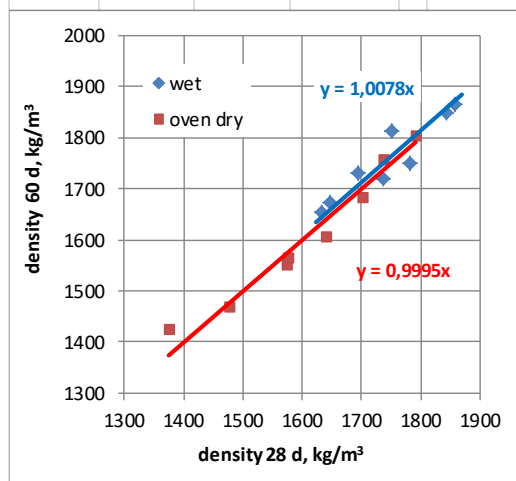
Η τυπική απόκλιση εμφανίζεται αυξημένη στην περίπτωση του ΚΣ με ίνες (f) από 23 έως και 45 kg/m³, που αποδίδεται στην δυσκολία συμπύκνωσης των δοκιμών με ράβδο.

Η πυκνότητα δοκιμών δεν μεταβάλλεται από την ηλικία των 28 στην ηλικία των 60 ημερών, όπως φαίνεται και στο αριστερό σχήμα του Πιν. 3.10 (μπλε σημεία για τα υγρά δοκίμια, κόκκινα για τα ξηραμένα σε κλίβανο δοκίμια).

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η ποσοστιαία μείωση της πυκνότητας μεταξύ υγρών και ξηρών σε κλίβανο δοκιμών προσδιορίζεται από 3,5 έως 15% και είναι ανάλογη της συνολικής περιεκτικότητας σε νερό του αναμίγματος, όπως φαίνεται και στο δεξί σχήμα του Πιν.3.10.

Πίνακας 3.10: Πυκνότητα δοκιμών συντηρημένων σε υγρό θάλαμο και δοκιμών ξηρών σε κλίβανο

	Density wet	st dev	number of double specimens	Density wet 28 d	Density oven dry 28 d	Density wet 60 d	Density dry oven 60 d	Total water, w _{tot}	Density wet 10x10x50	Density oven dry 10x10x50	Density reduction
	kg/m ³	kg/m ³		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
15151 p	1643	14	18	1646	1374	1672	1426	470	1659	1400	15,6
15428 p	1634	22	30	1633	1477	1654	1469	391	1644	1473	10,4
15454 s	1831	23	29	1843	1738	1848	1758	356	1846	1748	5,3
15488 f40	1732	23	19	1736	1573	1721	1552	426	1729	1562	9,6
15517 f65	1763	31	21	1750	1640	1813	1608	367	1782	1624	8,9
NTUA 15538 p	1681	27	6	1693	1576	1730	1565	371	1711	1571	8,2
NTUA 15613 f40	1727	45	6	1781	1700	1750	1683	356	1766	1692	4,2
NTUA 15820 s	1828	28	6	1859	1791	1865	1805	355	1862	1798	3,4



Η απώλεια της περιεχόμενης υγρασίας από το σκληρυμένο ΚΣ σε ισορροπία με το περιβάλλον είναι αργή, εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης (εκτιθέμενη επιφάνεια, επικάλυψη, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, συντελεστές μεταφοράς μάζας, διαστάσεις δομικών στοιχείων κλπ). **Σύμφωνα την παράγραφο 4.4.2 του προτύπου ACI 213R-03 Guide for Standard Practice for Structural Lightweight Aggregate Concrete τα**

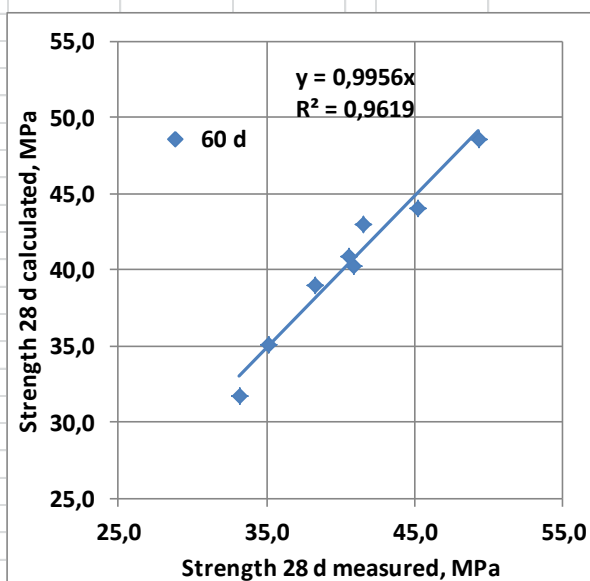
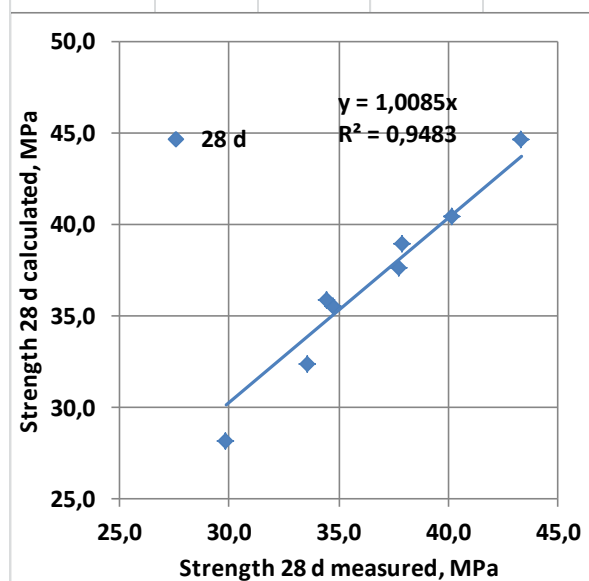
νεκρά φορτία (self loads) που υπεισέρχονται στον δομικό σχεδιασμό πρέπει να υπολογίζονται με βάση την πυκνότητα ισορροπίας (equilibrium density). Ως πυκνότητα ισορροπίας θεωρείται εκείνη που επιτυγχάνεται μετά από ξήρανση 90 ημερών ξήρανση στο περιβάλλον. Η πυκνότητα ισορροπίας (equilibrium density) υπολογίζεται από την ξηρή σε κλίβανο πυκνότητα αυξημένη κατά 50 kg/m³. Αντίστοιχες μετρήσεις σε δοκίμια των βιομηχανικών αναμιγμάτων βρίσκονται σε συμφωνία με τον υπολογισμό.

3.4.4. Εκτίμηση αντοχής 28 ημ.

Οι μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής στα κυβικά δοκίμια 150 mm από την ηλικία των 3 ημ. έως και την ηλικία των 90 ημ. παρείχαν μεγάλο πλήθος δεδομένων για την ανάπτυξη ενός απλού λογαριθμικού μοντέλου ανάπτυξης αντοχών στο δομικό ΚΣ. Τα λογαριθμικά μοντέλα είναι συνήθη για την περιγραφή της ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής στα υδραυλικά σκληρυνόμενα υλικά.

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα μετρούμενων και υπολογιζόμενων θλιπτικών αντοχών από το λογαριθμικό μοντέλο ανάπτυξης αντοχών

		15151 p	15428 p	NTUA 15538 p	15488 f40	NTUA 15613 f40	15517 f65	15454 s	NTUA 15820 s
S7 meas	MPa	23,1	27,2	33,2	29,8	29,2	31,2	34,8	38,2
S7 calc	MPa	21,7	27,1	32,4	29,3	27,7	31,2	33,6	37,4
S28 meas	MPa	29,8	33,5	37,7	34,7	34,4	37,9	40,1	43,3
S28 calc	MPa	28,2	32,3	37,6	35,6	35,9	38,9	40,4	44,6
S60 meas	MPa	33,2	35,1	40,5	38,2	40,9	41,5	45,2	49,3
S60 calc	MPa	31,7	35,1	40,8	39,0	40,2	43,0	44,1	48,6
S7/S28 meas		0,78	0,81	0,88	0,86	0,85	0,83	0,87	0,88
S7/S28 calc		0,77	0,84	0,86	0,82	0,77	0,80	0,83	0,84
S60/S28 meas		1,11	1,05	1,07	1,10	1,19	1,10	1,13	1,14
S60/S28 calc		1,13	1,09	1,08	1,10	1,12	1,11	1,09	1,09
k1	MPa	28,2	32,3	37,6	35,6	35,9	38,9	40,4	44,6
k2		1,18	2,26	2,47	1,96	1,21	1,61	2,12	2,30
$S(t)=k1*(\log(t)+k2)/(\log(28)+k2)$									



Ως πλέον διαχειρίσιμο κατασκευάσθηκε το μοντέλο της εξ. 3.8 στο οποίο η παράμετρος k_1 δίνει αμέσως την υπολογιζόμενη αντοχή των 28 ημ.

$$S(t) = k_1 * (\log(t) + k_2) / (\log(28) + k_2) \quad [\text{εξ. 3.8}]$$

όπου:

$S(t)$: αντοχή κύβου σε ηλικία t ημερών, MPa

t : ηλικία, d(ays)

k_1, k_2 : παράμετροι

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων k_1, k_2 για κάθε ανάμιγμα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων SSQ:

$$SSQ = \sum (S(t)_{\text{meas}} - S(t)_{\text{calc}})^2 \quad [\text{εξ. 3.9}]$$

όπου:

$S(t)_{\text{meas}}$: μετρούμενη αντοχή δοκιμίων, MPa

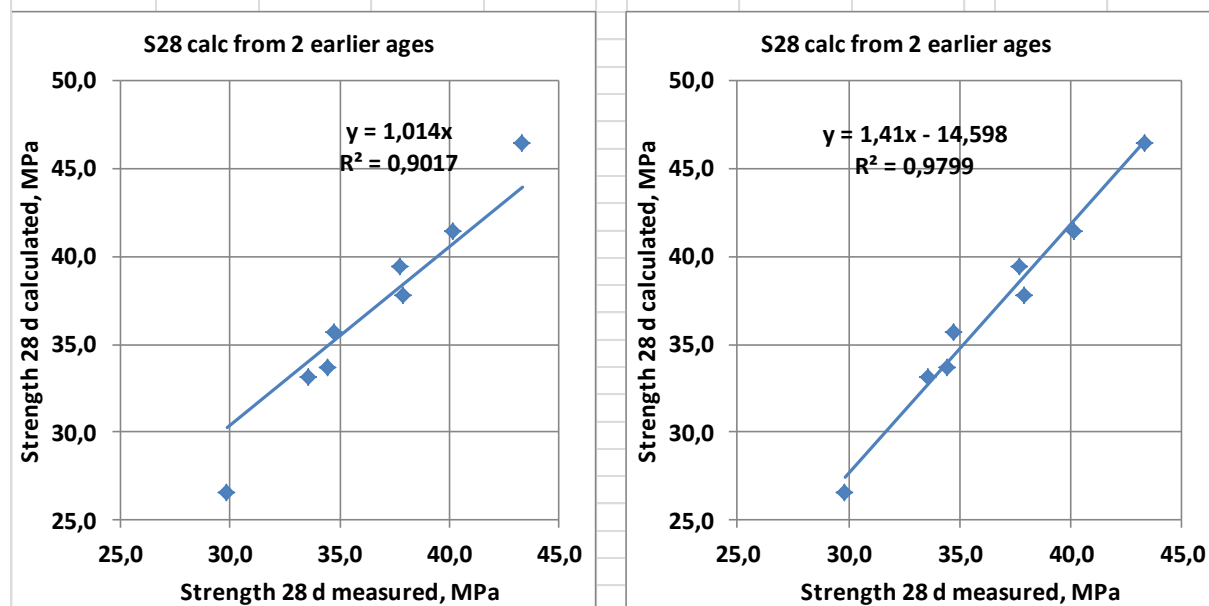
$S(t)_{\text{calc}}$: υπολογιζόμενη αντοχή δοκιμίων, MPa

Με την χρήση των δεδομένων αντοχής όλων των ηλικιών εκτιμήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων k_1 και k_2 όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.12 για κάθε ανάμιγμα. Στα δύο σχήματα του Πίνακα 3.12 φαίνεται επίσης η καλή συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων αντοχών και η επάρκεια του μοντέλου.

Στην πράξη ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση της αντοχής στην ηλικία των 28 ημ. από δεδομένα αντοχών νεώτερων ηλικιών (πχ 3 και 7 ημερών). Χρησιμοποιώντας ως τιμή του συντελεστή k_2 την μέση τιμή των συντελεστών k_2 των αναμιγμάτων $k_2=1,890$ υπολογίζεται με καλή προσέγγιση η αντοχή των 28 ημ. όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα και τα σχήματα του Πίνακα 3.12. Στον Πίνακα 3.12 φαίνονται οι δύο πρώτες ηλικίες για τις οποίες μετρήθηκε η αντοχή στο κάθε ανάμιγμα, η μετρούμενη αντοχή και η υπολογιζόμενη αντοχή στην ηλικία των 28 ημ.

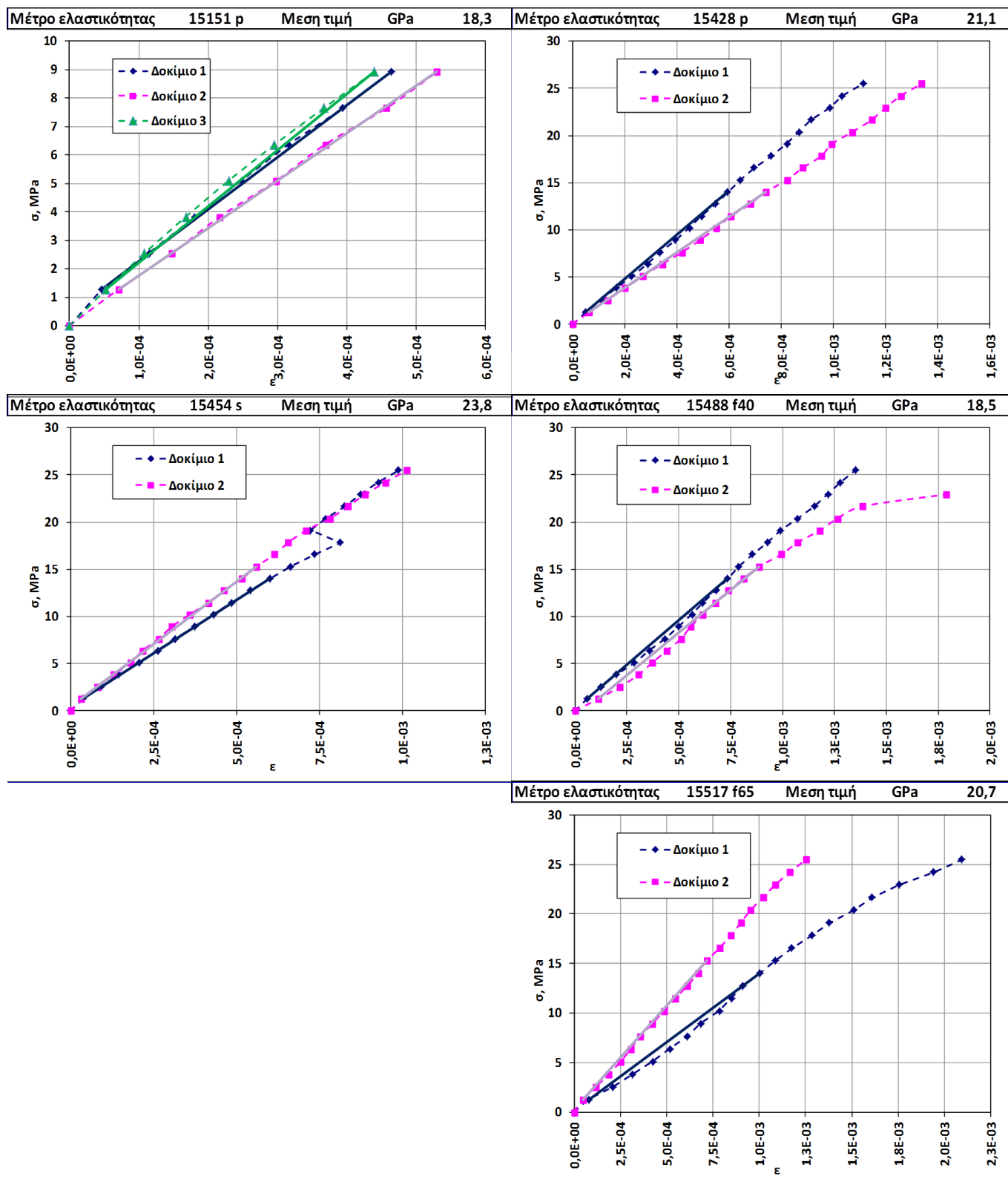
Πίνακας 3.12: Υπολογιζόμενες θλιπτικές αντοχές 28 ημ. από δύο νεώτερες ηλικίες

		15151 p	15428 p	NTUA 15538 p	15488 f40	NTUA 15613 f40	15517 f65	15454 s	NTUA 15820 s
age 1	d	5	6	3	4	3	3	4	3
S(age1)	MPa	19,3	26,4	27,8	26,1	22,1	26,5	29,9	32,9
age 2	d	7	7	8	7	7	7	7	7
S(age2)	MPa	23,1	27,2	33,2	29,8	29,2	31,2	34,8	38,2
k2		1,890	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890
S28 meas	MPa	29,8	33,5	37,7	34,7	34,4	37,9	40,1	43,3
S28 calc	MPa	26,6	33,1	39,5	35,7	33,7	37,8	41,4	46,5



3.4.5. Σχόλια σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκε στο ΕΚΕΤ σε κυλινδρικά δοκίμια 100d x 200h mm στα αναμίγματα 15151 p, 15428 p, 15454 s, 15488 f40, 15517 f65 σύμφωνα με την μέθοδο ASTM C 469-02. Μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας σε κυλινδρικά και σε μεγάλα δοκίμια έγινε επίσης από το ΕΟΣ/ΕΜΠ.



Σχήμα 3.3 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης

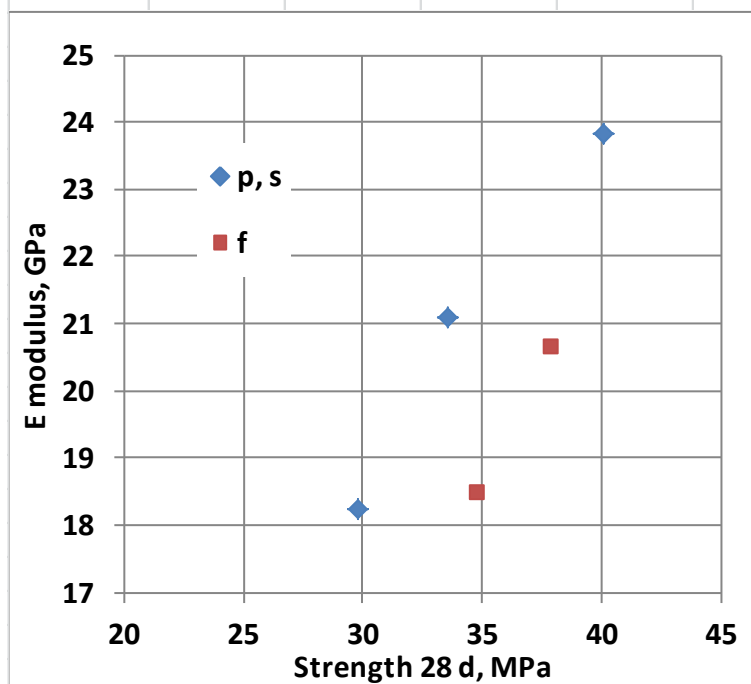
Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης, με μέγιστη τάση έως το 40% της τάσης θραύσης του δοκιμίου σε τρεις κύκλους φόρτισης/αποφόρτισης. Για την πληρότητα των μετρήσεων κατά την τελευταία φόρτιση το φορτίο ξεπέρασε εκείνο των δύο προηγούμενων φορτίσεων.

Τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης και η ποιότητα των μετρήσεων φαίνονται στο Σχήμα 3.3. Η σχέση τάσης παραμόρφωσης είναι γραμμική, οι τρεις κύκλοι φόρτισης/αποφόρτισης για το ίδιο δοκίμιο δίνουν επαναλήψιμες μετρήσεις, εμφανίζονται όμως αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων διαφορετικών δοκιμίων.

Στον Πίνακα 3.13 και στο σχετικό σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του μέτρου ελαστικότητας και η σχέση τους με την θλιπτική αντοχή. Το μέτρο ελαστικότητας βρίσκεται στην περιοχή 18,3 έως και 23,8 GPa με τυπική απόκλιση μεταξύ μετρήσεων σε διαφορετικά δοκίμια του ίδιου αναμίγματος από 0,4 έως και 3,5 GPa. Στο ερευνητικό έργο EuroLightCon, δεν περιέχονται δεδομένα μέτρου ελαστικότητας για το ΚΣ. Από τους πίνακες συνάγεται ότι για ΕΣ θλιπτικής αντοχής περί τα 60 MPa το μέτρο ελαστικότητας είναι περί τα 24 GPa (BE3942R09 Technical and economic mixture optimisation of high strength LWAC), που βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις του Πίνακα 3.13.

Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα μετρήσεων μέτρου ελαστικότητας

	strength 28 d	age	E modulus				
			1	2	3	mean	s
	MPa	d	GPa			GPa	GPa
15151 p	29,8	35	18,3	16,6	19,8	18,3	1,6
15428 p	33,5	90	23,4	18,8		21,1	3,2
15454 s	40,1	90	21,4	26,3		23,8	3,5
15488 f40	34,7	90	18,8	18,2		18,5	0,4
15517 f65	37,9	90	14,0	20,7		20,7	---



Το πλήθος των αποτελεσμάτων δεν επιτρέπει τον αξιόπιστο συσχετισμό αντοχών και μέτρου ελαστικότητας. Στο σχήμα του Πίνακα 3.13 διακρίνονται δύο ομάδες συσχετισμού. Η μία περιλαμβάνει τα αναμίγματα με μόνο κίσηρη ή κίσηρη και άμμο και η δεύτερη τα αναμίγματα με ίνες. Πάντως και στις δύο ομάδες το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αντοχή του ΚΣ.

3.5. Αναφορά στα πρότυπα ACI 211.2-98 και ACI 213R-03

Η πολυετής συσσώρευση γνώσης και εφαρμογής του δομικού σκυροδέματος με ελαφροβαρή αδρανή στις ΗΠΑ είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ιδιαίτερα περιεκτικών σε πληροφορία προτύπων. Μεταξύ αυτών γίνεται κατ' οικονομίαν αναφορά στα:

- ACI 211.2-98 (reapproved 2004) Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete
- ACI 213R-03 Guide for Standard Practice for Structural Lightweight Aggregate Concrete

Όπως και στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε, ομοίως και στο πρότυπο ACI 211.2-98 παρ.2.1.1 αναφέρεται ότι οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στις διαδικασίες σύνθεσης σκυροδέματος και ελέγχου παραγωγής, σε σχέση με το ΣΚΠ, είναι η σημαντικά μεγαλύτερη απορροφητικότητα των περισσότερων ελαφροβαρών αδρανών και ο διαφορετικός ρυθμός απορρόφησης νερού.

Στην παρ.2.1.3 του ίδιου προτύπου αναφέρεται ότι στην περίπτωση ελαφροβαρών αδρανών με μικρό αρχικό ποσοστό υγρασίας (συνήθως μικρότερο από 8 έως 10%) και σχετικά υψηλό ρυθμό απορρόφησης προτείνεται η προανάμιξη των αδρανών με ποσότητα νερού ίση με το 1/2 έως και τα 3/4 της τελικής ποσότητας. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε στην σειρά προσθήκης των συστατικών του σκυροδέματος στον αναμικτήρα. Στην περίπτωση των βιομηχανικών αναμιγμάτων από το 15151 ρ και μετά η περιεχόμενη υγρασία της κίσηρης ήταν μεγαλύτερη από 18% w-b οπότε και η απομένουσα απορροφητικότητα ήταν μικρή (βλ. παρ. 11).

Οι μετρήσεις θλιπτικής αντοχής των βιομηχανικών αναμιγμάτων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο βρίσκονται σε συμφωνία με το πρότυπο ACI 211.2-98 Fig. 3.1 και Fig. 3.3.

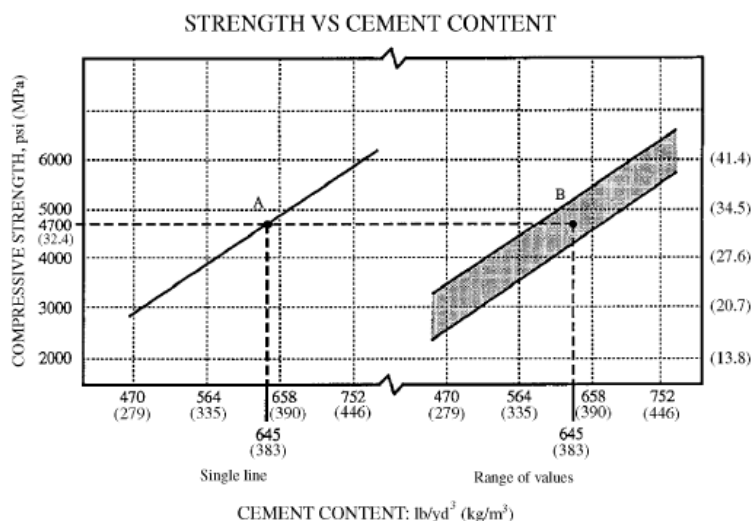


Fig. 3.3—Strength versus cement content.

Σχήμα 3.4: Σχέση της αντοχής ΕΣ με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο στο ACI 211.2-98 Fig. 3.3

Έχει ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι η σχέση (single line) μεταξύ περιεκτικότητας σε τσιμέντο και αντοχής ΕΣ υπολογίζεται από το Σχ.3.4:

$$S_{con} = 0,124 c - 14,9$$

ACI 211.2-

[εξ. 3.10]

όπου:

S_{con} : αντοχή ΕΣ, MPa

c: περιεκτικότητα σε τσιμέντο, kg/m³

που είναι απολύτως συγκρίσιμη με την αντίστοιχη εμπειρική σχέση της παραγράφου 3.4, Σχ.3.2:

$$S_{con} = 0,123 c - 16,6$$

Σχ.3.2

[εξ.3.11]

Τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας που φαίνονται στον Πίνακα 3.13, 18,3 έως 21,1 GPa για ΚΣ μόνο με κίσηρη και 23,8 GPa για ΚΣ με κίσηρη και άμμο βρίσκονται σε καλή συμφωνία με το αντίστοιχο διάγραμμα του προτύπου ACI 213R-03 Fig. 4.2 (Σχήμα 3.5) που συσχετίζει το μέτρο ελαστικότητας με την αντοχή. Επίσης οι μετρήσεις της αντοχής σε διάρρηξη EN 12390-6 Brazilian (παράγραφος 8), από 2,1 έως 3 MPa στην ηλικία των 28 ημερών και της καμπτικής αντοχής ASTM C 78 (παράγραφοι 8 και 10), από 4,2 έως 5,4 MPa, βρίσκονται στην περιοχή τιμών των διαγραμμάτων του ACI 213R-03 Fig. 4.7 και 4.9 (Σχήμα 3.6 και 3.7).

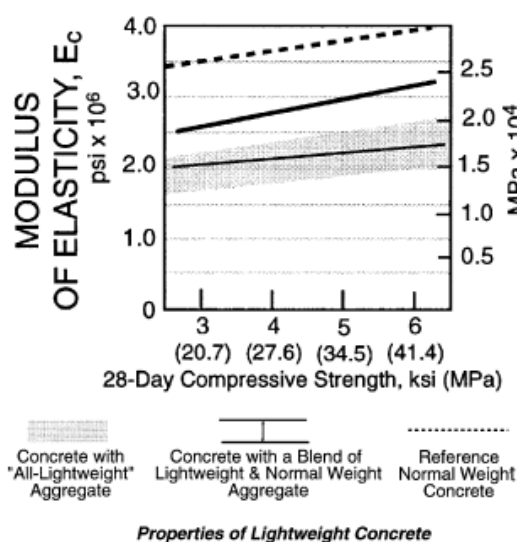


Fig. 4.2—Modulus of elasticity.

Σχήμα 3.5: Σχέση του μέτρου ελαστικότητας του ΕΣ με την αντοχή στο ACI 213R-03 Fig. 4.2

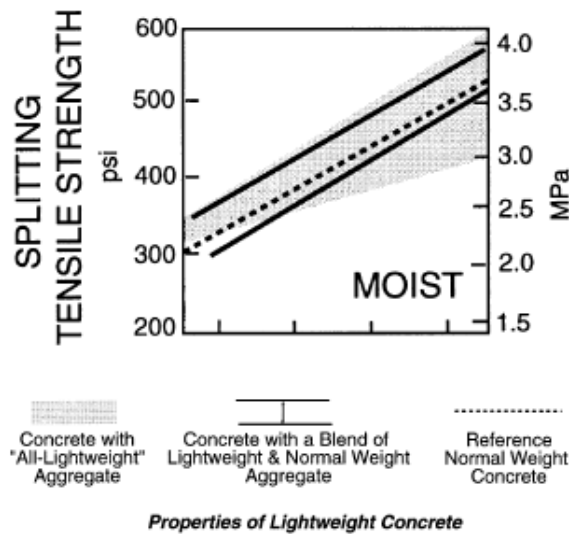


Fig. 4.7—Splitting tensile strength: moist-cured concrete.

Σχήμα 3.6: Σχέση της αντοχής σε διάρρηξη (Brazilian) του ΕΣ με την θλιπτική αντοχή στο ACI 213R-03 Fig. 4.7

Η δοκιμή αντλησιμότητας έγινε με επιτυχία στο βιομηχανικό ανάμιγμα NTUA 15820 s για την κατασκευή των προεντεταμένων δοκών στο ΕΟΣ/ΕΜΠ. Όλα βιομηχανικά αναμίγματα από το 15151 p και μετά ικανοποιούν ολικώς ή μερικώς τους παρακάτω γενικούς κανόνες που υποδεικνύονται από το πρότυπο ACI 213R-03 παράγραφος 3.7.2:

- Προϋγρανση της κίσηρης. Περιείχε ποσοστό φυσικής υγρασίας μεγαλύτερο από 18% w-b.
- Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο 335 kg/m³.
- Κατάλληλα πρόσθετα εργασιμότητας σκυροδέματος.
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα. Πέρασμα 80% στα 4 mm (Πιν.3.3).
- Περιεκτικότητα σε τσιμέντο κατάλληλη για να δίνει στην θέση διάστρωσης κάθιση 100 – 150 mm.

- Περιεκτικότητα σε τσιμέντο κατάλληλη για να δίνει κάθιση 100 – 150 mm στην θέση διάστρωσης.
- Φυσική άμμος καλά διαμορφωμένων κόκκων με μέτρο λεπτότητας 2.2 έως και 2,7. Με παρεμβολή των ανοιγμάτων 4,75, 2,38, 1,19, 0,59, 0,30 και 0,15 mm στην κοκκομετρική κατανομή του Πίνακα 3.3 εκτιμάται το μέτρο λεπτότητας για την θραυστή άμμο ίσο με 2,9 κοντινό στο συνιστώμενο άνω όριο 2,7. Κατάλληλη επιλογή της κοκκομετρίας της άμμου αναμένεται να δώσει ακόμη καλύτερη αντλησιμότητα.
- Χρήση κατάλληλου συνδυασμού χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών. Στην περίπτωση των βιομηχανικών αναμιγμάτων χρησιμοποιήθηκε το προϊόν κίσηρης 0/8 mm το οποίο εξάγεται και για εφαρμογές δομικού ΚΣ.

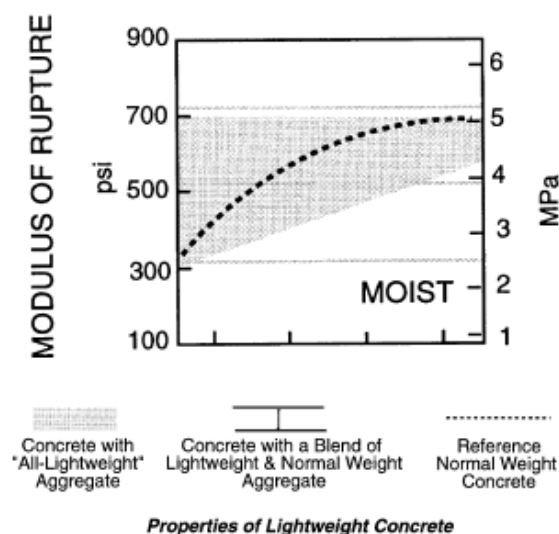


Fig. 4.9—Modulus of rupture: normally cured concrete.

Σχήμα 3.7: Σχέση της καμπτικής αντοχής του ΕΣ με την θλιπτική αντοχή στο ACI 213R-03 Fig. 4.9

Αξίζει επίσης να σημειωθούν οι βασικοί κανόνες που υποδεικνύονται από το πρότυπο 213R-03 για το σύστημα άντλησης:

- Χρησιμοποιούμε σωληνώσεις ελάχιστης διαμέτρου 125 mm.
- Οι σωληνώσεις πρέπει να είναι καθαρές, της ίδιας διαμέτρου, και συνιστάται να έχει προηγηθεί «λίπανση» των εσωτερικών επιφανειών με τροφοδοσία ενέματος.
- Αποφεύγουμε την απότομη μείωση διαμέτρου στις σωληνώσεις.
- Μειώνουμε την πίεση λειτουργίας:
 - Μειώνοντας τον ρυθμό διάστρωσης.
 - Χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μήκος χαλύβδινων σωληνώσεων και μικρότερο μήκος πλαστικών σωληνώσεων.
 - Περιορίζοντας το πλήθος των γωνιών.
 - Ακινητοποιώντας τις σωληνώσεις στις γωνίες

3.6. Συμπεράσματα κεφαλαίου 3

Από την εκτέλεση βιομηχανικών δοκιμών για την παραγωγή δομικού ΚΣ συνάγεται ότι:

- Με την χρήση κίσηρης ΛΑΒΑ ΑΕ κοκκομετρίας 0/8 mm και περιεκτικότητα σε τσιμέντο CEM II42,5 από 390 έως και 477 kg/m³ παράγεται σε μονάδα σκυροδέματος δομικό ελαφροβαρές σκυρόδεμα με κατηγορίες αντοχής κατά EN 206-1 από LC20/22 έως και LC35/38 η και μεγαλύτερες με τον κατάλληλο σχεδιασμό.
- Ουδεμία τροποποίηση απαιτείται στον εξοπλισμό ή στην παραγωγική διαδικασία μιας μονάδας παραγωγής σκυροδέματος κανονικού βάρους για την παραγωγή δομικού ΚΣ
- Το δομικό ΚΣ μπορεί να είναι ινοπλισμένο ή να περιέχει και θραυστή άμμο για την επίτευξη οικονομικών συνθέσεων για προεντεταμένα στοιχεία.
- Η πυκνότητα των παραγομένων συνθέσεων βρίσκεται στην περιοχή των τιμών του ελαφροβαρούς σκυροδέματος κατά EN 206-1 από D1,4 έως και D1,8.
- Η διατήρηση της εργασιμότητας του νωπού δομικού ΚΣ επιτυγχάνεται για τουλάχιστον 3 h με την χρήση συνήθων προσθέτων σκυροδέματος (επιβραδυντής πήξης, μειωτής νερού, υπερρρευστοποιητής) και την προσθήκη υπερρρευστοποιητή έργου.
- Η μεταφορά και διάσπρωση του δομικού ΚΣ δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες του σκυροδέματος κανονικού βάρους.
- Το δομικό ΚΣ είναι αντλήσιμο.
- Οι βιομηχανικές δοκιμές έδειξαν ελεγχόμενη επαναληψιμότητα στην σύνθεση και στις ιδιότητες του δομικού ΚΣ η οποία μπορεί να βελτιωθεί στην κανονική παραγωγή.
- Διαμορφώθηκαν εμπειρικοί κανόνες σχεδιασμού δομικού ΚΣ ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πυκνότητα και αντοχή.
- Σε μεγάλο πλήθος μικρών δοκιμών έγιναν εργαστηριακές δοκιμές σε ηλικίες δομικού ΚΣ από 3 έως και 90 ημ. και προσδιορίστηκαν και συσχετίστηκαν οι τεχνικές ιδιότητες των διαφόρων συνθέσεων.
 - Θλιπτική αντοχή σε κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια.
 - Πυκνότητα νωπού και ξηρού σε κλίβανο ΚΣ.
 - Αντοχή σε διάρρηξη.
 - Καμπτική αντοχή σε πρισματικά δοκίμια.
 - Μέτρο ελαστικότητας.
 - Έγινε εκτίμηση της επαναληψιμότητας/αβεβαιότητας των μετρήσεων.
- Αναπτύχθηκε ημ εμπειρική σχέση για την απορροφητικότητα της κίσηρης στο σύστημα του ΚΣ.
- Αναπτύχθηκε μοντέλο που συσχετίζει την θλιπτική αντοχή με την ηλικία του ΚΣ. Με το μοντέλο είναι δυνατή η πρόβλεψη της αντοχής των 28 ημερών από την αντοχή δύο νεώτερων ηλικιών.
- Ο σχεδιασμός των συνθέσεων δομικού ΚΣ με κίσηρη 0/8 της ΛΑΒΑ ΑΕ, η παραγωγή, μεταφορά, άντληση και διάσπρωση, οι ιδιότητές του και οι συσχετισμοί τους βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206 και τα αμερικανικά πρότυπα ACI.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

4. Κανονιστικό Πλαίσιο

4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κυριότερες παράγραφοι του Ευρωκώδικα 2 (EC2) για το ΕΣ, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή την εργασία.

Πυκνότητα [EC2, §11.3.1 (1)]

Στο EN 206-01 το ΕΣ κατηγοριοποιείται ανάλογα με την πυκνότητά του σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14 του EN 206). Εναλλακτικά, μπορεί η πυκνότητα να ορίζεται με μία επιθυμητή τιμή.

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες πυκνότητας και αντίστοιχες πυκνότητες σχεδιασμού του ΕΣ σύμφωνα με το EN 206-01 [EC2, Πίνακας 11.1]

Κατηγορία πυκνότητας		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Πυκνότητα (kg/m ³)		801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000
Πυκνότητα Σχεδιασμού	Άοπλο σκυρόδεμα	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Όπλ.σκυρόδεμα	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Εφελκυστική Αντοχή [EC2, §11.3.1 (3)]

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα ακριβέστερα δεδομένα, η εφελκυστική αντοχή f_{ct} πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \frac{\rho}{2200} \quad (\text{εξ. 4.1})$$

όπου

ρ το άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία (Πίνακας 4.1)

Πίνακας 4.2 : Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης για το ΕΣ

Κατηγορίες αντοχών ελαφροσκυροδέματος														Αναλυτική σχέση / επεξήγηση	
f_{tck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80		
$f_{tck,cube}$	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	66	77	88		
f_{tcm} (MPa)	17	22	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	Για $f_{tck} \geq 20$ MPa $f_{tcm} = f_{tck} + 8$ (MPa)	
f_{tctm} (MPa)	$f_{tctm} = f_{tcm} \cdot \eta_1$													$\eta_1 = 0,40 +$ $0,60\rho/2200$	
$f_{tctk,0,05}$ (MPa)	$f_{tctk,0,05} = f_{tck,0,05} \cdot \eta_1$													κάτω όριο 5%	
$f_{tctk,0,95}$ (MPa)	$f_{tctk,0,95} = f_{tck,0,95} \cdot \eta_1$													άνω όριο 95%	
E_{tcm} (GPa)	$E_{tcm} = E_{cm} \cdot \eta_E$													$\eta_E = (\rho/2200)^2$	
ϵ_{tc1} (‰)	$k f_{tcm} / (E_{tci} \cdot \eta_E)$ $k = 1,1$ για ελαφροσκυροδέμα με άμμο													βλέπε Σχήμα 3.2	
ϵ_{tci1} (‰)	ϵ_{tc1}													βλέπε Σχήμα 3.2	
ϵ_{tc2} (‰)	2,0				2,2				2,3	2,4	2,5				βλέπε Σχήμα 3.3
ϵ_{tci2} (‰)	$3,5 \eta_1$				3,1 η_1				2,9 η_1	2,7 η_1	2,6 η_1				βλέπε Σχήμα 3.3 $ \epsilon_{tci2} > \epsilon_{tc2} $
η	2,0				1,75				1,6	1,45	1,4				
ϵ_{tc3} (‰)	1,75				1,8				1,9	2,0	2,2				βλέπε Σχήμα 3.4
ϵ_{tci3} (‰)	$3,5\eta_1$				3,1 η_1				2,9 η_1	2,7 η_1	2,6 η_1				βλέπε Σχήμα 3.4 $ \epsilon_{tci3} > \epsilon_{tc3} $

Ελαστικές Παραμορφώσεις [EC2, §11.3.2 (1)]

Μία εκτίμηση των μέσων τιμών του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας E_{tcm} για το ΕΣ μπορεί να ληφθεί με πολλαπλασιασμό των τιμών του Πίνακα 3.1 για ΣΚΠ με τον παρακάτω συντελεστή:

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 \quad (\text{εξ. 4.2})$$

με

ρ το άνω όριο πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία (Πίνακας 4.1)

Όπου απαιτούνται ακριβή δεδομένα, π.χ όταν οι βυθίσεις είναι πολύ σημαντικές απαιτούνται πειραματικές δοκιμές έτσι ώστε να καθορίζονται οι τιμές του E_{tcm} σύμφωνα με το ISO 6784.

Θλιπτική και Εφελκυστική Αντοχή σχεδιασμού [EC2, §11.3.5]

Η τιμή της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού ορίζεται ως:

$$f_{icd} = \alpha_{icc} * f_{ick} / \gamma_c, \quad (\text{εξ. 4.3})$$

όπου γ_c είναι ο μερικός συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα, ενώ η τιμή του α_{icc} αναφέρεται στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Η συνιστώμενη τιμή είναι 0,85.

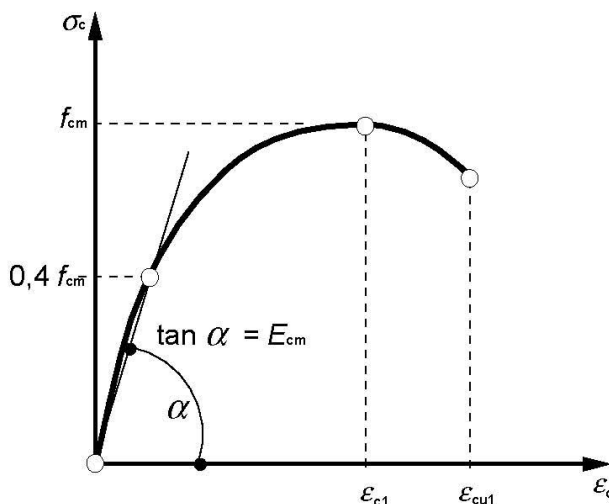
Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής σχεδιασμού ορίζεται ως:

$$f_{ictd} = \alpha_{ict} * f_{ictk} / \gamma_c, \quad (\text{εξ. 4.4})$$

όπου γ_c είναι ο μερικός συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα, ενώ η τιμή του α_{ict} αναφέρεται στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Η συνιστώμενη τιμή είναι 0,85.

Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων $\sigma - \epsilon$ [EC2, Πίνακας 11.3.1, σχήμα 3.2 και § 11.3.6]

Για μη γραμμική ή πλαστική ανάλυση ή για τον υπολογισμό μεγεθών δευτέρας τάξεως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το παρακάτω διάγραμμα που ισχύει και για το ΣΠΣ,



Σχήμα 4.1: Σχηματική παράσταση της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων για την ανάλυση των κατασκευών

(Η χρήση του $0,4f_{cm}$ για τον ορισμό του E_{cm} είναι προσεγγιστική)

το οποίο περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{\sigma_c}{f_{icm}} = \frac{(k \eta - \eta_2)}{1 + (k - 2)\eta} \quad (\text{εξ. 4.5})$$

όπου :

$$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{ic1} \quad (\text{εξ. 4.6})$$

ϵ_{ic1} η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην κορυφή της τάσης και ισούται με :

$$\varepsilon_{lc1} = \frac{k * f_{lcm}}{E_{cm} * \eta_E}$$

με $k = 1,1$ για ΕΣ με άμμο

(εξ. 4.7)

k συντελεστής (διαφέρει από τον k που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ϵ_{lc1}), με $k = 1,05 E_{lcm} * |\epsilon_{lc1}| / f_{lcm}$

f_{lcm} για $f_{ck} \geq 20$ MPa, $f_{lcm} = f_{lck} + 8$ (MPa) (εξ. 4.8)

$$\epsilon_{lcu1} = \epsilon_{lc1}$$

Συνοψίζοντας, οι διαφορές του ΕΣ σε σχέση με το ΣΠΣ αναφορικά με τη σχέση $\sigma - \epsilon$, είναι ότι το ϵ_{lc1} προκύπτει από την παραπάνω σχέση και το ϵ_{lcu1} ισούται με το ϵ_{lc1} , δηλαδή δεν υπάρχει φθίνοντας κλάδος στο διάγραμμα $\sigma - \epsilon$. Το τελευταίο χαρακτηριστικό οφείλεται στη μεγαλύτερη ψαθυρότητα του ΕΣ.

Η τιμή του ορίου παραμόρφωσης του θλιβόμενου ΕΣ υπό κάμψη ϵ_{lcu2} ισούται με $3,5 \eta_1$, για ΕΣ με χαρακτηριστική αντοχή $f_{lck} < 50$ MPa.

Μέγιστη Διάμετρος Ράβδου [EC2, 11.9 (1)]

Ο EC2 περιορίζει τη μέγιστη διάμετρο οπλισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ΕΣ, στα 32mm.

Δέσμες Ράβδων [EC2, 11.9 (1)]

Οι δέσμες ράβδων δεν πρέπει να αποτελούνται από περισσότερες από 2 ράβδους και η ισοδύναμη διάμετρος δεν πρέπει να ξεπερνά τα 45 mm.

Επικάλυψη σκυροδέματος [EC2 11.4.2 (1)]

Οι τιμές της ελάχιστης επικάλυψης του Πίνακα 4.2 του EC2 που ισχύουν για το ΣΚΠ πρέπει να αυξάνονται κατά 5 mm.

4.2. Σχεδιασμός πλαισίων

Η ανάλυση γίνεται σε πλαίσια ισογείου σε κτήρια χρήσης κατοικίας 4, 8, 12, 16 και 20 ορόφων. Το ύψος των ορόφων είναι 3 μέτρα, ενώ υπάρχουν 2 ανοίγματα πλάτους 6 μέτρων το καθένα (διεύθυνση x).

Τα ανοίγματα των πλαισίων ως προς τη διεύθυνση y, θεωρούνται ίσα με 5 m, ενώ το πάχος της πλάκας της οποίας τα φορτία μεταβιβάζονται γραμμικά στις δοκούς, λαμβάνεται ίσο με 18cm.

Το πλάτος των δοκών θεωρείται ίσο με 30 cm και η κρέμαση ίση με 60 cm.

Οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων ανά ύψος πλαισίου αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: Διαστάσεις υποστυλωμάτων

Αριθμός ορόφων πλαισίου	Διαστάσεις υποστυλωμάτων (cm * cm)				
20	50				
19	55				
18	55				
17	55				
16	60	50			
15	60	50			
14	60	55			
13	65	55			
12	65	55	50		
11	65	60	55		
10	70	60	55		
9	70	60	55		
8	70	60	55	50	
7	75	65	60	55	
6	75	65	60	55	
5	75	65	60	55	
4	75	70	65	60	50
3	75	70	65	65	55
2	75	70	65	65	55
1	75	70	65	65	55

Τα φορτία που επιβάλλονται στην κατασκευή είναι φορτία ίδιου βάρους, φορτία επικαλύψεων ίσα με 1,5 kN/m² και κινητά φορτία ίσα με 3,5 kN/m².

Φορτία τοιχοποιίας δεν υπάρχουν με σκοπό να είναι μεγαλύτερη η επίδραση του ίδιου βάρους, κυρίως για το ΕΣ, στα συνολικά φορτία του σεισμικού συνδυασμού G+ψ₂Q, αλλά και του συνδυασμού στην οριακή κατάσταση αστοχίας 1,35G+1,5Q.

Για την επίλυση των πλαισίων χρησιμοποιείται το λογισμικό CSI ETABS2016.

Παράλληλα στην επίλυση, θεωρούμε τις παρακάτω παραδοχές:

Λαμβάνουμε ως ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας τη ζώνη Z1 (Πίνακας 2, Εθνικό Προσάρτημα EC8) με τιμή αναφοράς $a_{gR} = 0,16g$ ως μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Πίνακας 2, Εθνικό Προσάρτημα EC8), (Πίνακας 4.4)

Πίνακας 4.4: Τιμές αναφοράς a_{gR} της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης

Ζώνη	a_{gR}/g
Z1	0,16
Z2	0,24
Z3	0,36

Ο συντελεστής γ_i θεωρείται ίσος με 1,00 (Πίνακας 4, Εθνικό Προσάρτημα EC8), (Πίνακας 4.5), καθώς τα υπό επίλυση πλαίσια εντάσσονται στην κατηγορία σπουδαιότητας II, (Πίνακας 4.3, EC8), (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.5: Τιμές του συντελεστή σπουδαιότητας γ_i
Τιμές του Συντελεστή Σπουδαιότητας γ_i

Κατηγορία Σπουδαιότητας	I	II	III	IV
Συντελεστής Σπουδαιότητας γ_i	0,80	1,00	1,20	1,40

Πίνακας 4.6: Κατηγορίες σπουδαιότητας

Κατηγορία σπουδαιότητας	Κτίρια
I	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
II	Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
III	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
IV	Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κλπ.

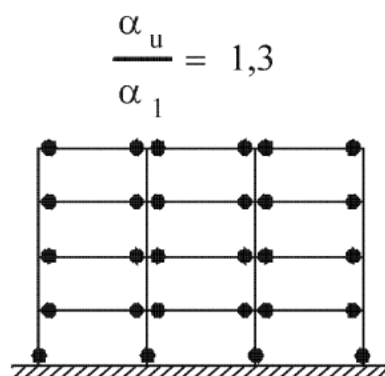
Η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q , ως ικανότητα απόδοσης ενέργειας, για πλαισιωτό σύστημα λαμβάνεται ίση με 3,9 σύμφωνα με τους πίνακες 5.1 και 6.1 του EC8 (Πίνακας 4.7, Πίνακας 4.8).

Πίνακας 4.7: Βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, q_0 για συστήματα κανονικά σε όψη

ΤΥΠΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΚΠΜ	ΚΠΥ
Πλαισιωτό σύστημα, διπλό σύστημα, σύστημα συζευγμένων τοιχωμάτων	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Σύστημα ασύζευκτων τοιχωμάτων	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Στρεπτικά εύκαμπτο σύστημα	2,0	3,0
Σύστημα ανεστραμμένου εκκρεμούς	1,5	2,0

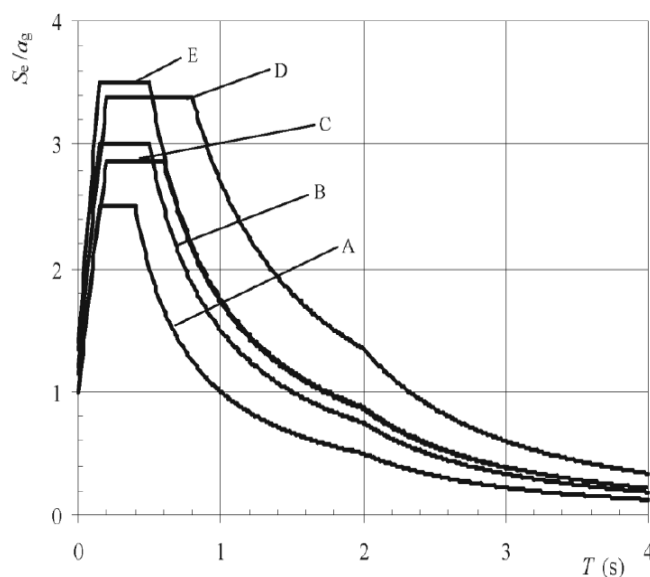
Πίνακας 4.8: Αρχές σχεδιασμού, κατηγορίες πλαστιμότητας και ανώτερες τιμές αναφοράς των συντελεστών συμπεριφοράς

Αρχή σχεδιασμού	Κατηγορία πλαστιμότητας	Φάσμα των τιμών αναφοράς του συντελεστή συμπεριφοράς q
Αρχή α) Περιορισμένη πλάστιμη συμπεριφορά	ΚΠΧ (Χαμηλή)	$\leq 1,5 - 2$
Αρχή β) Πλάστιμη συμπεριφορά	ΚΠΧ (Μέτρια)	≤ 4 επίσης περιορίζεται από τις τιμές του Πίνακα 6.2
	ΚΠΥ (Υψηλή)	περιορίζεται μόνο από τις τιμές του Πίνακα 6.2



Σχήμα 4.2: Πλαίσια παραλαβής ροπών (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε δοκούς και στη βάση υποστυλωμάτων)

Το έδαφος θεωρείται ως κατηγορία Β (Πίνακας 3.1, EC8), και ως συνιστώμενο φάσμα ελαστικής απόκρισης το φάσμα Τύπου 1 (σχήμα 3.2, EC8).



Σχήμα 3.2: Συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 για κατηγορίες εδάφους Α έως Ε (5% απόσβεση)

Σχήμα 4.3: Συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 για κατηγορίες εδάφους Α έως Ε (5% απόσβεση)

Η κατηγορία θλιπτικής αντοχής που λαμβάνεται για το ΣΚΠ είναι η C25/30 και το μέτρο ελαστικότητας ίσο με 30 GPa (Πίνακας 3.2, EC2).

Για το δομικό ΕΣ θεωρούμε κατηγορία θλιπτικής αντοχής LC25/28 και μέτρο ελαστικότητας ίσο με 21 GPa (σύνθεση ΝΤΥΑ 15538ρ, Πίνακας 3.6). Ακολουθεί τεκμηρίωση στην παράγραφο 4.3.

4.3. Τεκμηρίωση σχετικά με την κατηγορία αντοχής, πυκνότητα, εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας

Τα πειραματικά αποτελέσματα για την σύνθεση ΚΣ ΝΤΥΑ 15538 ρ (Πίνακας 3.6) εμφανίζουν μέση αντοχή κυβικών δοκιμίων στις 28 ημ. ίση με 37,7 MPa. Αν και στην παράγραφο 3.4.1 φαίνεται ότι η σχέση της αντοχής κυλινδρικών (d150/h300 mm) προς την αντοχή κυβικών δοκιμίων (150 mm) ΚΣ είναι 1:1, μπορούμε για λόγους κανονιστικούς του EN 206 και από την ασφαλή πλευρά να λάβουμε σε αυτή την περιοχή αντοχών λόγο μεταξύ C25/28=0,89 και C35/38=0,92, δηλαδή 0,90 και έτσι υπολογίζεται η μέση αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων ίση με $f_{lcm} = 0,90 \cdot 37,7 = 34$ MPa. Με βάση τον Πίνακα EC2 11.3.1 η χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου υπολογίζεται ίση με $34 - 8 = 26$ MPa και η σύνθεση ΝΤΥΑ 15538ρ κατατάσσεται στην κατηγορία LC25/28.

Στους δομοστατικούς υπολογισμούς για το ΕΣ χρησιμοποιείται η πυκνότητα του υλικού τόσο για τον υπολογισμό των μηχανικών του χαρακτηριστικών όσο και για τον υπολογισμό του ιδίου βάρους των δομικών στοιχείων.

Σύμφωνα με τον EC2 11.1 “στο EN 206-1, το ΕΣ κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη πυκνότητά του όπως φαίνεται στον Πίνακα 11.1 (Πίνακας 4.1). Επιπλέον, ο πίνακας αυτός δίνει τις αντίστοιχες πυκνότητες για άοπλο και οπλισμένο ΕΣ με κανονικά ποσοστά οπλισμών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό για τον υπολογισμό ιδίων βαρών ή επιβαλλόμενης μόνιμης φόρτισης. **Εναλλακτικά, μπορεί να ορίζεται για την πυκνότητα μια επιθυμητή τιμή (target value)**”.

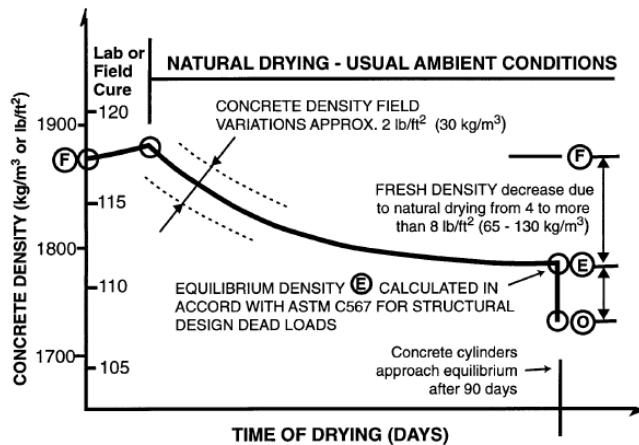
Σύμφωνα με τον EN 206 (3.1.4.1, 4.3.2 και Πίνακας 14) οι τιμές της πυκνότητας αφορούν στην **πυκνότητα του ΕΣ μετά από ξήρανση σε κλίβανο** (105 ± 5 °C), προσδιορισμένη με την πρότυπη μέθοδο EN 12390-7. Στην παρούσα δ.ε. και σε άλλα τεχνικά κείμενα η πυκνότητα μετά από ξήρανση σε κλίβανο αναφέρεται και ως **ξηρή πυκνότητα**.

Η δομοστατική ανάλυση γίνεται με βάση την σύνθεση ΚΣ ΝΤΥΑ 15538 ρ (Πίνακας 3.6), η οποία έχει **ξηρή πυκνότητα 1575 kg/m³** και ανήκει στην κατηγορία D1,6 (EN 206 Πίνακας 14). Στην παρούσα περίπτωση η διαφορά της μέγιστης πυκνότητας της κατηγορίας D1,6 (1600 kg/m³) από την μετρούμενη πυκνότητα (1575 kg/m³) είναι πολύ μικρή. Αυτή η ξηρή πυκνότητα μπορεί να ορισθεί και ως **επιθυμητή τιμή** της βιομηχανικής παραγωγής ΚΣ.

Σημειώνεται ότι για τον έλεγχο της πυκνότητας του ΕΣ στο έργο, προβλέπεται στο EN 206 (Πίνακες 22 και 24) μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση στην περίπτωση **μεμονωμένου** αποτελέσματος δοκιμής ± 30 kg/m³ από τιμές ορίων, από ανοχές σε μια επιθυμητή τιμή ή από τα όρια μιας κατηγορίας πυκνότητας.

Εφαρμόζοντας την θεώρηση του ACI 213R-03 (4.4.2) η **πυκνότητα ισορροπίας** υπολογίζεται ίση με $1575 + 50 = 1625$ kg/m³ σε πολύ καλή συμφωνία με την αντιπροσωπευτική τιμή 1650 kg/m³ που χρησιμοποιείται στην δομοστατική ανάλυση.

Στο πρότυπο ACI 213R-03 (4.4.2) αναφέρεται ότι: “Τα ίδια φορτία για τον σχεδιασμό θα πρέπει να βασίζονται στην **πυκνότητα ισορροπίας** η οποία, για τις περισσότερες συνθήκες και δομικά στοιχεία, μπορεί να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται μετά από 90 ημέρες ξήρανσης στον αέρα. Εκτεταμένες μελέτες στην Β. Αμερική δείχνουν ότι ανεξάρτητα από ευρείες διακυμάνσεις στην αρχική υγρασία των αδρανών, η πυκνότητα ισορροπίας βρέθηκε να είναι $+50$ kg/m³ (Σχ. 4.1) [Σχ. 3.2 στην παρούσα δ.ε.] μεγαλύτερη από την ξηρή πυκνότητα για το ελαφροβαρές σκυρόδεμα. Οι Ευρωπαϊκές συστάσεις για την πυκνότητα λειτουργίας είναι παρόμοιες (FIP 1983)”.



F - FRESH DENSITY: Specified for field control (unit weight bucket). Measurements on 6' x 12' (150 x 300 mm) cylinders will average 2.5 lb/ft³ (40 kg/m³) higher than field measurements on 0.5 ft³ (.014 m³) unit weight bucket.

E - EQUILIBRIUM DENSITY: Typically 3 lb/ft³ (50 kg/m³) greater than OVEN DRY DENSITY - O

Fig. 4.1—Concrete density versus time of drying for structural lightweight concrete (Holm 1994).

Σχήμα 4.4 Πυκνότητα ΕΣ ως συνάρτηση του χρόνου ξήρανσης σε συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος

Από τον Πίνακα 4.2 (EC2, Πίνακας 11.3.1) φαίνεται ότι τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης για το ΕΣ εξαρτώνται από τους συντελεστές η_1 και η_E , οι οποίοι είναι συνάρτηση της πυκνότητας ρ με δυο διαφορετικούς προσδιορισμούς:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,6\rho/2200$$

όπου ρ είναι το άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 (EC2, Πιν. 11.1)

$$\eta_E = (\rho/2200)^2$$

όπου το ρ δηλώνει την πυκνότητα μετά από ξήρανση σε κλίβανο σε σύμφωνα με το EN 206.

Παρακάτω σχολιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα μεγέθη f_{lctm} και E_{lcm} .

Η f_{lctm} υπολογίζεται από την σχέση:

$$f_{lctm} = f_{ctm} \eta_1 = 0,30 f_{lck}^{2/3} (0,40 + 0,60 \rho/2200)$$

Σύμφωνα με τον EC2 (Πίνακες 3.1 και 11.3.1), για το υπό θεώρηση ΚΣ LC25/28 είναι $f_{lck} = 25$ MPa και $\rho = 1600$ kg/m³ δίνοντας $f_{lctm} = 2,1$ MPa. Η χρήση της μετρούμενης ξηρής πυκνότητας 1575 kg/m³ ουδόλως επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Το E_{lcm} υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{lcm} \text{ (σε GPa)} = E_{cm} \eta_E = 22 (f_{lcm}/10)^{0,3} (\rho/2200)^2$$

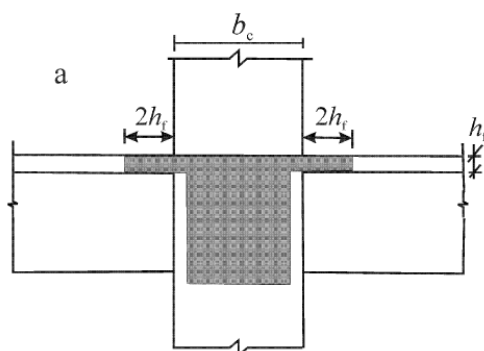
Σύμφωνα με τον EC2 (Πίνακες 3.1 και 11.3.1) και για το υπό θεώρηση ΚΣ LC25/28 πρέπει να είναι $f_{lcm} = 33$ MPa και $\rho = 1575$ kg/m³ δίνοντας $E_{lcm} = 16$ GPa. Το αποτέλεσμα είναι σημαντικά μικρότερο από το μετρούμενο πειραματικά. Με βάση τον EC2 (11.3.2) στους δομοστατικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται

η πειραματικά εξαγόμενη τιμή προσδιορισμένη κατά το ISO 6784 που είναι ίση με 21 GPa.

4.4. Παράμετροι υπολογισμών

Δοκοί

Το συνεργαζόμενο πλάτος πέλματος b_{eff} των δοκών (EC2, §5.4.3.1.1) υπολογίστηκε ίσο με το πλάτος b_c του υποστυλώματος αυξημένο κατά $2h_f$ σε κάθε πλευρά της δοκού με τη θεώρηση ότι πρόκειται για κύριες σεισμικές δοκούς οι οποίες εδράζονται σε εξωτερικά υποστυλώματα και με την παραδοχή ότι υπάρχει εγκάρσια δοκός παρόμοιου ύψους.



Σχήμα 4.5: Συνεργαζόμενο πλάτος b_{eff} για δοκούς που εδράζονται σε υποστυλώματα

$h_f = 18$ cm, το πάχος της πλάκας, ενώ το συνεργαζόμενο πλάτος b_{eff} των δοκών, για τα πλαίσια 4 έως και 20 ορόφων αντίστοιχα, προσδιορίζεται ίσο με:

- $b_{eff} = 127$ cm, (πλαίσιο 4 ορόφων)
- $b_{eff} = 137$ cm, (πλαίσιο 8 ορόφων)
- $b_{eff} = 137$ cm, (πλαίσιο 12 ορόφων)
- $b_{eff} = 142$ cm, (πλαίσιο 16 ορόφων)
- $b_{eff} = 147$ cm, (πλαίσιο 20 ορόφων)

Το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού (A_{s1} : εφελκόμενος οπλισμός και A_{s2} : θλιβόμενος οπλισμός) για δοκούς και υποστυλώματα υπολογίστηκε σύμφωνα με το κανονιστικό πλαίσιο των ΕΚΩΣ 2000 και EC2 2004.

Η διατομή του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού στις δοκούς, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από $A_{s,min}$ (EC2, §9.2.1.1), όπου:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} btd \quad \text{και όχι μικρότερο από } 0,0013b_t d$$

- b_t : το μέσο πλάτος της εφελκόμενης ζώνης
- f_{ctm} : η μέση αντοχή σκυροδέματος σε καθαρό εφελκυσμό
- f_{yk} : η χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής
- d : το στατικό ύψος διατομής

Ως ελάχιστος οπλισμός σε όλο το μήκος του πάνω και κάτω πέλματος των δοκών, υιοθετήθηκαν τουλάχιστον 2 ράβδοι 12 mm S500 (ΕΚΩΣ 2000, §18.3.3).

Ο εφελκόμενος οπλισμός στα ανοίγματα των δοκών προκύπτει από τις τιμές της ροπής (ΟΚΑ) στα αντίστοιχα ανοίγματα και στην περιοχή της στήριξης από την τιμή της ροπής (ΣΔ) στην στήριξη του φορέα. Για λόγους απλοποίησης, ο οπλισμός κρατείται με την ίδια διάμετρο σε όλο το μήκος του φορέα.

Ως θλιβόμενος οπλισμός των ανοιγμάτων λαμβάνονται οι μισές ράβδοι (όχι λιγότερες από δύο) από τον εφελκόμενο οπλισμό της γειτονικής στήριξης.

Ως θλιβόμενος οπλισμός στις θέσεις των στηρίξεων κρατούνται όλες οι ράβδοι των γειτονικών ανοιγμάτων, δηλ. οι εφελκόμενοι ράβδοι των ανοιγμάτων εκτείνονται από στήριξη σε στήριξη του φορέα.

Υποστυλώματα

Η διατομή του διαμήκους οπλισμού στα υποστυλώματα, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από $A_{s,min}$ (EC2, §9.5.2), όπου:

$$A_{s,min} = \frac{0,10NEd}{f_{yd}} \quad \text{ή} \quad 0,002A_c, \text{όποιο είναι μεγαλύτερο}$$

N_{Ed} : η θλιπτική αξονική δύναμη σχεδιασμού

f_{yd} : η τάση διαρροής σχεδιασμού για τον οπλισμό

A_c : το εμβαδό της διατομής

Ως ελάχιστος συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων θεωρούνται τέσσερις για ορθογωνικά υποστυλώματα με διάμετρο όχι μικρότερη από 14 mm (ΕΚΩΣ 2000, §18.4.3). Η κατηγορία χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε είναι S500.

Υιοθετείται η επίλυση με συμμετρικό οπλισμό καθώς φορείς με εναλλασσόμενη επιπόνηση, όπως τα υποστυλώματα υπό σεισμική επιπόνηση, σχεδιάζονται με τον θλιβόμενο οπλισμό ίσο με τον εφελκόμενο, καθώς με την εναλλαγή της επιπόνησης ο θλιβόμενος οπλισμός καθίσταται εφελκόμενος.

4.5. Συζήτηση αποτελεσμάτων

4.5.1. Σεισμική μάζα, ιδιοπερίοδος, σχετική μετακίνηση

Καθώς το ειδικό βάρος του ΚΣ είναι μειωμένο συγκριτικά με το ΣΚΠ, μειώνεται παράλληλα και η σεισμική μάζα σε ποσοστό 21% κατά μέσο όρο σε όλα τα πλαίσια (Πίνακας 4.9 και Σχήμα 4.6). Η μείωση της σεισμικής μάζας προκαλεί με τη σειρά της ανάλογη μείωση της τέμνουσας βάσης, η οποία οδηγεί σε μικρότερη σεισμική καταπόνηση και κατ' επέκταση σε οικονομία στη διαστασιολόγηση μελών και σε σπλισμούς.

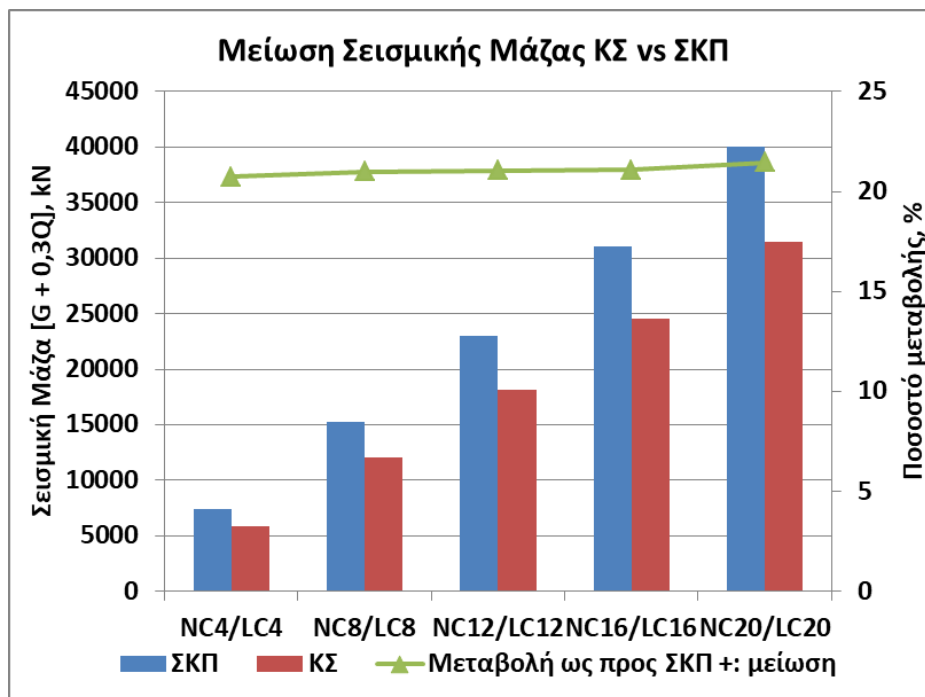
Παράλληλα καθώς η ιδιοπερίοδος T αυξάνεται σε όλα τα προσομοιώματα (Πίνακας 4.10 και Σχήμα 4.7) και είναι μεγαλύτερη από T_c , οι επιταχύνσεις σχεδιασμού μειώνονται και βρίσκονται στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος σχεδιασμού (Σχήμα 4.3).

Το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του ΚΣ οδηγεί σε μεγαλύτερες οριζόντιες σχετικές μετακινήσεις σε όλα τα πλαίσια, οι οποίες ποσοστιαία ισούνται με 8,0 % για το 4όροφο πλαίσιο, 8,7 % για το προσομοίωμα των 8 ορόφων, 13,9 % για το πλαίσιο 12 ορόφων και 20 % για τα πλαίσια 16 και 20 ορόφων (Πίνακας 4.11 και Σχήμα 4.8).

Οι μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις και παραμορφώσεις μπορούν να αντισταθμιστούν με την κατάλληλη διαστασιολόγηση των μελών δομήματος κατασκευασμένου από ΚΣ ή ακόμα και με την εφαρμογή τοιχίων.

Πίνακας 4.9: Σεισμική μάζα ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

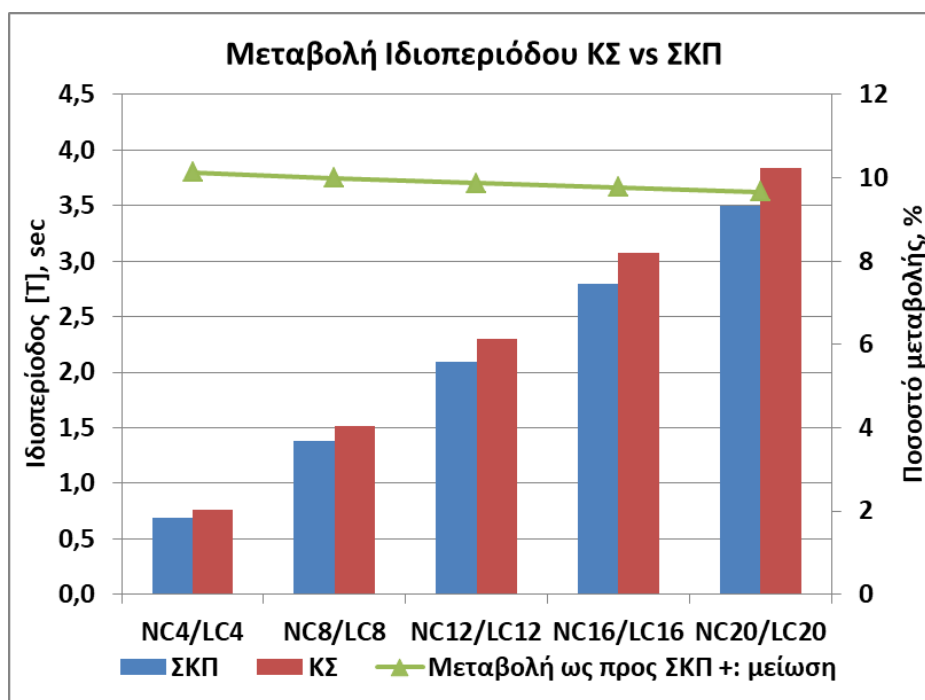
ΣΚΠ	Σεισμική Μάζα [G + 0,3Q] kN	ΚΣ	Σεισμική Μάζα [G + 0,3Q] kN	Μείωση Σεισμικής Μάζας ΚΣ vs ΣΚΠ %
NC4	7457	LC4	5910	20,7
NC8	15270	LC8	12065	21,0
NC12	23032	LC12	18185	21,0
NC16	31091	LC16	24537	21,1
NC20	40020	LC20	31430	21,5



Σχήμα 4.6: Μείωση σεισμικής μάζας ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

Πίνακας 4.10: Μεταβολή ιδιοπεριόδου ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

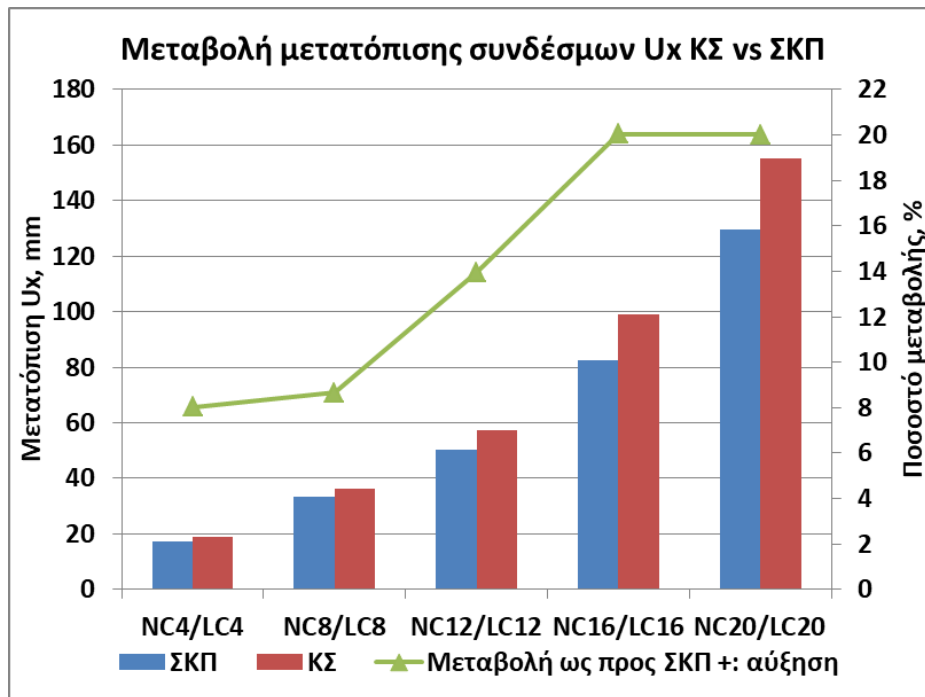
ΣΚΠ	Ιδιοπερίοδος, [T]		ΚΣ	Ιδιοπερίοδος, [T]		Μεταβολή Ιδιοπεριόδου ΚΣ vs ΣΚΠ
	sec			sec		%
NC4	0,691		LC4	0,761		10,1
NC8	1,381		LC8	1,519		10,0
NC12	2,098		LC12	2,305		9,9
NC16	2,801		LC16	3,075		9,8
NC20	3,499		LC20	3,837		9,7



Σχήμα 4.7: Μεταβολή ιδιοπεριόδου ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

Πίνακας 4.11: Μεταβολή μετατοπίσεων ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

ΣΚΠ	Μετατόπιση, Ux		ΚΣ	Μετατόπιση, Ux	Μεταβολή Ux ΚΣ vs ΣΚΠ
	mm			mm	%
NC4	17,3		LC4	18,7	8,0
NC8	33,4		LC8	36,3	8,7
NC12	50,3		LC12	57,3	13,9
NC16	82,6		LC16	99,2	20,0
NC20	129,5		LC20	155,4	20,0



Σχήμα 4.8: Μεταβολή μετατοπίσεων ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

4.5.2. Δοκοί

Στις δοκούς ισογείου υπολογίσθηκαν οι ροπές με την χρήση του λογισμικού CSI ETABS 2016 και ο σπλισμός από την περιβάλλουσα των ροπών. Ο υπολογισμός του σπλισμού έγινε με λογισμικό σε Visual Basic το οποίο αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία «Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίου από σπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα σχεδιασμένου κατά Ευρωκώδικα 2 και 8» [Μάνος,2014]. Η επικάλυψη σπλισμού ορίζεται στα 50 mm για το ΣΚΠ και στα 55 mm για το ΚΣ.

Στους Πίνακες 4.12 - 4.16 και στα Σχήματα 4.9 – 4.11 φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για κτήρια διαφορετικού πλήθους ορόφων και το ποσοστό μείωσης του σπλισμού στην κατασκευή από ΚΣ σε σχέση με την κατασκευή από ΣΚΠ.

Συνοπτικά τα συμπεράσματα είναι:

- Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών υπολογίσθηκε ίσο με 12% σε όλα τα πλαίσια.
- Στον συνδυασμό της σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών κυμαίνεται από 18 έως 22% με την μεγαλύτερη μείωση στα πλαίσια 4 και 8 ορόφων.
- Παρατηρείται επίσης μείωση στον σπλισμό του ΚΣ σε σχέση με τον σπλισμό του ΣΚΠ.
 - Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης ανέρχεται σε 12% για τα πλαίσια 4 έως και 16 ορόφων ενώ δεν υπολογίζεται διαφορά για το πλαίσιο των 20 ορόφων. Το αποτέλεσμα αποδίδεται στο ότι η διάμετρος των ράβδων και το πλήθος τους λαμβάνουν διακριτές τιμές.
 - Στον συνδυασμό της σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης ανέρχεται σε ~26% για όλα τα πλαίσια.

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού στις δοκούς του για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 4 ορόφων

TABLE: Beam Forces		NC4 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm	mm	cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-166,3	5,73	113,0	2,7523	14	3	14	2	4,618	3,079	1,270	0,550	0,050	113,4	7,697	12,2	12,1	11,8
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-312,7	5,73	212,3	2,7523														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-5,3	5,73	79,8	2,2568														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-175,3	5,73	54,8	3,2477	14	5	14	3	7,697	4,618	1,270	0,550	0,050	185,3	12,315	21,6	15,6	26,5
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-166,3	0,28	113,0	3,2477	14	3	14	2	4,618	3,079	1,270	0,550	0,050	113,4	7,697	12,2	12,1	11,8
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-312,7	0,28	212,3	3,2477														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-5,3	0,28	79,8	3,7432														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-175,3	0,28	54,8	2,7523	14	5	14	3	7,697	4,618	1,270	0,550	0,050	185,3	12,315	21,6	15,6	26,5
TABLE: Beam Forces		LC4 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm	mm	cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-146,1	5,73	99,2	2,7523	12	4	12	2	4,524	2,262	1,270	0,545	0,055	109,9	6,786			
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-252,8	5,73	171,7	2,7523														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-13,2	5,73	63,8	2,2568														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-137,5	5,73	46,3	3,2477	12	5	12	3	5,655	3,393	1,270	0,545	0,055	137,4	9,048			
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-146,1	0,28	99,2	3,2477	12	4	12	2	4,524	2,262	1,270	0,545	0,055	109,9	6,786			
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-252,8	0,28	171,7	3,2477														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-13,2	0,28	63,8	3,7432														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-137,5	0,28	46,3	2,7523	12	5	12	3	5,655	3,393	1,270	0,545	0,055	137,4	9,048			

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού στις δοκούς του για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 8 ορόφων

TABLE: Beam Forces		NC8 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm	mm	cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-155,9	5,70	110,1	2,7545	14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,550	0,050	112,7	7,697	12,2	12,1	11,8
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-293,2	5,70	207,0	2,7545														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	0,8	5,70	76,5	2,2636														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-170,2	5,70	53,0	3,2455	14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,550	0,050	186,2	12,315	21,3	15,5	26,5
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-155,9	0,30	110,1	3,2455	14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,550	0,050	112,7	7,697	12,2	12,1	11,8
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-293,2	0,30	207,0	3,2455														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	0,8	0,30	76,5	3,7364														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-170,2	0,30	53,0	2,7545	14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,550	0,050	186,2	12,315	21,3	15,5	26,5
TABLE: Beam Forces		LC8 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm	mm	cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-137,0	5,70	96,7	2,7545	12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,545	0,055	108,1	6,786			
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-237,0	5,70	167,3	2,7545														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-7,3	5,70	61,4	2,2636														
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-134,0	5,70	44,8	3,2455	12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,545	0,055	137,9	9,048			
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-137,0	0,30	96,7	3,2455	12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,545	0,055	108,1	6,786			
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-237,0	0,30	167,3	3,2455														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-7,3	0,30	61,4	3,7364														
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-134,0	0,30	44,8	2,7545	12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,545	0,055	137,9	9,048			

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και σπλισμού στις δοκούς του για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 12 ορόφων

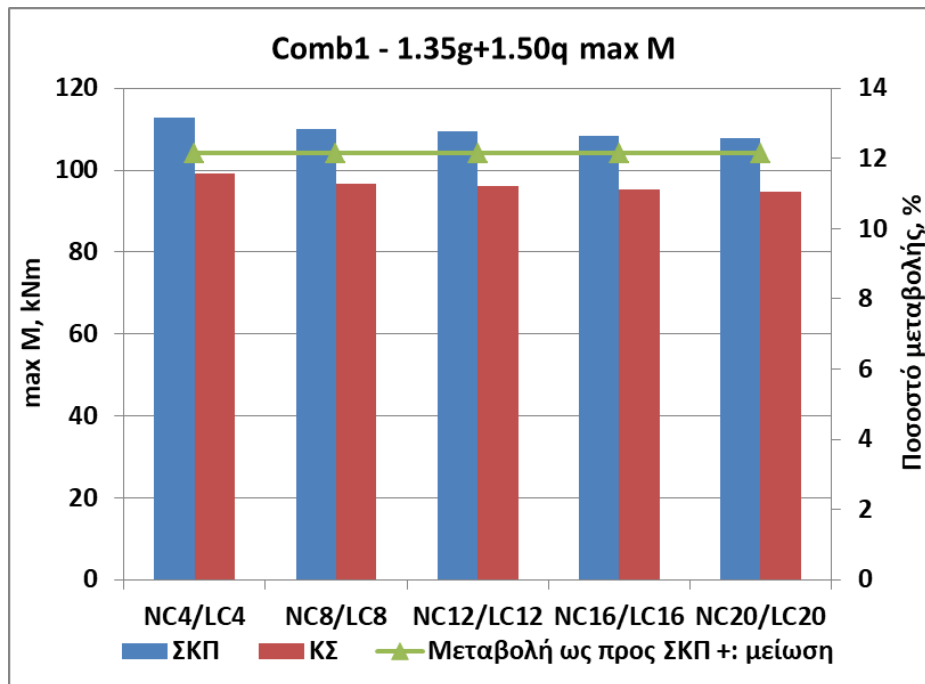
TABLE: Beam Forces			NC12 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s	
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm		cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%	
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-149,2	5,68	109,4	2,7568	14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,550	0,050	112,7	7,697	12,2	12,1	11,8	
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-280,6	5,68	205,6	2,7568															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-1,3	5,68	74,0	2,2705															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-160,8	5,68	53,0	3,2432	14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,550	0,050	186,2	12,315	19,9	15,8	26,5	
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-149,2	0,33	109,4	3,2432	14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,550	0,050	112,7	7,697	12,2	12,1	11,8	
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-280,6	0,33	205,6	3,2432															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-1,3	0,33	74,0	3,7295															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-160,8	0,33	53,0	2,7568	14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,550	0,050	186,2	12,315	19,9	15,8	26,5	
TABLE: Beam Forces			LC12 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s	
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm		cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%	
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-131,1	5,68	96,1	2,7568	12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,545	0,055	108,1	6,786				
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-226,8	5,68	166,2	2,7568															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-6,5	5,68	60,1	2,2705															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-128,8	5,68	44,6	3,2432	12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,545	0,055	137,9	9,048				
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-131,1	0,33	96,1	3,2432	12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,545	0,055	108,1	6,786				
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-226,8	0,33	166,2	3,2432															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	-6,5	0,33	60,1	3,7295															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-128,8	0,33	44,6	2,7568	12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,545	0,055	137,9	9,048				

Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και σπλισμού στις δοκούς του για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 16 ορόφων

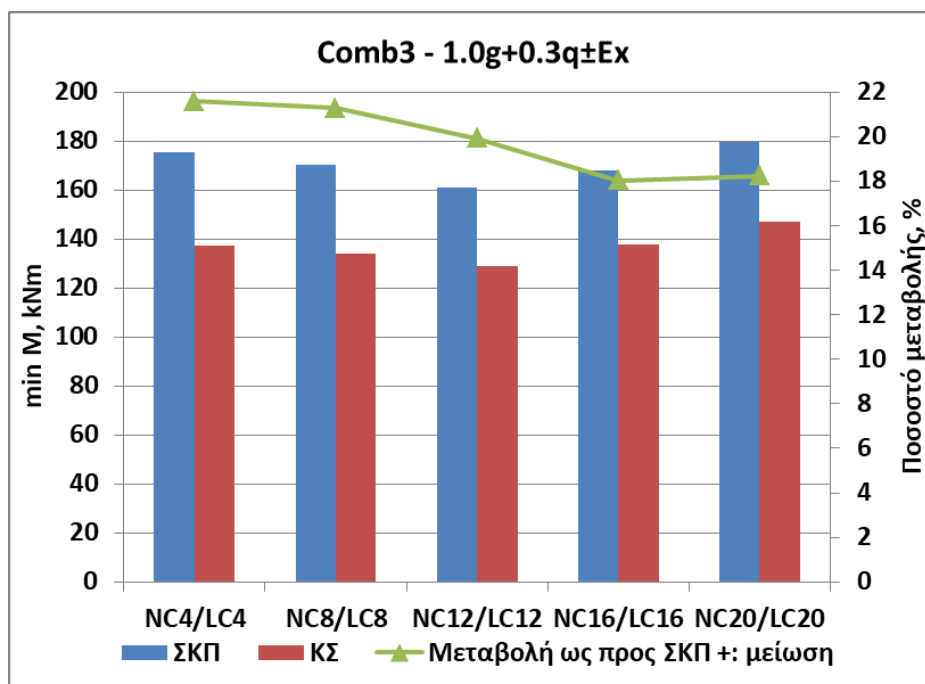
TABLE: Beam Forces			NC16 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s	
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm		cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%	
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-142,7	5,65	108,3	2,7591	14	3	14	2	4,618	3,079	1,420	0,550	0,050	112,7	7,697	12,1	12,1	11,8	
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-268,3	5,65	203,6	2,7591															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	11,5	5,65	75,6	2,2773															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-167,8	0,35	51,7	3,2409	14	5	14	3	7,697	4,618	1,420	0,550	0,050	186,5	12,315	18,0	16,2	26,5	
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-142,7	0,35	108,3	3,2409	14	3	14	2	4,618	3,079	1,420	0,550	0,050	112,7	7,697	12,1	12,1	11,8	
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-268,3	0,35	203,6	3,2409															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	11,5	0,35	75,6	3,7227															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-167,8	5,65	51,7	2,7591	14	5	14	3	7,697	4,618	1,420	0,550	0,050	186,5	12,315	18,0	16,2	26,5	
TABLE: Beam Forces			LC16 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s	
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm		cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%	
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-125,4	5,65	95,2	2,7591	12	4	12	2	4,524	2,262	1,420	0,545	0,055	107,6	6,786				
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-217,0	5,65	164,6	2,7591															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	7,2	5,65	62,4	2,2773															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-137,5	0,35	43,3	3,2409	12	5	12	3	5,655	3,393	1,420	0,545	0,055	137,9	9,048				
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-125,4	0,35	95,2	3,2409	12	4	12	2	4,524	2,262	1,420	0,545	0,055	107,6	6,786				
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-217,0	0,35	164,6	3,2409															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	7,2	0,35	62,4	3,7227															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-137,5	5,65	43,3	2,7591	12	5	12	3	5,655	3,393	1,420	0,545	0,055	137,9	9,048				

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού στις δοκούς του για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 20 ορόφων

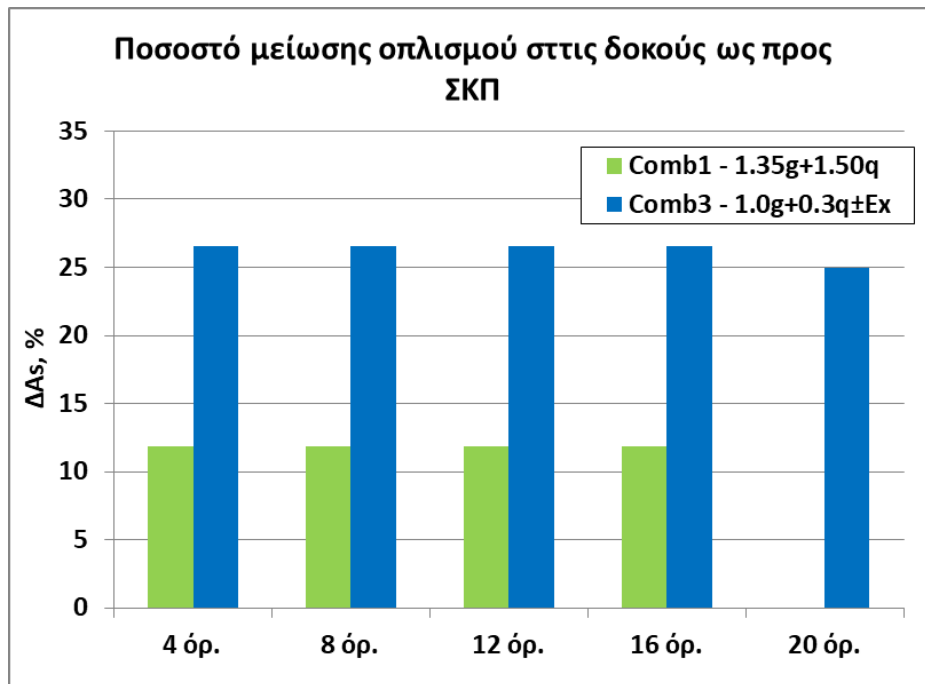
TABLE: Beam Forces			NC20 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot	ΔM min M	ΔM max M	ΔA _s	
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm		cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²	%	%	%	
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-138,5	0,38	107,8	3,2386	14	3	14	2	4,618	3,079	1,470	0,550	0,050	114,2	7,697	12,1	12,1	0,0	
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-260,3	0,38	202,6	3,2386															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	28,1	5,63	79,7	1,8068															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-179,7	0,38	50,1	3,2386	14	5	14	3	7,697	4,618	1,470	0,550	0,050	187,2	12,315	18,2	16,1	25,0	
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-138,5	5,63	107,8	2,7614	14	3	14	2	4,618	3,079	1,470	0,550	0,050	114,2	7,697	12,1	12,1	0,0	
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-260,3	5,63	202,6	2,7614															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	28,1	0,38	79,7	4,1932															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-179,7	5,63	50,1	2,7614	14	5	14	3	7,697	4,618	1,470	0,550	0,050	187,2	12,315	18,2	16,1	25,0	
TABLE: Beam Forces			LC20 Beams																		
Story	Beam	Load Case/Combo	min M	St min M	max M	St max M	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	A _{s1} εφε.	A _{s2} θλι.	b _{eff}	d	d'	Mrd	A _s tot				
			kN-m	m	kN-m	m	mm		mm		cm ²	cm ²	m	m	m	kNm	cm ²				
Story1	B1	Comb1 - 1.35g+1.50q	-121,7	0,38	94,7	3,2386	14	3	14	2	4,618	3,079	1,470	0,545	0,055	113,8	7,697				
Story1	B1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-210,5	0,38	163,8	3,2386															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	20,6	5,63	65,1	1,8068															
Story1	B1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-146,9	0,38	42,0	3,2386	14	4	14	2	6,158	3,079	1,470	0,545	0,055	149,2	9,236				
Story1	B2	Comb1 - 1.35g+1.50q	-121,7	5,63	94,7	2,7614	14	3	14	2	4,618	3,079	1,470	0,545	0,055	113,8	7,697				
Story1	B2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-210,5	5,63	163,8	2,7614															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	20,6	0,38	65,1	4,1932															
Story1	B2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-146,9	5,63	42,0	2,7614	14	4	14	2	6,158	3,079	1,470	0,545	0,055	149,2	9,236				



Σχήμα 4.9: Ποσοστό μεταβολής ροπών στις δοκούς από ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ σε ΟΚΑ



Σχήμα 4.10: Ποσοστό μεταβολής ροπών στις δοκούς από ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ στο Σεισμικό Συνδυασμό Δράσης



Σχήμα 4.11: Ποσοστό μείωσης οπλισμού στις δοκούς ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

4.5.3. Υποστυλώματα

Στα υποστυλώματα ισογείου υπολογίσθηκαν οι ροπές και οι αξονικές δυνάμεις με την χρήση του λογισμικού CSI ETABS 2016 και ο οπλισμός από τον συνδυασμό αξονικών δυνάμεων και ροπών. Ο υπολογισμός του οπλισμού όπως και στην περίπτωση των δοκών έγινε με λογισμικό σε Visual Basic [Μάνος 2014]. Η επικάλυψη οπλισμού ορίζεται στα 50 mm για το ΣΚΠ και στα 55 mm για το ΚΣ.

Στους Πίνακες 4.17-4.21 και στα Σχήματα 4.12 – 4.14 φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για κτήρια διαφορετικού πλήθους ορόφων και το ποσοστό μείωσης του οπλισμού στην κατασκευή από ΚΣ σε σχέση με την κατασκευή από ΣΚΠ.

Συνοπτικά τα συμπεράσματα είναι:

- Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών υπολογίσθηκε ίσο με 12% σε όλα τα πλαίσια.
- Στον συνδυασμό της σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών κυμαίνεται από 19 εως 27% με την μεγαλύτερη μείωση στα πλαίσια 4 και 8 ορόφων.
- Παρατηρείται επίσης μείωση στον οπλισμό του ΚΣ σε σχέση με τον οπλισμό του ΣΚΠ.
 - Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία και στον συνδυασμό σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) δεν παρατηρείται διαφορά στον οπλισμό των υποστυλωμάτων στα πλαίσια 4, 8 και 12 ορόφων. Η μη διαφοροποίηση αποδίδεται στον ελάχιστο απαιτούμενο οπλισμό σύμφωνα με ΕΚΩΣ και EC2 είναι κοινός για το ΣΚΠ και το ΚΣ.
 - Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία και στον συνδυασμό σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) ο οπλισμός υπολογίζεται μειωμένος κατά 60% στο υποστυλώμα C2 στα πλαίσια 16 και 20 ορόφων.

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού σε υποστυλώματα για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 4 ορόφων

TABLE: Column Forces NC4																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s	ΔM	ΔA _s
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²	%	%
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	58,9	2,40	-950,2	14	4	14	4	0,500	0,050	-950,2	322,7	12,315	12,1	0,0
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	110,6	2,40	-1907,2											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	124,9	0,00	-433,7											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-170,5	0,00	-642,5	14	4	14	4	0,500	0,050	-950,2	322,7	12,315	25,4	0,0
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-1876,3	14	4	14	4	0,500	0,050	-1876,3	405,0	12,315	---	0,0
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-3642,3											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	165,8	0,00	-1040,0											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-165,8	0,00	-1040,0	14	4	14	4	0,500	0,050	-1876,3	405,0	12,315	26,7	0,0
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-58,9	2,40	-950,2	14	4	14	4	0,500	0,050	-950,2	322,7	12,315	12,1	0,0
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-110,6	2,40	-1907,2											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	170,5	0,00	-433,7	14	4	14	4	0,500	0,050	-950,2	322,7	12,315	25,4	0,0
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-124,9	0,00	-642,5											
TABLE: Column Forces LC4																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s		
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²		
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	51,7	2,40	-813,4	14	4	14	4	0,495	0,055	-813,4	296,2	12,315		
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	89,5	2,40	-1501,8											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	89,2	0,00	-360,4											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-127,2	0,00	-513,1	14	4	14	4	0,495	0,055	-813,4	296,2	12,315		
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-1627,9	14	4	14	4	0,495	0,055	-1627,9	388,4	12,315		
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-2906,5											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	121,5	0,00	-856,0											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-121,5	0,00	-856,0	14	4	14	4	0,495	0,055	-1627,9	388,4	12,315		
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-51,7	2,40	-813,4	14	4	14	4	0,495	0,055	-813,4	296,2	12,315		
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-89,5	2,40	-1501,8											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	127,2	0,00	-360,4	14	4	14	4	0,495	0,055	-813,4	296,2	12,315		
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-89,2	0,00	-513,1											

Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού σε υποστυλώματα για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 8 ορόφων

TABLE: Column Forces NC8																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s	ΔM	ΔA _s
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²	%	%
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	55,2	2,40	-1983,4	14	4	14	4	0,600	0,050	-1983,4	573,0	12,315	12,1	0,0
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	103,8	2,40	-4014,1											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	150,5	0,00	-918,3											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-194,5	0,00	-1340,2	14	4	14	4	0,600	0,050	-1983,4	573,0	12,315	24,6	0,0
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-3706,7	14	4	14	4	0,600	0,050	-3706,7	558,3	12,315	---	0,0
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-7241,5											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	188,7	0,00	-2062,9											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-188,7	0,00	-2062,9	14	4	14	4	0,600	0,050	-3706,7	558,3	12,315	25,6	0,0
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-55,2	2,40	-1983,4	14	4	14	4	0,600	0,050	-1983,4	573,0	12,315	12,1	0,0
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-103,8	2,40	-4014,1											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	194,5	0,00	-918,3	14	4	14	4	0,600	0,050	-1983,4	573,0	12,315	24,6	0,0
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-150,5	0,00	-1340,2											
TABLE: Column Forces LC8																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s		
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²		
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	48,5	2,40	-1691,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-1691,9	532,6	12,315		
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	83,9	2,40	-3150,5											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	109,9	0,00	-758,1											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-146,7	0,00	-1068,6	14	4	14	4	0,595	0,055	-1691,9	532,6	12,315		
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-3207,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-3207,9	574,1	12,315		
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-5763,8											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	140,3	0,00	-1693,5											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-140,3	0,00	-1693,5	14	4	14	4	0,595	0,055	-3207,9	574,1	12,315		
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-48,5	2,40	-1691,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-1691,9	532,6	12,315		
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-83,9	2,40	-3150,5											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	146,7	0,00	-758,1	14	4	14	4	0,595	0,055	-1691,9	532,6	12,315		
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-109,9	0,00	-1068,6											

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού σε υποστυλώματα για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 12 ορόφων

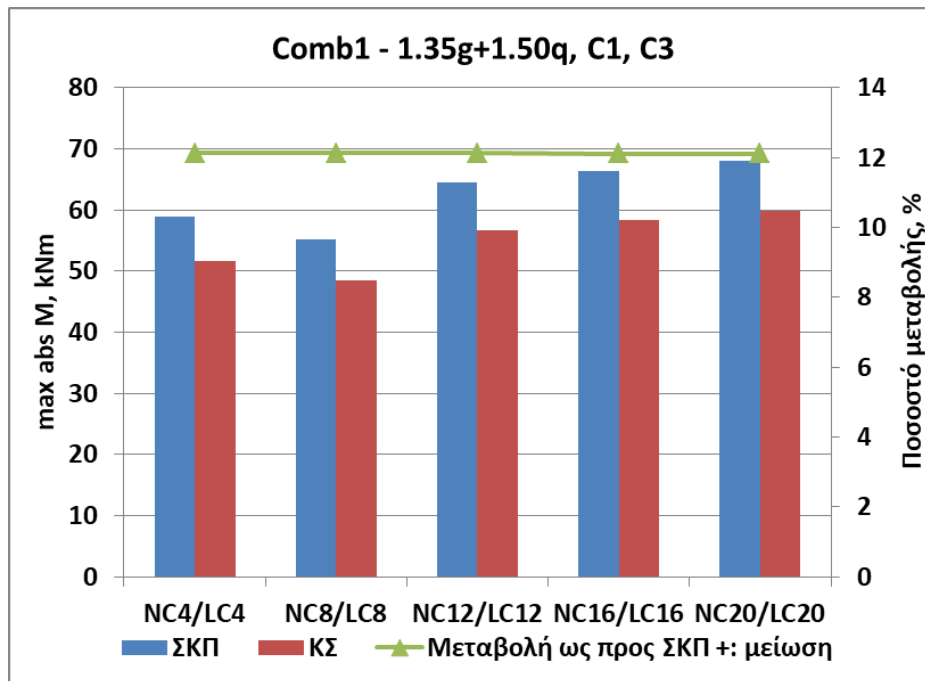
TABLE: Column Forces NC12																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s	ΔM	ΔA _s
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²	%	%
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	64,5	2,40	-3048,8	14	4	14	4	0,600	0,050	-3048,8	609,5	12,315	12,1	0,0
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	121,1	2,40	-6174,8											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	171,8	0,00	-1420,9											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-222,3	0,00	-2052,4	14	4	14	4	0,600	0,050	-3048,8	609,5	12,315	22,5	0,0
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-5455,9	14	4	14	4	0,600	0,050	-5455,9	259,1	12,315	---	0,0
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-10682,6											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	214,3	0,00	-3040,8											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-214,3	0,00	-3040,8	14	4	14	4	0,600	0,050	-5455,9	259,1	12,315	23,3	0,0
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-64,5	2,40	-3048,8	14	4	14	4	0,600	0,050	-3048,8	609,5	12,315	12,1	0,0
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-121,1	2,40	-6174,8											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	222,3	0,00	-1420,9	14	4	14	4	0,600	0,050	-3048,8	609,5	12,315	22,5	0,0
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-171,8	0,00	-2052,4											
TABLE: Column Forces LC12																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s		
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²		
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	56,7	2,40	-2599,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-2599,9	598,4	12,315		
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	97,9	2,40	-4844,9											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	130,1	0,00	-1160,4											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-172,3	0,00	-1647,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-2599,9	598,4	12,315		
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-4717,6	14	4	14	4	0,595	0,055	-4717,6	397,0	12,315		
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-8495,1											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	164,4	0,00	-2493,9											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-164,4	0,00	-2493,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-4717,6	397,0	12,315		
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-56,7	2,40	-2599,9	14	4	14	4	0,595	0,055	-2599,9	598,4	12,315		
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-97,9	2,40	-4844,9											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	172,3	0,00	-1160,4	14	4	14	4	0,595	0,055	-2599,9	598,4	12,315		
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-130,1	0,00	-1647,9											

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού σε υποστυλώματα για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 16 ορόφων

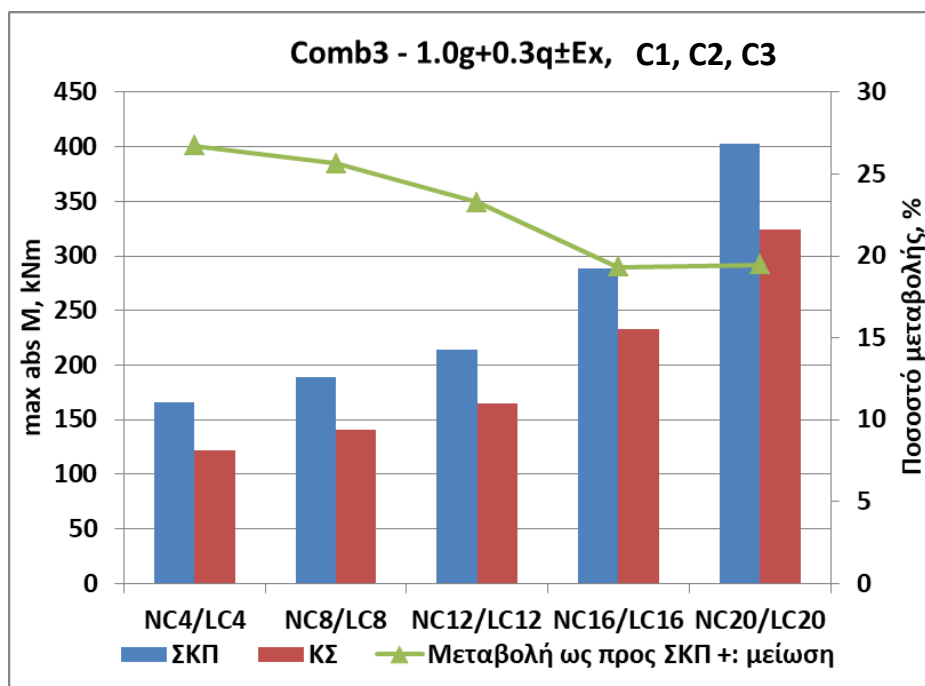
TABLE: Column Forces NC16																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s	ΔM	ΔA _s
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²	%	%
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	66,4	2,40	-4181,0	14	4	14	4	0,650	0,050	-4181,0	690,6	12,315	12,1	0,0
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	124,8	2,40	-8497,4											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	242,4	0,00	-1867,4											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-294,9	0,00	-2906,5	14	4	14	4	0,650	0,050	-4181,0	690,6	12,315	19,1	0,0
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-7171,3	18	6	18	6	0,650	0,050	-7171,3	298,7	30,536	---	59,7
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-14096,4											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	288,2	0,00	-4006,9											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-288,2	0,00	-4006,9	18	6	18	6	0,650	0,050	-7171,3	298,7	30,536	19,3	59,7
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-66,4	2,40	-4181,0	14	4	14	4	0,650	0,050	-4181,0	690,6	12,315	12,2	0,0
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-124,8	2,40	-8497,4											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	294,9	0,00	-1867,4	14	4	14	4	0,650	0,050	-4181,0	690,6	12,315	19,1	0,0
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-242,4	0,00	-2906,5											
TABLE: Column Forces LC16																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s		
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²		
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	58,4	2,40	-3562,2	14	4	14	4	0,645	0,055	-3562,2	708,4	12,315		
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	101,0	2,40	-6661,5											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	194,9	0,00	-1504,5											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-238,7	0,00	-2351,9	14	4	14	4	0,645	0,055	-3562,2	708,4	12,315		
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	2,40	-6187,1	14	4	14	4	0,645	0,055	-6187,1	312,4	12,315		
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	2,40	-11185,4											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	232,6	0,00	-3277,8											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-232,6	0,00	-3279,7	14	4	14	4	0,645	0,055	-6187,1	312,4	12,315		
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-58,4	2,40	-3571,8	14	4	14	4	0,645	0,055	-3562,2	708,4	12,315		
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-100,9	2,40	-6689,8											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	238,7	0,00	-1510,7	14	4	14	4	0,645	0,055	-3562,2	708,4	12,315		
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-194,8	0,00	-2359,9											

Πίνακας 4.21: Αποτελέσματα υπολογισμού ροπών και οπλισμού σε υποστυλώματα για ΣΚΠ και ΚΣ σε πλαίσιο 20 ορόφων

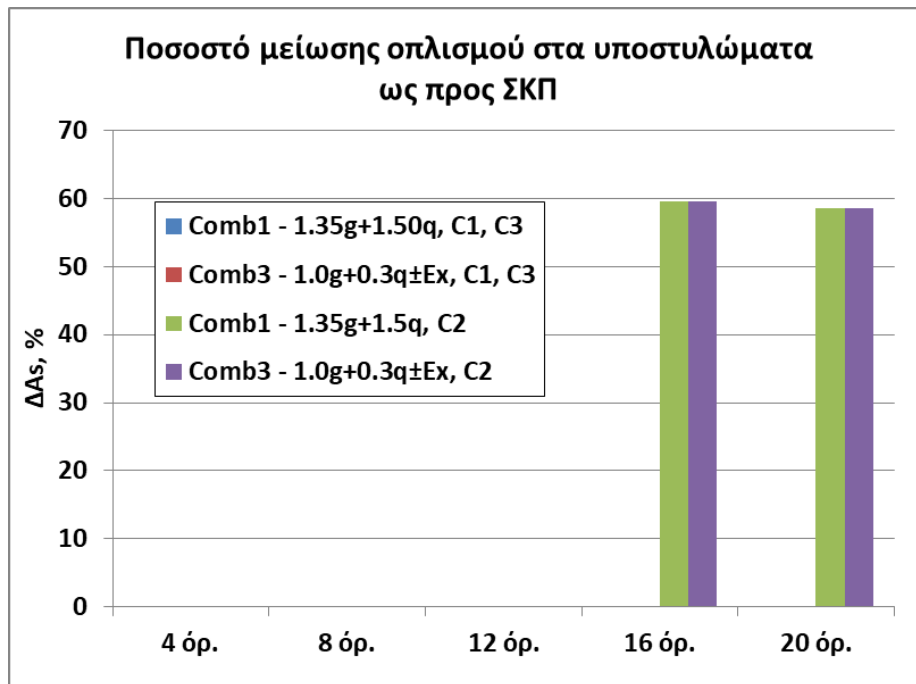
TABLE: Column Forces NC20																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε.	η εφε.	Φ θλι.	η θλι.	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s	ΔM	ΔA _s
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²	%	%
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	68,1	2,40	-5432,9	14	4	14	4	0,700	0,050	-5432,9	751,1	12,315	12,1	0,0
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	127,9	2,40	-11151,5											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	352,1	0,00	-2292,1											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-406,4	0,00	-3951,4	14	4	14	4	0,700	0,050	-5432,9	751,1	12,315	19,3	0,0
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-8941,1	22	8	22	8	0,700	0,050	-8941,1	501,9	60,821	---	58,7
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-17717,4											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	402,3	0,00	-5021,6											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-402,3	0,00	-5021,6	22	8	22	8	0,700	0,050	-8941,1	501,9	60,821	19,5	58,7
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-68,1	2,40	-5432,9	14	4	14	4	0,700	0,050	-5432,9	751,1	12,315	12,1	0,0
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-127,9	2,40	-11151,5											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	406,4	0,00	-2292,1	14	4	14	4	0,700	0,050	-5432,9	751,1	12,315	19,3	0,0
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-352,1	0,00	-3951,4											
TABLE: Column Forces LC20																
Story	Column	Load Case/Combo	max abs M	St max abs M	max P	Φ εφε	η εφε	Φ θλι	η θλι	d	d'	N _d [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd	A _s		
			kN-m	m	kN	mm		mm		m	m	kN	kNm	cm ²		
Story1	C1	Comb1 - 1.35g+1.50q	59,8	2,40	-4606,9	14	4	14	4	0,695	0,055	-4606,9	817,8	12,315		
Story1	C1	Comb2 - 1.0g + 0.3q	103,4	2,40	-8704,0											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	282,8	0,00	-1835,3											
Story1	C1	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-328,1	0,00	-3184,4	14	4	14	4	0,695	0,055	-4606,9	817,8	12,315		
Story1	C2	Comb1 - 1.35g+1.50q	0,0	0,00	-7693,9	20	4	20	4	0,695	0,055	-7693,9	367,0	25,133		
Story1	C2	Comb2 - 1.0g + 0.3q	0,0	0,00	-14022,0											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	324,0	0,00	-4097,8											
Story1	C2	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-324,0	0,00	-4097,8	20	4	20	4	0,695	0,055	-7693,9	367,0	25,133		
Story1	C3	Comb1 - 1.35g+1.50q	-59,8	2,40	-4606,9	14	4	14	4	0,695	0,055	-4606,9	817,8	12,315		
Story1	C3	Comb2 - 1.0g + 0.3q	-103,4	2,40	-8704,0											
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Max	328,1	0,00	-1835,3	14	4	14	4	0,695	0,055	-4606,9	817,8	12,315		
Story1	C3	Comb3 - 1.0g+0.3q±Ex Min	-282,8	0,00	-3184,4											



Σχήμα 4.12: Ποσοστό μεταβολής ροπών στα υποστυλώματα από ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ σε ΟΚΑ



Σχήμα 4.13: Ποσοστό μεταβολής ροπών στα υποστυλώματα από ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ στον Σεισμικό Συνδυασμό Δράσης



Σχήμα 4.14: Ποσοστό μείωσης οπλισμού στα υποστυλώματα ΚΣ σε σχέση με ΣΚΠ

4.5.4. Μειωμένες διατομές υποστυλωμάτων

Καθώς η σεισμική μάζα μειώνεται κατά 21%, στην περίπτωση της κατασκευής από κισηρόδεμα έγινε συμπληρωματική διερεύνηση για τον υπολογισμό του οπλισμού σε υποστυλώματα με μειωμένη διατομή. Το κριτήριο υπολογισμών ήταν να ικανοποιούνται τα ίδια εντατικά μεγέθη με τα πλαίσια αναφοράς της διπλωματικής εργασίας. Η σύγκριση είναι από την ασφαλή πλευρά καθώς οι μειωμένες διατομές επιφέρουν μειωμένο ίδιο βάρος δομήματος και επιτρέπουν την αύξηση των κινητών φορτίων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα. Στον Πίνακα 4.22 συγκρίνονται το ποσοστό μείωσης του οπλισμού στην περίπτωση της μειωμένης διατομής υποστυλώματος (b_{red}) σε σχέση με τις διατομές αναφοράς (b).

Στα δομήματα 4 και 8 ορόφων δεν υπολογίζεται μείωση στον οπλισμό. Στα υπόλοιπα η μείωση εμφανίζεται μόνο στο κεντρικό υποστυλώμα C2. Παρατηρείται παράλληλα ότι η μείωση της διατομής του υποστυλώματος επιφέρει μικρότερο ποσοστό μείωσης οπλισμού.

Πίνακας 4.22: Αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού σε μειωμένες διατομές

NC4 vs LC4				
		$b=0,55 \text{ m}$	$b_{red}=0,50 \text{ m}$	
C1/C3	$\Delta A_s, \%$	0	0	
C2	$\Delta A_s, \%$	0	0	

NC8 vs LC8				
		$b=0,65 \text{ m}$	$b_{red}=0,60$	
C1/C3	$\Delta A_s, \%$	0	0	
C2	$\Delta A_s, \%$	0	0	

NC12 vs LC12				
		$b=0,65 \text{ m}$	$b_{red}=0,60$	
C1/C3	$\Delta A_s, \%$	0	0	
C2	$\Delta A_s, \%$	0	33,3	

NC16 vs LC16				
		$b=0,70 \text{ m}$	$b_{red}=0,65$	
C1/C3	$\Delta A_s, \%$	0	0	
C2	$\Delta A_s, \%$	59,7	50,0	

NC20 vs LC20				
		$b=0,75 \text{ m}$	$b_{red}=0,70$	$b_{red}=0,65$
C1/C3	$\Delta A_s, \%$	0	0	0
C2	$\Delta A_s, \%$	58,7	44,9	29,2

5. Συμπερασματικές παρατηρήσεις

Λεπτομερώς, τα συμπεράσματα που αφορούν στην τεχνολογία του δομικού κισηροδέματος και στους υπολογισμούς των πλαισίων ισογείου σε δομήματα με 4, 8, 12, 16 και 20 ορόφους αναφέρονται στις παραγράφους 3.6, 4.5.1, 4.5.2, 4.5.3 και 4.5.4 με το σχετικό σχολιασμό. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση των κυριότερων από αυτά. Στους υπολογισμούς εφαρμόστηκαν οι Ευρωκώδικες EC2 και EC8 με τους οποίους συμμορφώνονται οι τεχνικές ιδιότητες του δομικού ΚΣ (716-BET-2013, Ζέρης κ.α.,2016, Μάνος κ.α.,2016).

Τεχνολογία δομικού κισηροδέματος

- Με την χρήση κίσηρης ΛΑΒΑ ΑΕ κοκκομετρίας 0/8 mm και περιεκτικότητα σε τσιμέντο CEM II42,5 από 390 έως και 477 kg/m³ παράγεται σε μονάδα σκυροδέματος δομικό ελαφροβαρές σκυρόδεμα με κατηγορίες αντοχής κατά EN 206 από LC20/22 έως και LC35/38 ή και μεγαλύτερες.
- Το δομικό ΚΣ που παράγεται με αδρανή κίσηρης που αντικαθιστούν εν όλω ή εν μέρει τα ασβεστολιθικά αδρανή έχει ίδιο βάρος νωπού στην περιοχή των 1600-1800 kg/m³. Η πυκνότητα των παραγομένων συνθέσεων βρίσκεται στην περιοχή των τιμών του ελαφροβαρούς σκυροδέματος κατά EN 206 από D1,4 έως και D1,8.
- Το δομικό ΚΣ μπορεί να είναι ινοπλισμένο ή να περιέχει και θραυστή άμμο για την επίτευξη οικονομικών συνθέσεων για προεντεταμένα στοιχεία.
- Η παραγωγή, μεταφορά, άντληση και η διάστρωση του δομικού ΚΣ δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες του σκυροδέματος κανονικού βάρους.
- Η διατήρηση της εργασιμότητας του νωπού δομικού ΚΣ επιτυγχάνεται για τουλάχιστον 3 h με την χρήση συνήθων προσθέτων σκυροδέματος (επιβραδυντής πήξης, μειωτής νερού, υπερρρευστοποιητής) και την προσθήκη υπερρρευστοποιητή έργου.
- Ο σχεδιασμός των συνθέσεων δομικού ΚΣ, η παραγωγή, μεταφορά, άντληση και διάστρωση, οι ιδιότητές του και οι συσχετισμοί τους βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206 και τα αμερικανικά πρότυπα ACI.
- Τα αποτελέσματα της επιταχυνόμενης διάχυσης χλωριόντων σε δοκίμια ελαφροσκυροδέματος υποδεικνύουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα.
- Με την χρήση δομικού ΚΣ επιτυγχάνεται μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 60% σε σχέση με το ΣΚΠ.
- Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φυσικής και επιταχυνόμενης ενανθράκωσης υποδεικνύουν διάρκεια ζωής της κατασκευής περί τα 40 έως 50 έτη, που είναι συγκρίσιμη με το συμβατικό σκυρόδεμα C20/25.

Δομοστατικοί υπολογισμοί σε πλαίσια

- Η μείωση της πυκνότητας του ΚΣ συγκριτικά με το ΣΚΠ έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σεισμικής μάζα σε ποσοστό 21% σε όλα τα πλαίσια. Η μείωση της σεισμικής μάζας προκαλεί με τη σειρά της ανάλογη μείωση της τέμνουσας βάσης, η οποία οδηγεί σε μικρότερη σεισμική καταπόνηση.
- Η ιδιοπερίοδος αυξάνεται σε όλα τα πλαίσια από ΚΣ και είναι μεγαλύτερη από T_c. Έτσι, οι επιταχύνσεις σχεδιασμού μειώνονται και βρίσκονται στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος σχεδιασμού.
- Το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του ΚΣ οδηγεί σε μεγαλύτερες οριζόντιες σχετικές μετακινήσεις στα πλαίσια σε ποσοστό από 8,0% (4 όρ.) έως και 20% (16 και 20 όρ.).
- Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών στις δοκούς των πλαισίων υπολογίσθηκε ίσο με 12% σε όλα τα πλαίσια.

- Στον συνδυασμό της σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών στις δοκούς κυμαίνεται από 18 έως 22% με την μεγαλύτερη μείωση στα πλαίσια 4 και 8 ορόφων.
- Στις δοκούς υπολογίζεται μείωση στον οπλισμό του ΚΣ σε σχέση με τον οπλισμό του ΣΚΠ.
 - Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης ανέρχεται σε 12% για τα πλαίσια 4 έως και 16 ορόφων ενώ δεν υπολογίζεται διαφορά για το πλαίσιο των 20 ορόφων.
 - Στον συνδυασμό της σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης ανέρχεται σε ~26% για όλα τα πλαίσια.
- Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών στα υποστυλώματα υπολογίσθηκε ίσο με 12% σε όλα τα πλαίσια.
- Στον συνδυασμό της σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) το ποσοστό μείωσης των ροπών στα υποστυλώματα κυμαίνεται από 19% έως 27% με την μεγαλύτερη μείωση στα πλαίσια 4 και 8 ορόφων.
- Στα υποστυλώματα υπολογίσθηκε η μείωση στον οπλισμό του ΚΣ σε σχέση με τον οπλισμό του ΣΚΠ.
 - Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία και στον συνδυασμό σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) δεν παρατηρείται διαφορά στον οπλισμό των υποστυλωμάτων στα πλαίσια 4, 8 και 12 ορόφων.
 - Στον βασικό συνδυασμό για κατακόρυφα φορτία και στον συνδυασμό σεισμικής δράσης (ΟΚΑ) ο οπλισμός υπολογίζεται μειωμένος κατά 60% στο κεντρικό υποστυλωμα (C2) στα πλαίσια 16 και 20 ορόφων.
- Υπολογισμοί με μειωμένη την διατομή των υποστυλωμάτων σε σχέση με την διατομή αναφοράς υποδεικνύουν ότι στα δομήματα 4 και 8 ορόφων δεν υπάρχει μείωση στον οπλισμό. Στα υπόλοιπα η μείωση εμφανίζεται μόνο στο κεντρικό υποστυλωμα (C2). Παρατηρείται παράλληλα ότι η μείωση της διατομής του υποστυλώματος επιφέρει μικρότερο ποσοστό μείωσης οπλισμού.

Αξίζει να σημειωθούν στο πρωτότυπο οι παρατηρήσεις των P.Kuman Mehta και Paulo J.M. Monteiro, ("CONCRETE, Microstructure, Properties and Materials", Third Edition, McGraw-Hill, New York, (2006), pp.457-458) σχετικά με τα ειδικά πλεονεκτήματα της χρήσης δομικού ελαφροσκυροδέματος:

"...While light-weight concrete will cost more than normal-weight concrete per cubic-yard, the structure will cost less as a result of the reduced dead weight and lower foundation...
 ...application of lightweight concrete can result in lower costs for foundations and reinforcing steel...
 ...Strength is not a major consideration in floor slabs; therefore, a large amount of lightweight concrete is used to reduce the dead weight of concrete in floors of high-rise buildings...
 ...One Shell Plaza, Houston, Texas, is an all-lightweight concrete structure of 52 stories, containing a 70 by 52 by 2.5 m lightweight concrete pad, 18 m below grade. A concrete mixture of 1840 kg/m³ density and 41.2 MPa compressive strength was used for shear walls, columns, and mat foundation. If normal concrete had been used, only a 35-story structure could have been safely designed due to the limited bearing capacity of the soil...
 ...Kulka and Polivka state that the basic economy of lightweight-aggregate concrete can be demonstrated by the savings in reinforcement...
 ...Among other advantages of reduction in the weight of concrete is the higher resistance of shear elements to earthquake loading since seismic forces are largely a direct function of the dead weight of the structure...
 ...Although expanded clay and shale aggregates are most suitable for the production of structural-quality lightweight concrete, the escalation of fuel costs in the 1970s has priced these aggregates out of many markets..."

6. Προτάσεις

Οι εφαρμογές του ελαφροσκυροδέματος σε διεθνές επίπεδο (ACI 213R-03, Mehta,2006, Concrete Bridge Development Group,2006), η ερευνητική δραστηριότητα (Eurolightcon,1998, 716-BET-2013, Papanicolaou et al.,1999, Papanicolaou et al.,2002, Ζέρης κ.α, 2016, Μάνος,2014, Μάνος κ.α.,2016) και η κανονιστική τεκμηρίωση στην Ευρώπη (EN 206, EC2) και στις ΗΠΑ (ACI 211.2-98, ACI 213R-03) δείχνουν την εκτεταμένη δυνατότητα για ποικίλες εφαρμογές του δομικού κισηροδέματος.

Η πειραματική έρευνα για τις δομοστατικές ιδιότητες του δομικού κισηροδέματος (716-BET-2013) έδειξαν αντικείμενα περαιτέρω διερεύνησης

- την διατμητική και την μετελαστική συμπεριφορά λόγω του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας και της αυξημένης ψαθυρότητας
- την συμπεριφορά διεπιφανειών από δομικό κισηρόδεμα σε ανακύκλιση

Παρά τις εκτεταμένες εφαρμογές του δομικού ελαφροσκυροδέματος, η πορώδης δομή των ελαφροβαρών αδρανών (μεταξύ των οποίων και η κίσηρη) δημιουργεί προκλήσεις στην επιστημονική και τεχνική κοινότητα σχετικά με την ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση (EN 206, κατηγορίες XC) ή σε παραθαλάσσιο περιβάλλον (EN 206, κατηγορίες XS). Στην εκτεταμένη βιβλιογραφία (ενδεικτικά: Eurolightcon,1998, Chandra (a) et al.,2002, Gündüz et al.,2005, Lotfy et al.,2016, Mircea et al.,1994, Neville,2002, Swamy et al.,1993, Zhang et al.,1991, Καφφετζάκης, 2014) οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες αφορούν περιορισμένο εύρος πρώτων υλών ή παραμέτρων, τα δε συμπεράσματα στα βιβλία αναφοράς γενικεύονται διατηρώντας την αβεβαιότητα για τις επιδόσεις του ελαφροσκυροδεματος σε θέματα ανθεκτικότητας. Η βιβλιογραφία εκτείνεται από την εξαιρετική ανθεκτικότητα σε πλοία κατασκευασμένα από σκυρόδεμα με ελαφροβαρή αδρανή (Chandra et al.,(b), 2002, Sturm et al.,2002) έως την μειωμένη ανθεκτικότητα σε κισηροκονιάματα (Batis et al.,2005).

Η εμπειρία από τα ερευνητικά εγχειρήματα στον Όμιλο ΗΡΑΚΛΗΣ δείχνει ότι ο χαμηλός λόγος νερού/τσιμέντο και η περιεκτικότητα κισηροδέματος σε τσιμέντο μεγαλύτερη από 450 kg/m^3 προσδίδουν πολύ καλές επιδόσεις ανθεκτικότητας στην ενανθράκωση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εστιάζεται στις εξαιρετικές επιδόσεις του δομικού κισηροδέματος στην αντίσταση σε διάχυση χλωριόντων. Έτσι εκτός από την σε βάθος μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων, η ανθεκτικότητα του δομικού κισηροδέματος αποτελεί κρίσιμο πεδίο έρευνας τόσο βασικής για την αποκάλυψη των μηχανισμών αντίστασης στη διάβρωση όσο και εφαρμοσμένης σχετικά με τις μεθόδους αύξησης της ανθεκτικότητας.

7. Βιβλιογραφία

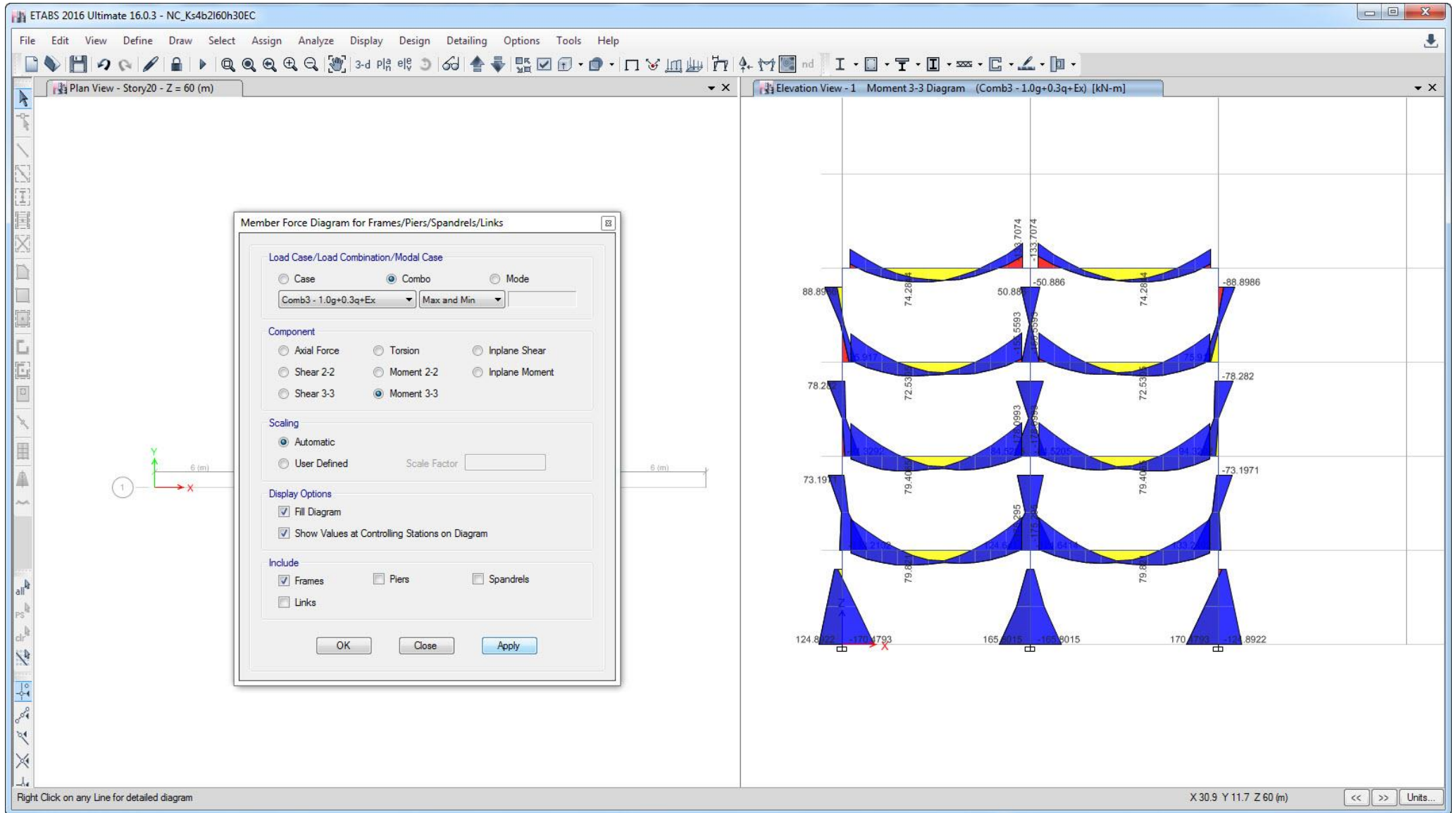
- ACI 211.2-98 (reapproved 2004), “Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete”.
- ACI 213R-03 (2003), “Guide for Standard Practice for Structural Lightweight Aggregate Concrete”.
- ASTM C78 (2012), “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)”.
- ASTM C157 (2014), “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic – Cement Mortar and Concrete”.
- ASTM C469 (2014). “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”.
- ASTM C597 (2002). “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”.
- ASTM C876 (2015). “Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”.
- ASTM C1202 (2012). “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.
- Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., “Corrosion Protection of Steel in Pumice Lightweight Mortar by Coatings”, *Cement & Concrete Composites* 27 (2005), pp. 261-267.
- Chandra S., Berntsson L., “Lightweight Aggregate Concrete - Science, Technology, and Applications”, Noyes, New York, 2002, (a) pp. 242-289, (b) pp. 371-374.
- Concrete Bridge Development Group, “Guide to the Use of Lightweight Aggregate Concrete in Bridges”, The Concrete Society, Surrey, 2006.
- CSI ETABS 2016, Structural Software for Building Analysis and Design
- EC2 (2004), EN 1992-1-1 Ευρωκώδικας 2. Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα. Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN.
- EC8 (2004), EN 1998-1-1 Ευρωκώδικας 8. Σχεδιασμός κατασκευών για σεισμό. Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, CEN.
- EN 206 (2013), «Σκυρόδεμα – Προδιαγραφή, επιδόσεις, παραγωγή και συμμόρφωση», ΕΛΟΤ EN 206.
- EN 12390-6 (2009), “Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens”, CEN, European Standardization Committee, Brussels.
- EN 12390-8 (2009), “Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure”, CEN, European Standardization Committee, Brussels.
- EN 12664, (2001), “Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance”, CEN, European Standardization Committee, Brussels.
- EuroLightCon, Definition and International Consensus Report, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, April 1998.
- EuroLightCon, LWAC Material Properties State-of-the-Art, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, December 1998.
- EuroLightCon (1998), “Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete”, Final Reports, Project BE96-3942, Brite Euram III.
- EuroLightCon_1 (2000), “Properties of LWAC Made with Natural Lightweight Aggregates”, in Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, Report BE96-3942/R17, Project BE96-3942, Brite Euram III.

- Gündüz L., Uğur İ., “The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures”, *Cement and Concrete Research* 35 (2005), 1859–1864.
- Lotfy A., Hossain K.M.A., Lachemi M., “Transport and Durability Properties of Self-Consolidating Concrete Using Three Types of Lightweight Aggregates”, *ACI Materials Journal*, September-October 2016, 679.
- Mehta P.K., Monteiro P.J.M., “CONCRETE, Microstructure, Properties and Materials”, Third Edition, McGraw-Hill, New York, (2006), pp.457-458.
- Mircea D., Ioani A., Filip M., Pepenar I., “Long-Term Durability of Reinforced and Prestressed Elements in Aggressive Environments”, *ACI Materials Journal*, March-April, 1994, 135.
- Neville, A.M. “Properties of Concrete”, Fourth and Final Edition, Pearson, Essex, (2002), pp. 704-706.
- Papanicolaou, C.G., Triantafyllou, T.C., “Mechanical behavior and optimum design of concrete panels made of High Strength Concrete (HSC) faces and Lightweight Aggregate Concrete (LWAC) core”, in ‘Structural Concrete – Bridge Between People’ Proceedings of the FIB Symposium, Prague, 12-15 October 1999, V.2, Viacon Agency, Prague), pp. 411-416.
- Papanicolaou, C.G., Triantafyllou, T. C., “Shear transfer capacity along pumice aggregate concrete and high performance concrete interfaces” *Materials and Structures*, 35, 4, (2002), pp. 237-245.
- Sturm R.D., McAskill N., Burg R.G., Morgan D.R., “Evaluation of Lightweight Concrete Performance in 55 to 80 Year Old Ships”, *High-Performance Concrete Research to Practice*, SP189 ACI, 2002.
- Swamy R.N., Jiang E.D., “Pore structure and carbonation of lightweight concrete after 10 years exposure”, *ACI SP 136-11*, 1993.
- Zhang M.-H., GjØrvn O.E, “Permeability of High-Strength Lightweight Concrete”, *ACI Materials Journal* | September-October 1991, 463.
- 716-BET–2013, “Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη», Τελικές Εκθέσεις των Ερευνητικών Εργασιών, 2015.
- «Δομικό Ελαφροσκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητας με Κίσηρη» Ημερίδα στο ΕΚΕΤ, 21 Ιουλίου 2015.
- Ζέρης Χ., Παλιεράκη Β., Μάνος Γ., «Μεταφορά τέμνουσας σε διεπιφάνειες Ωπλισμένου Ελαφροσκυροδέματος», 17ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος”, Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016.
- Καφφετζάκης Μ., «Συστηματική μελέτη αυτοσυμπυκνούμενου κισσηροδέματος», Διδακτορική Διατριβή, Π. Πατρών, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Εργ. Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών, 2014.
- Μάνος, Γ., «Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίου από οπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα σχεδιασμένου κατά Ευρωκώδικα 2 και 8», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολ.-Μηχ. ΕΜΠ, 2014.
- Μάνος Γ., Ζέρης Χ., «Πειραματική διερεύνηση περισφιγμένων υποστυλωμάτων από φέρον κισσηρόδεμα», 17ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος”, Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016.
- Μάνος Γ., Λιβανός Δ., Στάμος Κ., Ζέρης Χ., «Πειραματική διερεύνηση δομικών μελών από φέρον κισσηρόδεμα υπό σεισμική και χρόνια καταπόνηση», 17ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος”, Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016.

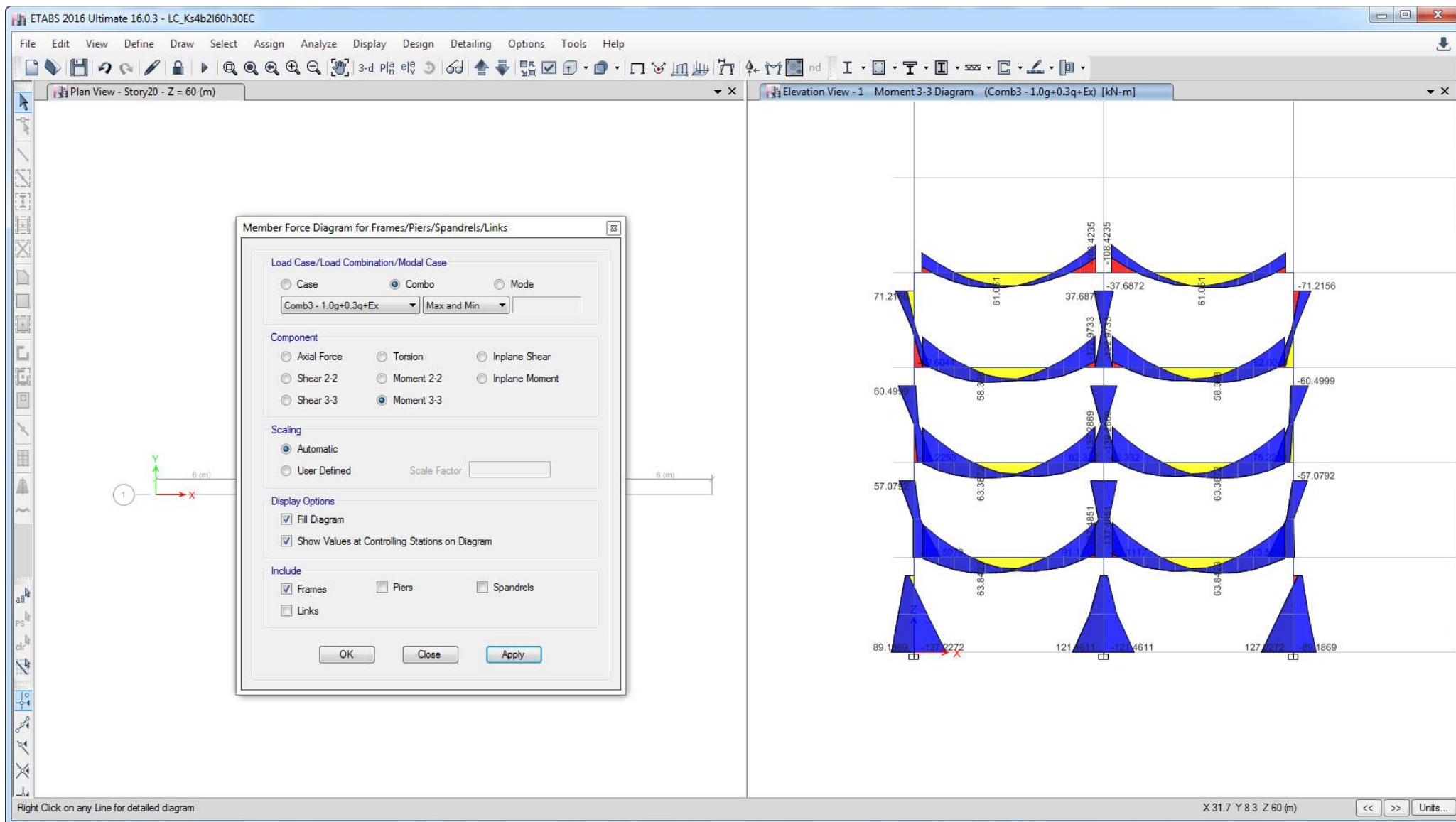
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Σχετικά με τον οπλισμό διαμέτρου 10 και 12 mm, εμφανίζεται μόνο στους πίνακες του Παραρτήματος με σκοπό την άτυπη αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και σε περιοχή εκτός ΕΚΩΣ2000 και Ευρωκωδίκων. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα/συμπεράσματα του κυρίως κειμένου της διπλωματικής εργασίας αφορούν σε διαμέτρους οπλισμών, που προβλέπονται από ΕΚΩΣ2000 και Ευρωκώδικες και οι αντίστοιχες λύσεις εμφανίζονται στους πίνακες του Παραρτήματος με μπλε και πράσινο χρώμα.

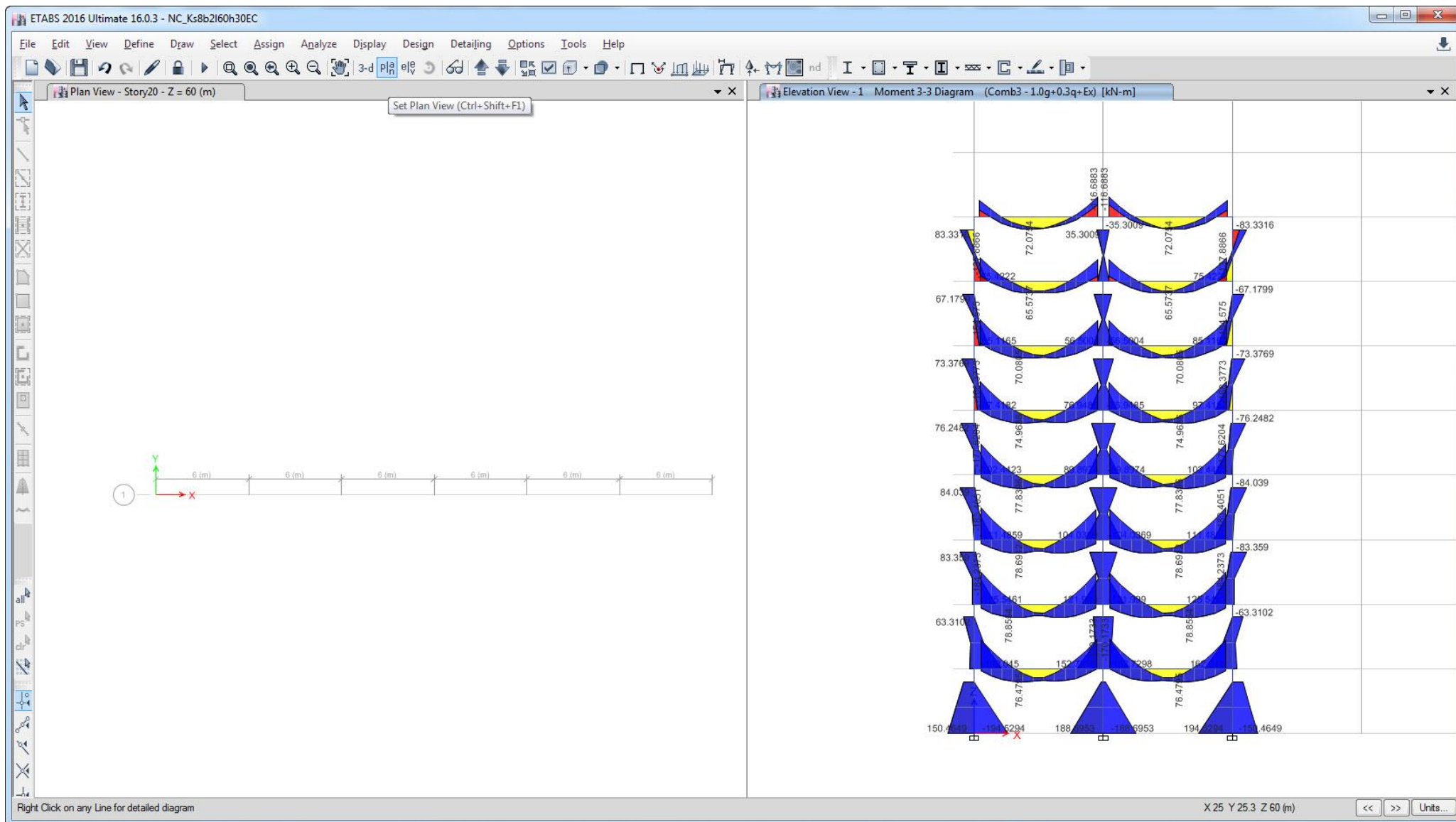
Διαγράμματα ροπών



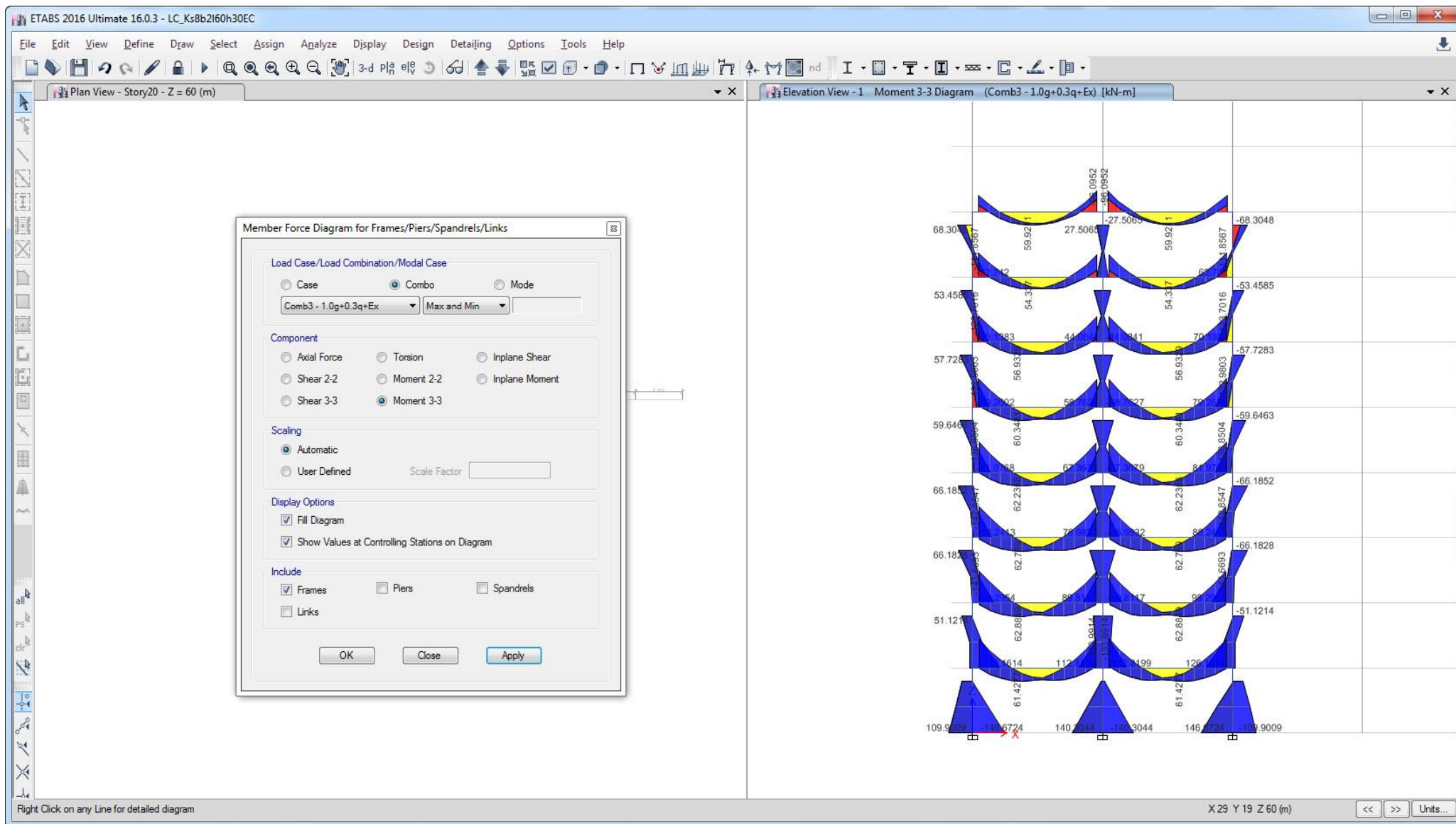
Σχήμα Π1 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ NC4



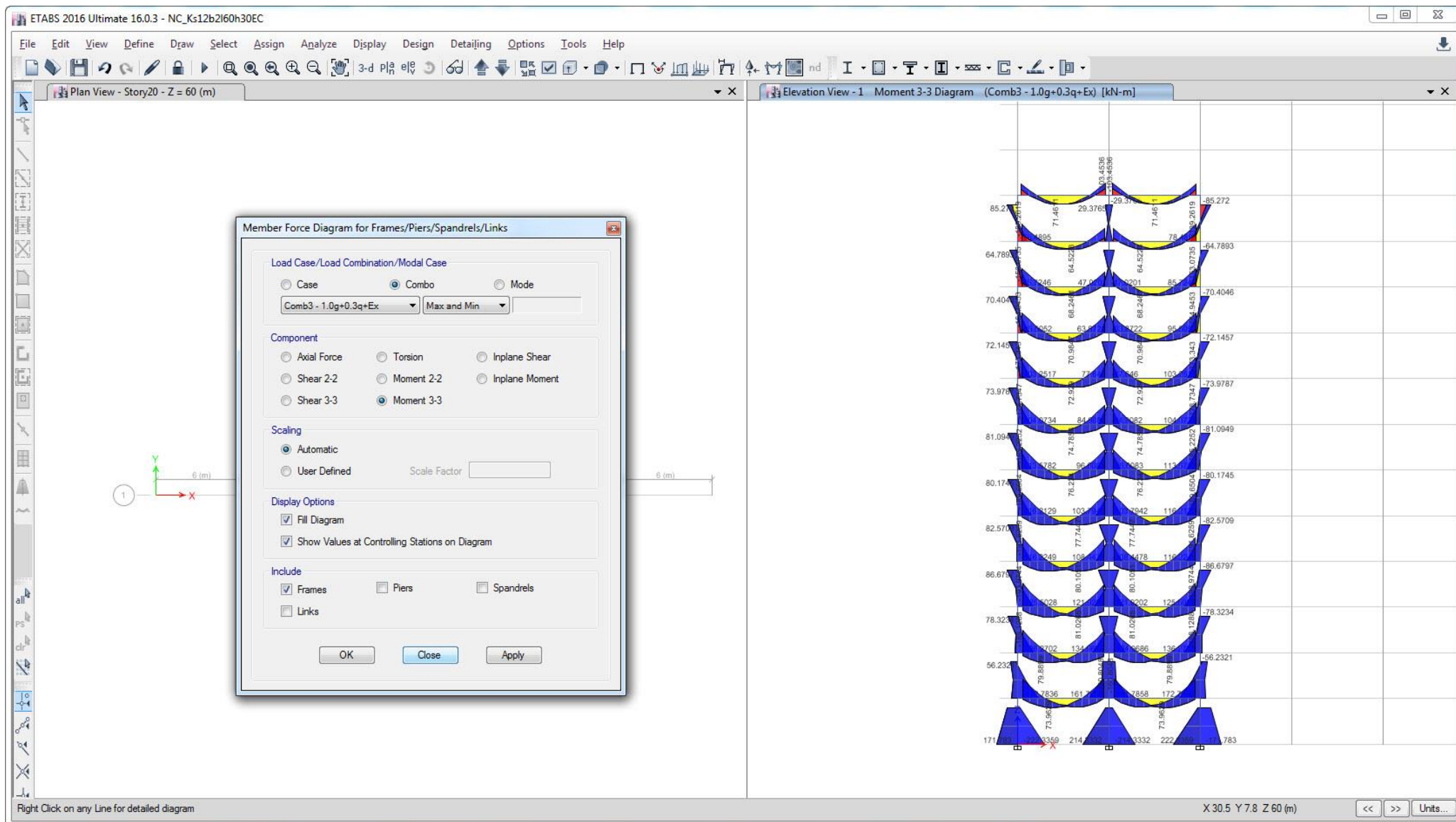
Σχήμα Π2 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ LC4



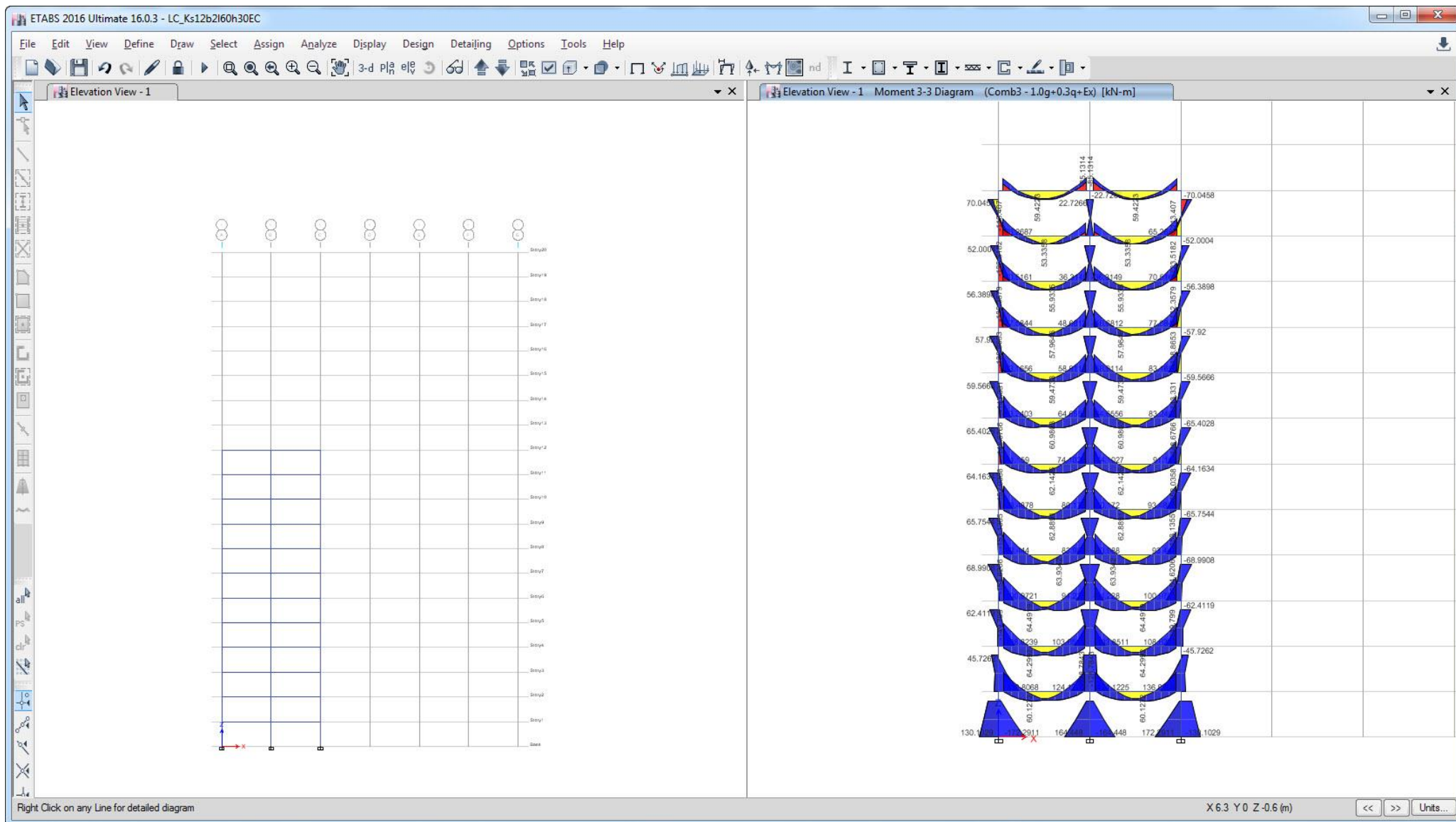
Σχήμα Π3 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ NC8



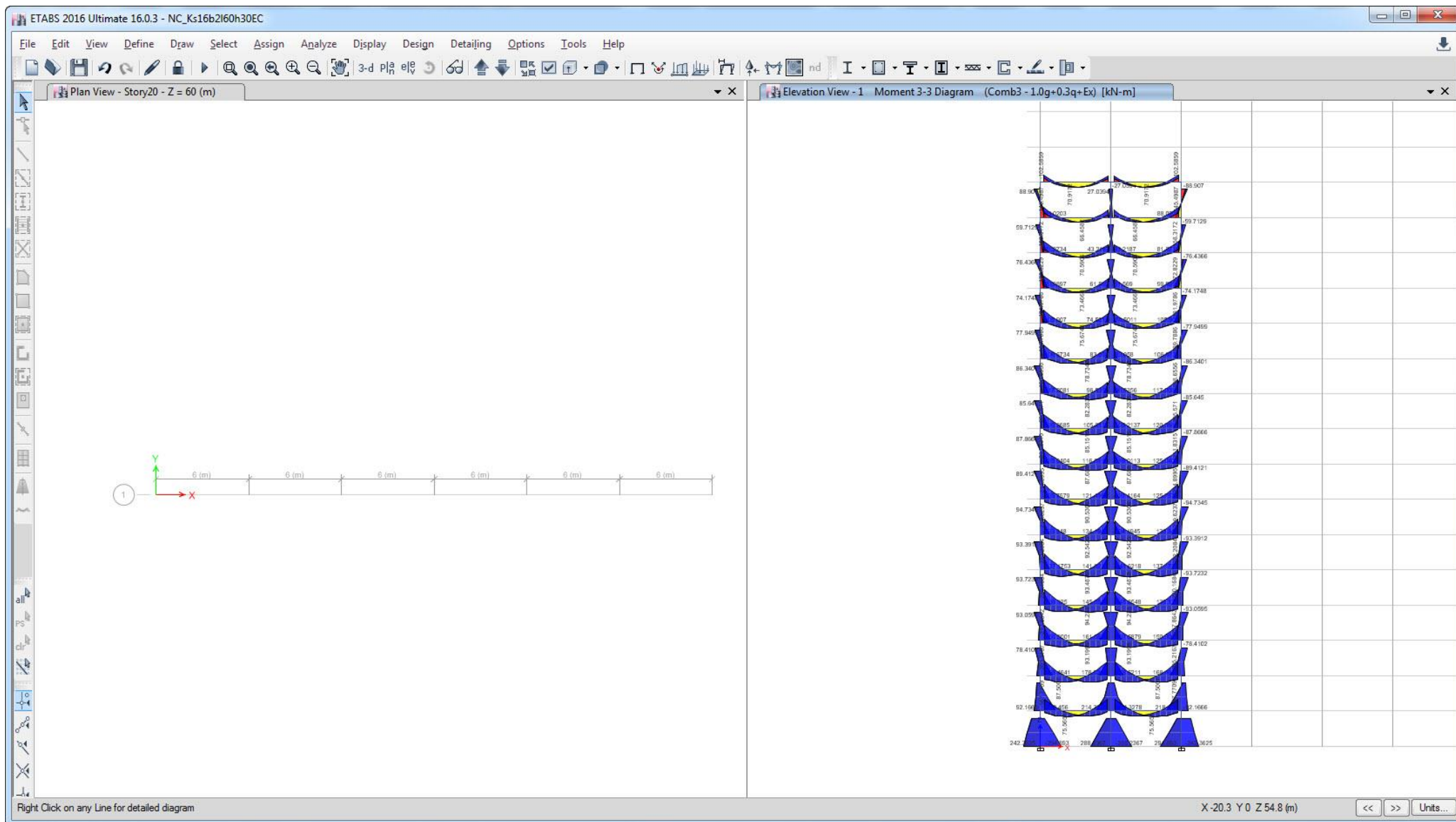
Σχήμα Π4 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ LC8



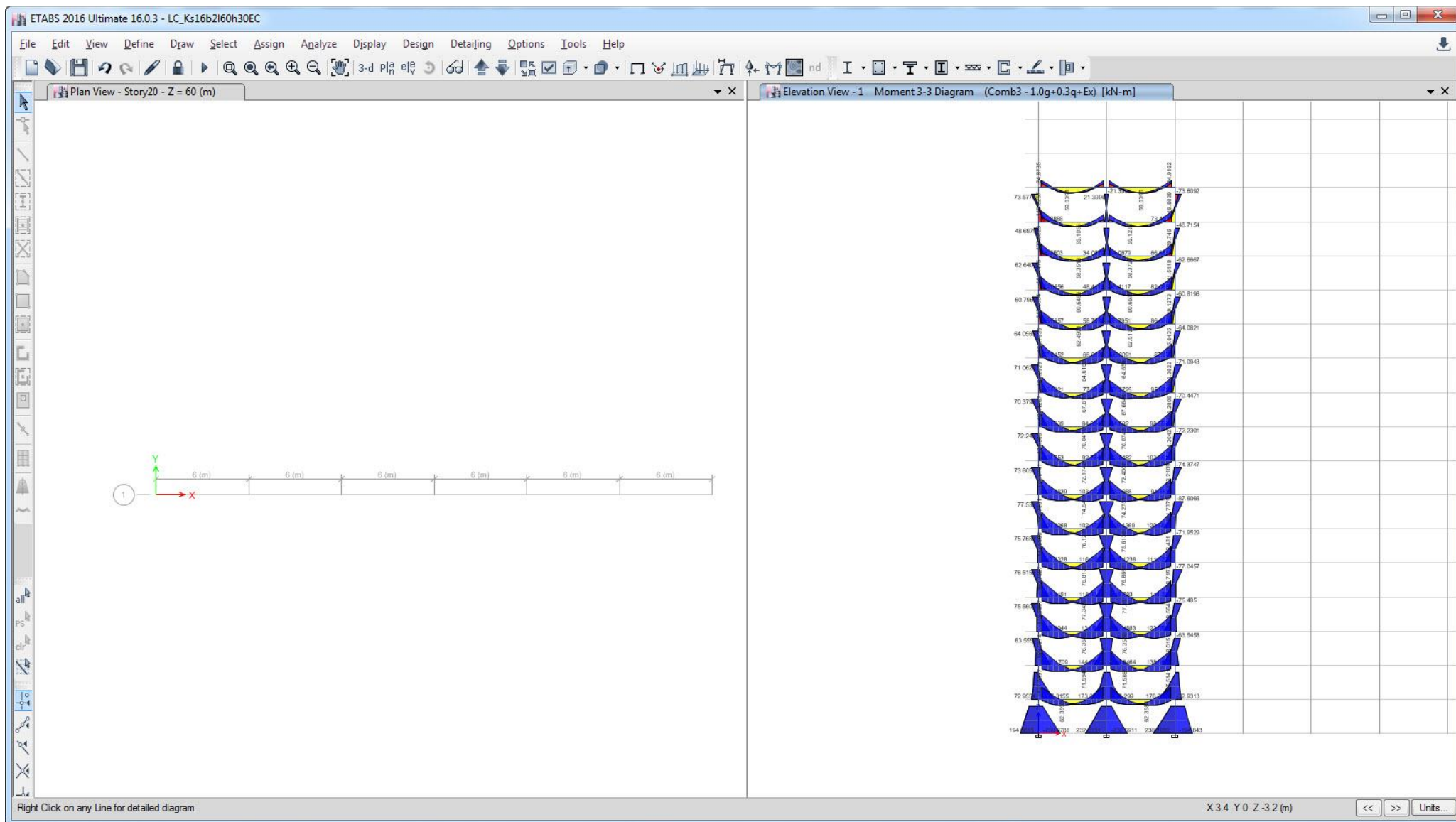
Σχήμα Π5 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ NC12



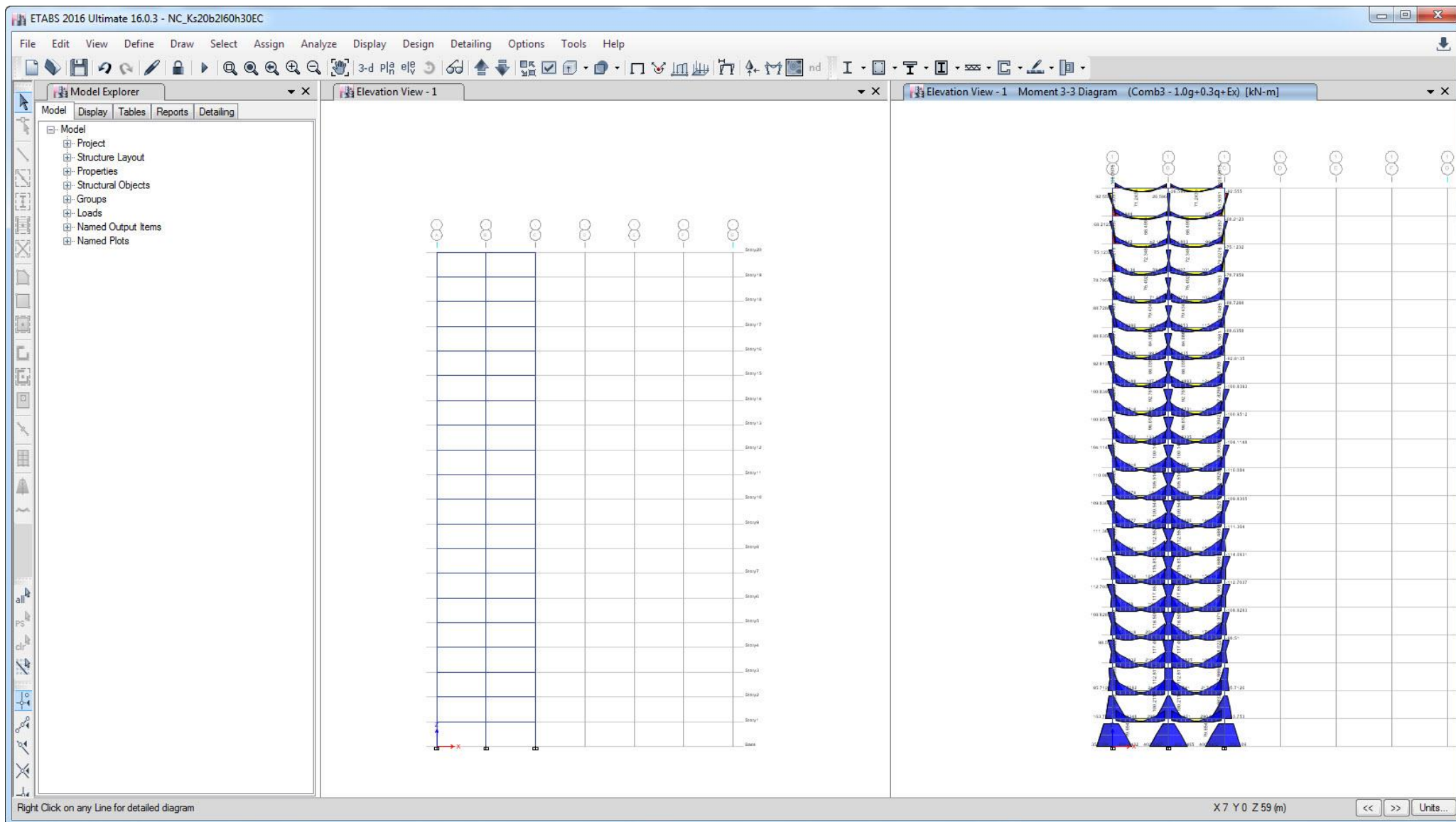
Σχήμα Π6 Διάγραμμα ροπών 1g + 0,3q + Ex LC12



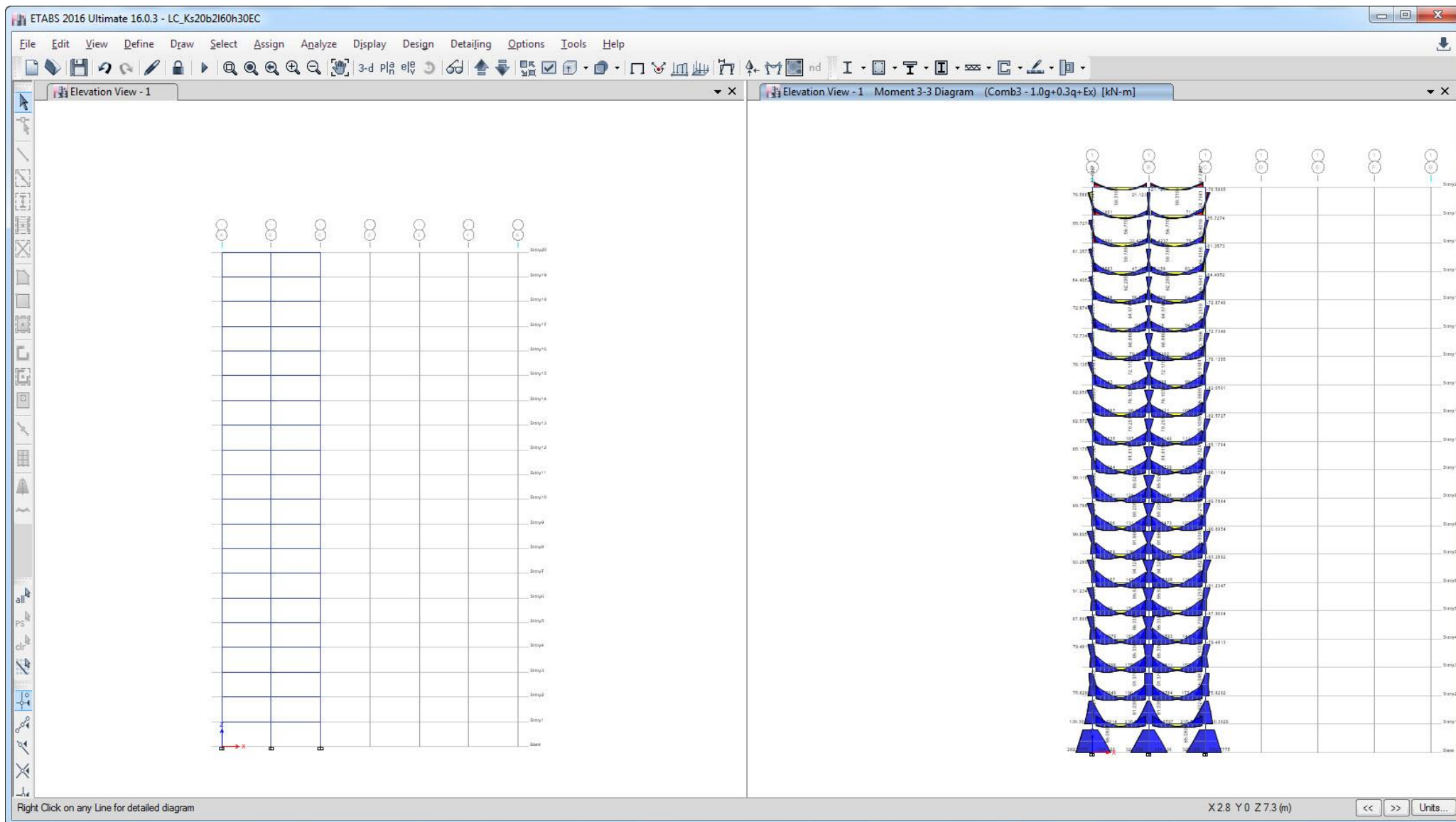
Σχήμα Π7 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ NC16



Σχήμα Π8 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ LC16



Σχήμα Π9 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ NC20



Σχήμα 10 Διάγραμμα ροπών $1g + 0,3q + Ex$ LC20

Πινακοποιημένα αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού δοκών και υποστυλωμάτων πλαισίων

Πίνακας Π1: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού δοκών πλαισίου 4 ορόφων

Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	A _{s1} (cm ²) εφε	A _{s2} (cm ²) θλι	b _{eff} (m)	d (m)	d' (m)	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
12	3	12	2	3,393	2,262	1,270	0,550	0,050	84,24	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,270	0,550	0,050	110,42	6,786
14	3	12	2	4,618	2,262	1,270	0,550	0,050	111,47	6,880
14	3	14	2	4,618	3,079	1,270	0,550	0,050	113,36	7,697
12	5	12	3	5,655	3,393	1,270	0,550	0,050	138,04	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,270	0,550	0,050	145,37	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,270	0,550	0,050	146,32	9,111
16	3	16	2	6,032	4,021	1,270	0,550	0,050	147,60	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,270	0,550	0,050	148,24	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,270	0,550	0,050	149,20	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,270	0,550	0,050	184,66	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,270	0,550	0,050	185,30	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,270	0,550	0,050	191,52	10,304
16	4	16	2	8,042	4,021	1,270	0,550	0,050	192,45	12,064
16	4	14	2	8,042	3,079	1,270	0,550	0,050	192,26	11,121
16	5	12	3	10,053	3,393	1,270	0,550	0,050	236,95	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,270	0,550	0,050	237,60	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,270	0,550	0,050	237,91	16,085
12	3	12	2	3,393	2,262	1,270	0,545	0,055	83,86	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,270	0,545	0,055	109,93	6,786
14	3	12	2	4,618	2,262	1,270	0,545	0,055	112,09	6,880
14	3	14	2	4,618	3,079	1,270	0,545	0,055	113,50	7,697
12	5	12	3	5,655	3,393	1,270	0,545	0,055	137,40	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,270	0,545	0,055	144,42	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,270	0,545	0,055	145,52	9,111
16	3	16	2	6,032	4,021	1,270	0,545	0,055	147,03	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,270	0,545	0,055	147,36	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,270	0,545	0,055	148,60	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,270	0,545	0,055	183,11	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,270	0,545	0,055	184,24	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,270	0,545	0,055	189,90	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,270	0,545	0,055	190,60	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,270	0,545	0,055	191,21	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,270	0,545	0,055	235,02	13,446
16	5	16	3	10,053	6,032	1,270	0,545	0,055	235,83	16,085
16	5	14	3	10,053	4,618	1,270	0,545	0,055	235,87	14,671

Πίνακας Π2: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού υποστυλωμάτων πλαισίου 4 ορόφων

		Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	d (m)	d' (m)	N _a (kN) [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
NC4	C1	10	2	10	2	0,500	0,050	-950,20	232,99	3,142
NC4	C1	12	2	12	2	0,500	0,050	-950,20	246,51	4,524
NC4	C1	10	3	10	3	0,500	0,050	-950,20	248,36	4,712
NC4	C1	14	2	14	2	0,500	0,050	-950,20	262,49	6,158
NC4	C1	10	4	10	4	0,500	0,050	-950,20	263,72	6,283
NC4	C1	12	3	12	3	0,500	0,050	-950,20	268,64	6,786
NC4	C1	16	2	16	2	0,500	0,050	-950,20	280,93	8,042
NC4	C1	12	4	12	4	0,500	0,050	-950,20	290,77	9,048
NC4	C1	14	3	14	3	0,500	0,050	-950,20	292,61	9,236
NC4	C1	16	3	16	3	0,500	0,050	-950,20	320,27	12,064
NC4	C1	14	4	14	4	0,500	0,050	-950,20	322,73	12,315
NC4	C1	16	4	16	4	0,500	0,050	-950,20	359,61	16,085
LC4	C1	10	2	10	2	0,495	0,055	-813,40	209,83	3,142
LC4	C1	12	2	12	2	0,495	0,055	-813,40	221,93	4,524
LC4	C1	10	3	10	3	0,495	0,055	-813,40	223,69	4,712
LC4	C1	14	2	14	2	0,495	0,055	-813,40	237,96	6,158
LC4	C1	10	4	10	4	0,495	0,055	-813,40	239,06	6,283
LC4	C1	12	3	12	3	0,495	0,055	-813,40	244,48	6,786
LC4	C1	16	2	16	2	0,495	0,055	-813,40	255,49	8,042
LC4	C1	12	4	12	4	0,495	0,055	-813,40	264,31	9,048
LC4	C1	14	3	14	3	0,495	0,055	-813,40	266,08	9,236
LC4	C1	16	3	16	3	0,495	0,055	-813,40	293,94	12,064
LC4	C1	14	4	14	4	0,495	0,055	-813,40	296,16	12,315
LC4	C1	16	4	16	4	0,495	0,055	-813,40	330,23	16,085
NC4	C2	10	2	10	2	0,500	0,050	-1876,30	315,21	3,142
NC4	C2	12	2	12	2	0,500	0,050	-1876,30	328,73	4,524
NC4	C2	10	3	10	3	0,500	0,050	-1876,30	330,58	4,712
NC4	C2	14	2	14	2	0,500	0,050	-1876,30	344,71	6,158
NC4	C2	10	4	10	4	0,500	0,050	-1876,30	345,94	6,283
NC4	C2	12	3	12	3	0,500	0,050	-1876,30	350,86	6,786
NC4	C2	16	2	16	2	0,500	0,050	-1876,30	363,15	8,042
NC4	C2	12	4	12	4	0,500	0,050	-1876,30	372,99	9,048
NC4	C2	14	3	14	3	0,500	0,050	-1876,30	374,83	9,236
NC4	C2	16	3	16	3	0,500	0,050	-1876,30	402,49	12,064
NC4	C2	14	4	14	4	0,500	0,050	-1876,30	404,95	12,315
NC4	C2	16	4	16	4	0,500	0,050	-1876,30	441,83	16,085
LC4	C2	10	2	10	2	0,495	0,055	-1627,90	300,62	3,142
LC4	C2	12	2	12	2	0,495	0,055	-1627,90	313,84	4,524
LC4	C2	10	3	10	3	0,495	0,055	-1627,90	315,65	4,712
LC4	C2	14	2	14	2	0,495	0,055	-1627,90	329,47	6,158
LC4	C2	10	4	10	4	0,495	0,055	-1627,90	330,67	6,283
LC4	C2	12	3	12	3	0,495	0,055	-1627,90	335,48	6,786
LC4	C2	16	2	16	2	0,495	0,055	-1627,90	347,50	8,042
LC4	C2	12	4	12	4	0,495	0,055	-1627,90	357,12	9,048
LC4	C2	14	3	14	3	0,495	0,055	-1627,90	358,92	9,236
LC4	C2	16	3	16	3	0,495	0,055	-1627,90	385,96	12,064
LC4	C2	14	4	14	4	0,495	0,055	-1627,90	388,37	12,315
LC4	C2	16	4	16	4	0,495	0,055	-1627,90	424,43	16,085

NC4	C1	10	2	10	2	0,450	0,050	-950,20	199,66	3,142
NC4	C1	12	2	12	2	0,450	0,050	-950,20	211,68	4,524
NC4	C1	10	3	10	3	0,450	0,050	-950,20	213,32	4,712
NC4	C1	14	2	14	2	0,450	0,050	-950,20	225,89	6,158
NC4	C1	10	4	10	4	0,450	0,050	-950,20	226,98	6,283
NC4	C1	12	3	12	3	0,450	0,050	-950,20	231,35	6,786
NC4	C1	16	2	16	2	0,450	0,050	-950,20	242,28	8,042
NC4	C1	12	4	12	4	0,450	0,050	-950,20	251,02	9,048
NC4	C1	14	3	14	3	0,450	0,050	-950,20	252,66	9,236
NC4	C1	16	3	16	3	0,450	0,050	-950,20	277,24	12,064
NC4	C1	14	4	14	4	0,450	0,050	-950,20	279,43	12,315
NC4	C1	16	4	16	4	0,450	0,050	-950,20	312,21	16,085
LC4	C1	10	2	10	2	0,445	0,055	-813,40	180,62	3,142
LC4	C1	12	2	12	2	0,445	0,055	-813,40	192,59	4,524
LC4	C1	10	3	10	3	0,445	0,055	-813,40	195,02	4,712
LC4	C1	14	2	14	2	0,445	0,055	-813,40	206,50	6,158
LC4	C1	10	4	10	4	0,445	0,055	-813,40	207,50	6,283
LC4	C1	12	3	12	3	0,445	0,055	-813,40	211,49	6,786
LC4	C1	16	2	16	2	0,445	0,055	-813,40	221,55	8,042
LC4	C1	12	4	12	4	0,445	0,055	-813,40	229,90	9,048
LC4	C1	14	3	14	3	0,445	0,055	-813,40	231,47	9,236
LC4	C1	16	3	16	3	0,445	0,055	-813,40	255,38	12,064
LC4	C1	14	4	14	4	0,445	0,055	-813,40	257,39	12,315
LC4	C1	16	4	16	4	0,445	0,055	-813,40	288,59	16,085
NC4	C2	10	2	10	2	0,450	0,050	-1876,30	237,62	3,142
NC4	C2	12	2	12	2	0,450	0,050	-1876,30	248,11	4,524
NC4	C2	10	3	10	3	0,450	0,050	-1876,30	249,54	4,712
NC4	C2	14	2	14	2	0,450	0,050	-1876,30	260,58	6,158
NC4	C2	10	4	10	4	0,450	0,050	-1876,30	261,54	6,283
NC4	C2	12	3	12	3	0,450	0,050	-1876,30	265,34	6,786
NC4	C2	16	2	16	2	0,450	0,050	-1876,30	275,12	8,042
NC4	C2	12	4	12	4	0,450	0,050	-1876,30	282,94	9,048
NC4	C2	14	3	14	3	0,450	0,050	-1876,30	284,41	9,236
NC4	C2	16	3	16	3	0,450	0,050	-1876,30	306,44	12,064
NC4	C2	14	4	14	4	0,450	0,050	-1876,30	308,34	12,315
NC4	C2	16	4	16	4	0,450	0,050	-1876,30	338,61	16,085
LC4	C2	10	2	10	2	0,445	0,055	-1627,90	234,65	3,142
LC4	C2	12	2	12	2	0,445	0,055	-1627,90	244,79	4,524
LC4	C2	10	3	10	3	0,445	0,055	-1627,90	246,18	4,712
LC4	C2	14	2	14	2	0,445	0,055	-1627,90	256,87	6,158
LC4	C2	10	4	10	4	0,445	0,055	-1627,90	257,81	6,283
LC4	C2	12	3	12	3	0,445	0,055	-1627,90	261,53	6,786
LC4	C2	16	2	16	2	0,445	0,055	-1627,90	270,77	8,042
LC4	C2	12	4	12	4	0,445	0,055	-1627,90	278,56	9,048
LC4	C2	14	3	14	3	0,445	0,055	-1627,90	279,99	9,236
LC4	C2	16	3	16	3	0,445	0,055	-1627,90	301,55	12,064
LC4	C2	14	4	14	4	0,445	0,055	-1627,90	303,45	12,315
LC4	C2	16	4	16	4	0,445	0,055	-1627,90	332,67	16,085

Πίνακας Π3: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών σπλισμού δοκών πλαισίου 8 ορόφων

Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	A_{s1} (cm ²) εφε	A_{s2} (cm ²) θλι	b_{eff} (m)	d (m)	d' (m)	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
12	3	12	2	3,393	2,262	1,370	0,550	0,050	84,34	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,550	0,050	110,68	6,786
14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,550	0,050	112,69	7,697
14	3	12	2	4,618	2,262	1,370	0,550	0,050	112,63	6,880
12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,550	0,050	138,42	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,370	0,550	0,050	145,54	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,370	0,550	0,050	146,74	9,111
14	4	14	2	6,158	3,079	1,370	0,550	0,050	148,34	9,236
16	3	16	2	6,032	4,021	1,370	0,550	0,050	147,79	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,370	0,550	0,050	148,44	8,419
14	5	12	3	7,697	3,393	1,370	0,550	0,050	185,20	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,550	0,050	186,25	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,370	0,550	0,050	191,89	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,370	0,550	0,050	192,77	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,370	0,550	0,050	193,52	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,370	0,550	0,050	237,91	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,370	0,550	0,050	238,36	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,370	0,550	0,050	239,01	16,085
12	3	12	2	3,393	2,262	1,370	0,545	0,055	83,98	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,545	0,055	108,06	6,786
14	3	12	2	4,618	2,262	1,370	0,545	0,055	112,26	6,880
14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,545	0,055	113,64	7,697
12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,545	0,055	137,94	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,370	0,545	0,055	144,62	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,370	0,545	0,055	146,02	9,111
16	3	16	2	6,032	4,021	1,370	0,545	0,055	147,22	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,370	0,545	0,055	147,47	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,370	0,545	0,055	148,81	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,370	0,545	0,055	184,32	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,545	0,055	185,07	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,370	0,545	0,055	190,46	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,370	0,545	0,055	191,39	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,370	0,545	0,055	192,29	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,370	0,545	0,055	236,39	13,446
16	5	16	3	10,053	6,032	1,370	0,545	0,055	237,39	16,085
16	5	14	3	10,053	4,618	1,370	0,545	0,055	237,19	14,671

Πίνακας Π4: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών σπλισμού υποστυλωμάτων πλαισίου 8 ορόφων

		Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	d (m)	d' (m)	N _d (kN) [Εφελκυ σμός θετικός]	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
NC8	C1	10	2	10	2	0,600	0,050	-1983,40	463,30	3,142
NC8	C1	12	2	12	2	0,600	0,050	-1983,40	479,83	4,524
NC8	C1	10	3	10	3	0,600	0,050	-1983,40	482,08	4,712
NC8	C1	14	2	14	2	0,600	0,050	-1983,40	499,36	6,158
NC8	C1	10	4	10	4	0,600	0,050	-1983,40	500,87	6,283
NC8	C1	12	3	12	3	0,600	0,050	-1983,40	506,88	6,786
NC8	C1	16	2	16	2	0,600	0,050	-1983,40	521,90	8,042
NC8	C1	12	4	12	4	0,600	0,050	-1983,40	533,92	9,048
NC8	C1	14	3	14	3	0,600	0,050	-1983,40	536,17	9,236
NC8	C1	16	3	16	3	0,600	0,050	-1983,40	569,98	12,064
NC8	C1	14	4	14	4	0,600	0,050	-1983,40	572,99	12,315
NC8	C1	16	4	16	4	0,600	0,050	-1983,40	618,06	16,085
LC8	C1	10	2	10	2	0,595	0,055	-1691,90	424,96	3,142
LC8	C1	12	2	12	2	0,595	0,055	-1691,90	441,18	4,524
LC8	C1	10	3	10	3	0,595	0,055	-1691,90	443,40	4,712
LC8	C1	14	2	14	2	0,595	0,055	-1691,90	460,36	6,158
LC8	C1	10	4	10	4	0,595	0,055	-1691,90	461,84	6,283
LC8	C1	12	3	12	3	0,595	0,055	-1691,90	467,74	6,786
LC8	C1	16	2	16	2	0,595	0,055	-1691,90	482,49	8,042
LC8	C1	12	4	12	4	0,595	0,055	-1691,90	494,29	9,048
LC8	C1	14	3	14	3	0,595	0,055	-1691,90	496,50	9,236
LC8	C1	16	3	16	3	0,595	0,055	-1691,90	529,69	12,064
LC8	C1	14	4	14	4	0,595	0,055	-1691,90	532,64	12,315
LC8	C1	16	4	16	4	0,595	0,055	-1691,90	576,90	16,085
NC8	C2	10	2	10	2	0,600	0,050	-3706,70	469,49	3,142
NC8	C2	12	2	12	2	0,600	0,050	-3706,70	482,64	4,524
NC8	C2	10	3	10	3	0,600	0,050	-3706,70	484,44	4,712
NC8	C2	14	2	14	2	0,600	0,050	-3706,70	498,33	6,158
NC8	C2	10	4	10	4	0,600	0,050	-3706,70	499,54	6,283
NC8	C2	12	3	12	3	0,600	0,050	-3706,70	504,37	6,786
NC8	C2	16	2	16	2	0,600	0,050	-3706,70	516,51	8,042
NC8	C2	12	4	12	4	0,600	0,050	-3706,70	525,95	9,048
NC8	C2	14	3	14	3	0,600	0,050	-3706,70	527,56	9,236
NC8	C2	16	3	16	3	0,600	0,050	-3706,70	555,79	12,064
NC8	C2	14	4	14	4	0,600	0,050	-3706,70	558,27	12,315
NC8	C2	16	4	16	4	0,600	0,050	-3706,70	595,69	16,085
LC8	C2	10	2	10	2	0,595	0,055	-3207,90	488,81	3,142
LC8	C2	12	2	12	2	0,595	0,055	-3207,90	501,43	4,524
LC8	C2	10	3	10	3	0,595	0,055	-3207,90	503,16	4,712
LC8	C2	14	2	14	2	0,595	0,055	-3207,90	516,47	6,158
LC8	C2	10	4	10	4	0,595	0,055	-3207,90	517,63	6,283
LC8	C2	12	3	12	3	0,595	0,055	-3207,90	522,28	6,786
LC8	C2	16	2	16	2	0,595	0,055	-3207,90	534,06	8,042
LC8	C2	12	4	12	4	0,595	0,055	-3207,90	543,40	9,048
LC8	C2	14	3	14	3	0,595	0,055	-3207,90	545,17	9,236
LC8	C2	16	3	16	3	0,595	0,055	-3207,90	571,89	12,064
LC8	C2	14	4	14	4	0,595	0,055	-3207,90	574,13	12,315
LC8	C2	16	4	16	4	0,595	0,055	-3207,90	610,53	16,085

NC8	C1	10	2	10	2	0,550	0,050	-1983,40	392,01	3,142
NC8	C1	12	2	12	2	0,550	0,050	-1983,40	407,04	4,524
NC8	C1	10	3	10	3	0,550	0,050	-1983,40	409,09	4,712
NC8	C1	14	2	14	2	0,550	0,050	-1983,40	424,80	6,158
NC8	C1	10	4	10	4	0,550	0,050	-1983,40	426,16	6,283
NC8	C1	12	3	12	3	0,550	0,050	-1983,40	431,62	6,786
NC8	C1	16	2	16	2	0,550	0,050	-1983,40	445,28	8,042
NC8	C1	12	4	12	4	0,550	0,050	-1983,40	456,21	9,048
NC8	C1	14	3	14	3	0,550	0,050	-1983,40	458,26	9,236
NC8	C1	16	3	16	3	0,550	0,050	-1983,40	488,99	12,064
NC8	C1	14	4	14	4	0,550	0,050	-1983,40	491,72	12,315
NC8	C1	16	4	16	4	0,550	0,050	-1983,40	532,70	16,085
LC8	C1	10	2	10	2	0,545	0,055	-1691,90	366,04	3,142
LC8	C1	12	2	12	2	0,545	0,055	-1691,90	380,77	4,524
LC8	C1	10	3	10	3	0,545	0,055	-1691,90	382,78	4,712
LC8	C1	14	2	14	2	0,545	0,055	-1691,90	398,17	6,158
LC8	C1	10	4	10	4	0,545	0,055	-1691,90	399,51	6,283
LC8	C1	12	3	12	3	0,545	0,055	-1691,90	404,86	6,786
LC8	C1	16	2	16	2	0,545	0,055	-1691,90	418,25	8,042
LC8	C1	12	4	12	4	0,545	0,055	-1691,90	428,96	9,048
LC8	C1	14	3	14	3	0,545	0,055	-1691,90	430,96	9,236
LC8	C1	16	3	16	3	0,545	0,055	-1691,90	461,08	12,064
LC8	C1	14	4	14	4	0,545	0,055	-1691,90	463,76	12,315
LC8	C1	16	4	16	4	0,545	0,055	-1691,90	503,92	16,085
NC8	C2	10	2	10	2	0,550	0,050	-3706,70	310,87	3,142
NC8	C2	12	2	12	2	0,550	0,050	-3706,70	322,16	4,524
NC8	C2	10	3	10	3	0,550	0,050	-3706,70	323,27	4,712
NC8	C2	14	2	14	2	0,550	0,050	-3706,70	337,22	6,158
NC8	C2	10	4	10	4	0,550	0,050	-3706,70	338,31	6,283
NC8	C2	12	3	12	3	0,550	0,050	-3706,70	342,69	6,786
NC8	C2	16	2	16	2	0,550	0,050	-3706,70	353,07	8,042
NC8	C2	12	4	12	4	0,550	0,050	-3706,70	362,50	9,048
NC8	C2	14	3	14	3	0,550	0,050	-3706,70	364,15	9,236
NC8	C2	16	3	16	3	0,550	0,050	-3706,70	388,98	12,064
NC8	C2	14	4	14	4	0,550	0,050	-3706,70	391,18	12,315
NC8	C2	16	4	16	4	0,550	0,050	-3706,70	424,45	16,085
LC8	C2	10	2	10	2	0,545	0,055	-3207,90	356,65	3,142
LC8	C2	12	2	12	2	0,545	0,055	-3207,90	367,64	4,524
LC8	C2	10	3	10	3	0,545	0,055	-3207,90	369,15	4,712
LC8	C2	14	2	14	2	0,545	0,055	-3207,90	380,46	6,158
LC8	C2	10	4	10	4	0,545	0,055	-3207,90	381,27	6,283
LC8	C2	12	3	12	3	0,545	0,055	-3207,90	385,79	6,786
LC8	C2	16	2	16	2	0,545	0,055	-3207,90	395,90	8,042
LC8	C2	12	4	12	4	0,545	0,055	-3207,90	404,01	9,048
LC8	C2	14	3	14	3	0,545	0,055	-3207,90	405,54	9,236
LC8	C2	16	3	16	3	0,545	0,055	-3207,90	428,60	12,064
LC8	C2	14	4	14	4	0,545	0,055	-3207,90	430,66	12,315
LC8	C2	16	4	16	4	0,545	0,055	-3207,90	461,78	16,085

Πίνακας Π5: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών σπλισμού δοκών πλαισίου 12 ορόφων

Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	A_{s1} (cm ²) εφε	A_{s2} (cm ²) θλι	b_{eff} (m)	d (m)	d' (m)	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
12	3	12	2	3,393	2,262	1,370	0,550	0,050	84,34	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,550	0,050	110,68	6,786
14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,550	0,050	112,69	7,697
14	3	12	2	4,618	2,262	1,370	0,550	0,050	112,63	6,880
12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,550	0,050	138,42	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,370	0,550	0,050	145,54	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,370	0,550	0,050	146,74	9,111
14	4	14	2	6,158	3,079	1,370	0,550	0,050	148,34	9,236
16	3	16	2	6,032	4,021	1,370	0,550	0,050	147,79	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,370	0,550	0,050	148,44	8,419
14	5	12	3	7,697	3,393	1,370	0,550	0,050	185,20	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,550	0,050	186,25	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,370	0,550	0,050	191,89	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,370	0,550	0,050	192,77	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,370	0,550	0,050	193,52	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,370	0,550	0,050	237,91	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,370	0,550	0,050	238,36	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,370	0,550	0,050	239,01	16,085
12	3	12	2	3,393	2,262	1,370	0,545	0,055	83,98	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,370	0,545	0,055	108,06	6,786
14	3	12	2	4,618	2,262	1,370	0,545	0,055	112,26	6,880
14	3	14	2	4,618	3,079	1,370	0,545	0,055	113,64	7,697
12	5	12	3	5,655	3,393	1,370	0,545	0,055	137,94	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,370	0,545	0,055	144,62	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,370	0,545	0,055	146,02	9,111
16	3	16	2	6,032	4,021	1,370	0,545	0,055	147,22	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,370	0,545	0,055	147,47	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,370	0,545	0,055	148,81	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,370	0,545	0,055	184,32	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,370	0,545	0,055	185,07	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,370	0,545	0,055	190,46	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,370	0,545	0,055	191,39	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,370	0,545	0,055	192,29	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,370	0,545	0,055	236,39	13,446
16	5	16	3	10,053	6,032	1,370	0,545	0,055	237,39	16,085
16	5	14	3	10,053	4,618	1,370	0,545	0,055	237,19	14,671

Πίνακας Π6: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού υποστυλωμάτων πλαισίου 12 ορόφων

		Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	d (m)	d' (m)	N _d (kN) [Εφελκυ σμός θετικός]	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
NC12	C1	10	2	10	2	0,600	0,050	-3048,80	507,74	3,142
NC12	C1	12	2	12	2	0,600	0,050	-3048,80	522,91	4,524
NC12	C1	10	3	10	3	0,600	0,050	-3048,80	524,99	4,712
NC12	C1	14	2	14	2	0,600	0,050	-3048,80	540,92	6,158
NC12	C1	10	4	10	4	0,600	0,050	-3048,80	542,31	6,283
NC12	C1	12	3	12	3	0,600	0,050	-3048,80	547,87	6,786
NC12	C1	16	2	16	2	0,600	0,050	-3048,80	561,67	8,042
NC12	C1	12	4	12	4	0,600	0,050	-3048,80	572,65	9,048
NC12	C1	14	3	14	3	0,600	0,050	-3048,80	574,71	9,236
NC12	C1	16	3	16	3	0,600	0,050	-3048,80	606,65	12,064
NC12	C1	14	4	14	4	0,600	0,050	-3048,80	609,47	12,315
NC12	C1	16	4	16	4	0,600	0,050	-3048,80	651,84	16,085
LC12	C1	10	2	10	2	0,595	0,055	-2599,90	496,98	3,142
LC12	C1	12	2	12	2	0,595	0,055	-2599,90	512,17	4,524
LC12	C1	10	3	10	3	0,595	0,055	-2599,90	514,24	4,712
LC12	C1	14	2	14	2	0,595	0,055	-2599,90	530,18	6,158
LC12	C1	10	4	10	4	0,595	0,055	-2599,90	531,57	6,283
LC12	C1	12	3	12	3	0,595	0,055	-2599,90	537,12	6,786
LC12	C1	16	2	16	2	0,595	0,055	-2599,90	551,04	8,042
LC12	C1	12	4	12	4	0,595	0,055	-2599,90	562,18	9,048
LC12	C1	14	3	14	3	0,595	0,055	-2599,90	564,27	9,236
LC12	C1	16	3	16	3	0,595	0,055	-2599,90	595,58	12,064
LC12	C1	14	4	14	4	0,595	0,055	-2599,90	598,37	12,315
LC12	C1	16	4	16	4	0,595	0,055	-2599,90	640,81	16,085
NC12	C2	10	2	10	2	0,600	0,050	-5455,90	158,72	3,142
NC12	C2	12	2	12	2	0,600	0,050	-5455,90	172,34	4,524
NC12	C2	10	3	10	3	0,600	0,050	-5455,90	175,89	4,712
NC12	C2	14	2	14	2	0,600	0,050	-5455,90	191,55	6,158
NC12	C2	10	4	10	4	0,600	0,050	-5455,90	192,91	6,283
NC12	C2	12	3	12	3	0,600	0,050	-5455,90	198,38	6,786
NC12	C2	16	2	16	2	0,600	0,050	-5455,90	212,23	8,042
NC12	C2	12	4	12	4	0,600	0,050	-5455,90	223,19	9,048
NC12	C2	14	3	14	3	0,600	0,050	-5455,90	225,24	9,236
NC12	C2	16	3	16	3	0,600	0,050	-5455,90	256,34	12,064
NC12	C2	14	4	14	4	0,600	0,050	-5455,90	259,07	12,315
NC12	C2	16	4	16	4	0,600	0,050	-5455,90	300,69	16,085
LC12	C2	10	2	10	2	0,595	0,055	-4717,60	306,22	3,142
LC12	C2	12	2	12	2	0,595	0,055	-4717,60	320,04	4,524
LC12	C2	10	3	10	3	0,595	0,055	-4717,60	321,91	4,712
LC12	C2	14	2	14	2	0,595	0,055	-4717,60	336,29	6,158
LC12	C2	10	4	10	4	0,595	0,055	-4717,60	337,52	6,283
LC12	C2	12	3	12	3	0,595	0,055	-4717,60	341,45	6,786
LC12	C2	16	2	16	2	0,595	0,055	-4717,60	355,11	8,042
LC12	C2	12	4	12	4	0,595	0,055	-4717,60	364,99	9,048
LC12	C2	14	3	14	3	0,595	0,055	-4717,60	366,83	9,236
LC12	C2	16	3	16	3	0,595	0,055	-4717,60	394,55	12,064
LC12	C2	14	4	14	4	0,595	0,055	-4717,60	396,98	12,315
LC12	C2	16	4	16	4	0,595	0,055	-4717,60	433,28	16,085

NC12	C1	10	2	10	2	0,550	0,050	-3048,80	381,30	3,142
NC12	C1	12	2	12	2	0,550	0,050	-3048,80	393,27	4,524
NC12	C1	10	3	10	3	0,550	0,050	-3048,80	394,76	4,712
NC12	C1	14	2	14	2	0,550	0,050	-3048,80	407,87	6,158
NC12	C1	10	4	10	4	0,550	0,050	-3048,80	408,99	6,283
NC12	C1	12	3	12	3	0,550	0,050	-3048,80	413,46	6,786
NC12	C1	16	2	16	2	0,550	0,050	-3048,80	424,67	8,042
NC12	C1	12	4	12	4	0,550	0,050	-3048,80	433,35	9,048
NC12	C1	14	3	14	3	0,550	0,050	-3048,80	434,88	9,236
NC12	C1	16	3	16	3	0,550	0,050	-3048,80	461,04	12,064
NC12	C1	14	4	14	4	0,550	0,050	-3048,80	463,33	12,315
NC12	C1	16	4	16	4	0,550	0,050	-3048,80	498,07	16,085
LC12	C1	10	2	10	2	0,545	0,055	-2599,90	392,14	3,142
LC12	C1	12	2	12	2	0,545	0,055	-2599,90	403,75	4,524
LC12	C1	10	3	10	3	0,545	0,055	-2599,90	405,30	4,712
LC12	C1	14	2	14	2	0,545	0,055	-2599,90	418,00	6,158
LC12	C1	10	4	10	4	0,545	0,055	-2599,90	419,09	6,283
LC12	C1	12	3	12	3	0,545	0,055	-2599,90	423,45	6,786
LC12	C1	16	2	16	2	0,545	0,055	-2599,90	434,40	8,042
LC12	C1	12	4	12	4	0,545	0,055	-2599,90	443,15	9,048
LC12	C1	14	3	14	3	0,545	0,055	-2599,90	444,74	9,236
LC12	C1	16	3	16	3	0,545	0,055	-2599,90	469,97	12,064
LC12	C1	14	4	14	4	0,545	0,055	-2599,90	472,22	12,315
LC12	C1	16	4	16	4	0,545	0,055	-2599,90	506,27	16,085
NC12	C2	18	4	18	4	0,550	0,050	-5455,90	122,50	20,358
NC12	C2	20	4	20	4	0,550	0,050	-5455,90	170,73	25,133
NC12	C2	18	5	18	5	0,550	0,050	-5455,90	172,30	25,447
NC12	C2	22	4	22	4	0,550	0,050	-5455,90	222,81	30,411
NC12	C2	18	6	18	6	0,550	0,050	-5455,90	225,71	30,536
NC12	C2	20	5	20	5	0,550	0,050	-5455,90	234,65	31,416
NC12	C2	20	6	20	6	0,550	0,050	-5455,90	298,85	37,699
NC12	C2	22	5	22	5	0,550	0,050	-5455,90	302,07	38,013
NC12	C2	22	6	22	6	0,550	0,050	-5455,90	380,06	45,616
LC12	C2	18	4	18	4	0,545	0,055	-4717,60	268,44	20,358
LC12	C2	20	4	20	4	0,545	0,055	-4717,60	314,53	25,133
LC12	C2	18	5	18	5	0,545	0,055	-4717,60	317,56	25,447
LC12	C2	22	4	22	4	0,545	0,055	-4717,60	365,69	30,411
LC12	C2	18	6	18	6	0,545	0,055	-4717,60	366,91	30,536
LC12	C2	20	5	20	5	0,545	0,055	-4717,60	373,78	31,416
LC12	C2	20	6	20	6	0,545	0,055	-4717,60	434,19	37,699
LC12	C2	22	5	22	5	0,545	0,055	-4717,60	437,07	38,013
LC12	C2	22	6	22	6	0,545	0,055	-4717,60	506,69	45,616

Πίνακας Π7: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού δοκών πλαισίου 16 ορόφων

Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	A_{s1} (cm ²) εφε	A_{s2} (cm ²) θλι	b_{eff} (m)	d (m)	d' (m)	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
12	3	12	2	3,393	2,262	1,420	0,550	0,050	84,29	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,420	0,550	0,050	110,75	6,786
14	3	14	2	4,618	3,079	1,420	0,550	0,050	112,73	7,697
14	3	12	2	4,618	2,262	1,420	0,550	0,050	112,85	6,880
12	5	12	3	5,655	3,393	1,420	0,550	0,050	138,48	9,048
16	3	16	2	6,032	4,021	1,420	0,550	0,050	146,78	10,053
16	3	12	2	6,032	2,262	1,420	0,550	0,050	145,79	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,420	0,550	0,050	146,76	9,111
14	4	12	2	6,158	2,262	1,420	0,550	0,050	148,56	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,420	0,550	0,050	149,76	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,420	0,550	0,050	185,43	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,420	0,550	0,050	186,52	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,420	0,550	0,050	192,11	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,420	0,550	0,050	192,99	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,420	0,550	0,050	193,93	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,420	0,550	0,050	238,59	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,420	0,550	0,050	239,12	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,420	0,550	0,050	239,56	16,085
12	3	12	2	3,393	2,262	1,420	0,545	0,055	84,03	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,420	0,545	0,055	107,64	6,786
14	3	14	2	4,618	3,079	1,420	0,545	0,055	112,06	7,697
14	3	12	2	4,618	2,262	1,420	0,545	0,055	112,34	6,880
12	5	12	3	5,655	3,393	1,420	0,545	0,055	137,88	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,420	0,545	0,055	144,84	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,420	0,545	0,055	146,24	9,111
14	4	12	2	6,158	2,262	1,420	0,545	0,055	147,66	8,419
16	3	16	2	6,032	4,021	1,420	0,545	0,055	147,63	10,053
14	4	14	2	6,158	3,079	1,420	0,545	0,055	149,00	9,236
14	5	14	3	7,697	4,618	1,420	0,545	0,055	183,11	12,315
14	5	12	3	7,697	3,393	1,420	0,545	0,055	184,31	11,090
16	4	12	2	8,042	2,262	1,420	0,545	0,055	190,64	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,420	0,545	0,055	191,81	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,420	0,545	0,055	192,48	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,420	0,545	0,055	236,96	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,420	0,545	0,055	237,46	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,420	0,545	0,055	238,00	16,085

Πίνακας Π8: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών οπλισμού υποστυλωμάτων πλαισίου 16 ορόφων

		Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	d (m)	d' (m)	N _d (kN) [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
NC16	C1	10	2	10	2	0,650	0,050	-4181,00	592,57	3,142
NC16	C1	12	2	12	2	0,650	0,050	-4181,00	606,62	4,524
NC16	C1	10	3	10	3	0,650	0,050	-4181,00	608,42	4,712
NC16	C1	14	2	14	2	0,650	0,050	-4181,00	624,46	6,158
NC16	C1	10	4	10	4	0,650	0,050	-4181,00	625,79	6,283
NC16	C1	12	3	12	3	0,650	0,050	-4181,00	631,13	6,786
NC16	C1	16	2	16	2	0,650	0,050	-4181,00	644,53	8,042
NC16	C1	12	4	12	4	0,650	0,050	-4181,00	655,30	9,048
NC16	C1	14	3	14	3	0,650	0,050	-4181,00	657,32	9,236
NC16	C1	16	3	16	3	0,650	0,050	-4181,00	687,88	12,064
NC16	C1	14	4	14	4	0,650	0,050	-4181,00	690,61	12,315
NC16	C1	16	4	16	4	0,650	0,050	-4181,00	730,95	16,085
LC16	C1	10	2	10	2	0,645	0,055	-3562,20	612,08	3,142
LC16	C1	12	2	12	2	0,645	0,055	-3562,20	626,52	4,524
LC16	C1	10	3	10	3	0,645	0,055	-3562,20	628,47	4,712
LC16	C1	14	2	14	2	0,645	0,055	-3562,20	643,46	6,158
LC16	C1	10	4	10	4	0,645	0,055	-3562,20	644,77	6,283
LC16	C1	12	3	12	3	0,645	0,055	-3562,20	650,01	6,786
LC16	C1	16	2	16	2	0,645	0,055	-3562,20	663,16	8,042
LC16	C1	12	4	12	4	0,645	0,055	-3562,20	673,73	9,048
LC16	C1	14	3	14	3	0,645	0,055	-3562,20	675,70	9,236
LC16	C1	16	3	16	3	0,645	0,055	-3562,20	705,74	12,064
LC16	C1	14	4	14	4	0,645	0,055	-3562,20	708,43	12,315
LC16	C1	16	4	16	4	0,645	0,055	-3562,20	748,71	16,085
NC16	C2	18	4	18	4	0,650	0,050	-7171,30	177,17	20,358
NC16	C2	20	4	20	4	0,650	0,050	-7171,30	233,28	25,133
NC16	C2	18	5	18	5	0,650	0,050	-7171,30	237,94	25,447
NC16	C2	22	4	22	4	0,650	0,050	-7171,30	297,22	30,411
NC16	C2	18	6	18	6	0,650	0,050	-7171,30	298,72	30,536
NC16	C2	20	5	20	5	0,650	0,050	-7171,30	309,37	31,416
NC16	C2	20	6	20	6	0,650	0,050	-7171,30	384,91	37,699
NC16	C2	22	5	22	5	0,650	0,050	-7171,30	387,00	38,013
NC16	C2	22	6	22	6	0,650	0,050	-7171,30	480,79	45,616
LC16	C2	10	2	10	2	0,645	0,055	-6187,10	209,82	3,142
LC16	C2	12	2	12	2	0,645	0,055	-6187,10	223,92	4,524
LC16	C2	10	3	10	3	0,645	0,055	-6187,10	227,37	4,712
LC16	C2	14	2	14	2	0,645	0,055	-6187,10	243,37	6,158
LC16	C2	10	4	10	4	0,645	0,055	-6187,10	244,73	6,283
LC16	C2	12	3	12	3	0,645	0,055	-6187,10	250,33	6,786
LC16	C2	16	2	16	2	0,645	0,055	-6187,10	263,28	8,042
LC16	C2	12	4	12	4	0,645	0,055	-6187,10	275,69	9,048
LC16	C2	14	3	14	3	0,645	0,055	-6187,10	277,81	9,236
LC16	C2	16	3	16	3	0,645	0,055	-6187,10	307,70	12,064
LC16	C2	14	4	14	4	0,645	0,055	-6187,10	312,35	12,315
LC16	C2	16	4	16	4	0,645	0,055	-6187,10	355,07	16,085

NC16	C1	10	2	10	2	0,600	0,050	-4181,00	415,43	3,142
NC16	C1	12	2	12	2	0,600	0,050	-4181,00	428,47	4,524
NC16	C1	10	3	10	3	0,600	0,050	-4181,00	430,26	4,712
NC16	C1	14	2	14	2	0,600	0,050	-4181,00	443,93	6,158
NC16	C1	10	4	10	4	0,600	0,050	-4181,00	445,12	6,283
NC16	C1	12	3	12	3	0,600	0,050	-4181,00	448,69	6,786
NC16	C1	16	2	16	2	0,600	0,050	-4181,00	461,92	8,042
NC16	C1	12	4	12	4	0,600	0,050	-4181,00	471,48	9,048
NC16	C1	14	3	14	3	0,600	0,050	-4181,00	473,28	9,236
NC16	C1	16	3	16	3	0,600	0,050	-4181,00	500,38	12,064
NC16	C1	14	4	14	4	0,600	0,050	-4181,00	502,79	12,315
NC16	C1	16	4	16	4	0,600	0,050	-4181,00	539,21	16,085

LC16	C1	10	2	10	2	0,595	0,055	-3562,20	467,32	3,142
LC16	C1	12	2	12	2	0,595	0,055	-3562,20	479,47	4,524
LC16	C1	10	3	10	3	0,595	0,055	-3562,20	481,14	4,712
LC16	C1	14	2	14	2	0,595	0,055	-3562,20	493,76	6,158
LC16	C1	10	4	10	4	0,595	0,055	-3562,20	494,73	6,283
LC16	C1	12	3	12	3	0,595	0,055	-3562,20	499,58	6,786
LC16	C1	16	2	16	2	0,595	0,055	-3562,20	510,74	8,042
LC16	C1	12	4	12	4	0,595	0,055	-3562,20	519,74	9,048
LC16	C1	14	3	14	3	0,595	0,055	-3562,20	521,43	9,236
LC16	C1	16	3	16	3	0,595	0,055	-3562,20	547,01	12,064
LC16	C1	14	4	14	4	0,595	0,055	-3562,20	549,29	12,315
LC16	C1	16	4	16	4	0,595	0,055	-3562,20	583,87	16,085

NC16	C2	22	4	22	4	0,600	0,050	-7171,30	32,75	30,411
NC16	C2	22	5	22	5	0,600	0,050	-7171,30	122,11	38,013
NC16	C2	22	6	22	6	0,600	0,050	-7171,30	207,17	45,616
NC16	C2	22	7	22	7	0,600	0,050	-7171,30	292,42	53,219
NC16	C2	22	8	22	8	0,600	0,050	-7171,30	377,88	60,821

LC16	C2	20	4	20	4	0,595	0,055	-6187,10	208,40	25,133
LC16	C2	22	4	22	4	0,595	0,055	-6187,10	265,10	30,411
LC16	C2	20	5	20	5	0,595	0,055	-6187,10	274,15	31,416
LC16	C2	20	6	20	6	0,595	0,055	-6187,10	341,93	37,699
LC16	C2	22	5	22	5	0,595	0,055	-6187,10	345,25	38,013
LC16	C2	20	7	20	7	0,595	0,055	-6187,10	408,78	43,982
LC16	C2	22	6	22	6	0,595	0,055	-6187,10	426,06	45,616
LC16	C2	20	8	20	8	0,595	0,055	-6187,10	475,76	50,265
LC16	C2	22	7	22	7	0,595	0,055	-6187,10	507,58	53,219
LC16	C2	22	8	22	8	0,595	0,055	-6187,10	589,26	60,821

Πίνακας Π9: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών σπλισμού δοκών πλαισίου 20 ορόφων

Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	A _{s1} (cm ²) εφε	A _{s2} (cm ²) θλι	b _{eff} (m)	d (m)	d' (m)	M _{rd} (kNm)	A _{tot} (cm ²)
12	3	12	2	3,393	2,262	1,470	0,550	0,050	84,32	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,470	0,550	0,050	110,72	6,786
14	3	12	2	4,618	2,262	1,470	0,550	0,050	112,99	6,880
14	3	14	2	4,618	3,079	1,470	0,550	0,050	114,16	7,697
12	5	12	3	5,655	3,393	1,470	0,550	0,050	136,44	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,470	0,550	0,050	143,94	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,470	0,550	0,050	146,89	9,111
16	3	16	2	6,032	4,021	1,470	0,550	0,050	147,71	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,470	0,550	0,050	148,66	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,470	0,550	0,050	149,91	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,470	0,550	0,050	185,64	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,470	0,550	0,050	187,20	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,470	0,550	0,050	192,35	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,470	0,550	0,050	193,19	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,470	0,550	0,050	194,39	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,470	0,550	0,050	238,83	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,470	0,550	0,050	239,32	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,470	0,550	0,050	240,02	16,085

12	3	12	2	3,393	2,262	1,470	0,545	0,055	84,17	5,655
12	4	12	2	4,524	2,262	1,470	0,545	0,055	110,33	6,786
14	3	12	2	4,618	2,262	1,470	0,545	0,055	111,58	6,880
14	3	14	2	4,618	3,079	1,470	0,545	0,055	113,85	7,697
12	5	12	3	5,655	3,393	1,470	0,545	0,055	138,11	9,048
16	3	12	2	6,032	2,262	1,470	0,545	0,055	144,50	8,294
16	3	14	2	6,032	3,079	1,470	0,545	0,055	146,16	9,111
16	3	16	2	6,032	4,021	1,470	0,545	0,055	147,52	10,053
14	4	12	2	6,158	2,262	1,470	0,545	0,055	147,82	8,419
14	4	14	2	6,158	3,079	1,470	0,545	0,055	149,17	9,236
14	5	12	3	7,697	3,393	1,470	0,545	0,055	184,61	11,090
14	5	14	3	7,697	4,618	1,470	0,545	0,055	186,53	12,315
16	4	12	2	8,042	2,262	1,470	0,545	0,055	190,94	10,304
16	4	14	2	8,042	3,079	1,470	0,545	0,055	192,10	11,121
16	4	16	2	8,042	4,021	1,470	0,545	0,055	193,33	12,064
16	5	12	3	10,053	3,393	1,470	0,545	0,055	236,88	13,446
16	5	14	3	10,053	4,618	1,470	0,545	0,055	237,51	14,671
16	5	16	3	10,053	6,032	1,470	0,545	0,055	238,52	16,085

Πίνακας Π10: Αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμών σπλισμού υποστυλωμάτων πλαισίου 20 ορόφων

		Φ (mm) εφε	n εφε	Φ (mm) θλι	n θλι	d (m)	d' (m)	N _d (kN) [Εφελκυσμός θετικός]	Mrd (kNm)	Atot (cm ²)
NC20	C1	10	2	10	2	0,700	0,050	-5432,90	647,39	3,142
NC20	C1	12	2	12	2	0,700	0,050	-5432,90	663,68	4,524
NC20	C1	10	3	10	3	0,700	0,050	-5432,90	665,77	4,712
NC20	C1	14	2	14	2	0,700	0,050	-5432,90	681,87	6,158
NC20	C1	10	4	10	4	0,700	0,050	-5432,90	683,28	6,283
NC20	C1	12	3	12	3	0,700	0,050	-5432,90	688,89	6,786
NC20	C1	16	2	16	2	0,700	0,050	-5432,90	701,92	8,042
NC20	C1	12	4	12	4	0,700	0,050	-5432,90	714,35	9,048
NC20	C1	14	3	14	3	0,700	0,050	-5432,90	716,47	9,236
NC20	C1	16	3	16	3	0,700	0,050	-5432,90	748,28	12,064
NC20	C1	14	4	14	4	0,700	0,050	-5432,90	751,13	12,315
NC20	C1	16	4	16	4	0,700	0,050	-5432,90	793,99	16,085
LC20	C1	10	2	10	2	0,695	0,055	-4606,90	719,96	3,142
LC20	C1	12	2	12	2	0,695	0,055	-4606,90	734,48	4,524
LC20	C1	10	3	10	3	0,695	0,055	-4606,90	736,47	4,712
LC20	C1	14	2	14	2	0,695	0,055	-4606,90	751,76	6,158
LC20	C1	10	4	10	4	0,695	0,055	-4606,90	753,08	6,283
LC20	C1	12	3	12	3	0,695	0,055	-4606,90	758,10	6,786
LC20	C1	16	2	16	2	0,695	0,055	-4606,90	771,87	8,042
LC20	C1	12	4	12	4	0,695	0,055	-4606,90	782,62	9,048
LC20	C1	14	3	14	3	0,695	0,055	-4606,90	784,63	9,236
LC20	C1	16	3	16	3	0,695	0,055	-4606,90	815,06	12,064
LC20	C1	14	4	14	4	0,695	0,055	-4606,90	817,78	12,315
LC20	C1	16	4	16	4	0,695	0,055	-4606,90	858,91	16,085
NC20	C2	22	6	22	6	0,700	0,050	-8941,10	301,12	45,616
NC20	C2	22	7	22	7	0,700	0,050	-8941,10	402,39	53,219
NC20	C2	22	8	22	8	0,700	0,050	-8941,10	501,93	60,821
LC20	C2	18	4	18	4	0,695	0,055	-7693,90	309,15	20,358
LC20	C2	20	4	20	4	0,695	0,055	-7693,90	367,01	25,133
LC20	C2	18	5	18	5	0,695	0,055	-7693,90	368,60	25,447
LC20	C2	22	4	22	4	0,695	0,055	-7693,90	431,78	30,411
LC20	C2	18	6	18	6	0,695	0,055	-7693,90	433,32	30,536
LC20	C2	20	5	20	5	0,695	0,055	-7693,90	444,09	31,416
LC20	C2	18	7	18	7	0,695	0,055	-7693,90	495,91	35,626
LC20	C2	20	6	20	6	0,695	0,055	-7693,90	521,42	37,699
LC20	C2	22	5	22	5	0,695	0,055	-7693,90	525,26	38,013
LC20	C2	18	8	18	8	0,695	0,055	-7693,90	558,88	40,715
LC20	C2	20	7	20	7	0,695	0,055	-7693,90	599,27	43,982
LC20	C2	22	6	22	6	0,695	0,055	-7693,90	619,79	45,616
LC20	C2	20	8	20	8	0,695	0,055	-7693,90	677,65	50,265
LC20	C2	22	7	22	7	0,695	0,055	-7693,90	714,78	53,219
LC20	C2	22	8	22	8	0,695	0,055	-7693,90	810,33	60,821

NC20	C1	18	6	18	6	0,650	0,050	-5432,90	706,79	30,536
NC20	C1	18	7	18	7	0,650	0,050	-5432,90	762,08	35,626
NC20	C1	20	6	20	6	0,650	0,050	-5432,90	784,60	37,699
NC20	C1	18	8	18	8	0,650	0,050	-5432,90	817,64	40,715
NC20	C1	20	7	20	7	0,650	0,050	-5432,90	853,35	43,982
NC20	C1	22	6	22	6	0,650	0,050	-5432,90	871,37	45,616
NC20	C1	18	9	18	9	0,650	0,050	-5432,90	873,43	45,804
NC20	C1	20	8	20	8	0,650	0,050	-5432,90	922,62	50,265
NC20	C1	18	10	18	10	0,650	0,050	-5432,90	928,69	50,894
NC20	C1	22	7	22	7	0,650	0,050	-5432,90	955,49	53,219
NC20	C1	20	9	20	9	0,650	0,050	-5432,90	992,46	56,549
NC20	C1	22	8	22	8	0,650	0,050	-5432,90	1040,37	60,821
NC20	C1	20	10	20	10	0,650	0,050	-5432,90	1062,92	62,832
NC20	C1	22	9	22	9	0,650	0,050	-5432,90	1126,12	68,424
NC20	C1	22	10	22	10	0,650	0,050	-5432,90	1212,76	76,027

LC20	C1	18	6	18	6	0,645	0,055	-4606,90	799,00	30,536
LC20	C1	18	7	18	7	0,645	0,055	-4606,90	852,09	35,626
LC20	C1	20	6	20	6	0,645	0,055	-4606,90	873,56	37,699
LC20	C1	18	8	18	8	0,645	0,055	-4606,90	904,91	40,715
LC20	C1	20	7	20	7	0,645	0,055	-4606,90	939,21	43,982
LC20	C1	22	6	22	6	0,645	0,055	-4606,90	956,38	45,616
LC20	C1	18	9	18	9	0,645	0,055	-4606,90	958,38	45,804
LC20	C1	20	8	20	8	0,645	0,055	-4606,90	1005,61	50,265
LC20	C1	18	10	18	10	0,645	0,055	-4606,90	1011,39	50,894
LC20	C1	22	7	22	7	0,645	0,055	-4606,90	1037,27	53,219
LC20	C1	20	9	20	9	0,645	0,055	-4606,90	1073,04	56,549
LC20	C1	22	8	22	8	0,645	0,055	-4606,90	1119,40	60,821
LC20	C1	20	10	20	10	0,645	0,055	-4606,90	1141,30	62,832
LC20	C1	22	9	22	9	0,645	0,055	-4606,90	1202,77	68,424
LC20	C1	22	10	22	10	0,645	0,055	-4606,90	1286,58	76,027

NC20	C2	22	7	22	7	0,650	0,050	-8941,10	91,16	53,219
NC20	C2	22	8	22	8	0,650	0,050	-8941,10	185,94	60,821
NC20	C2	22	9	22	9	0,650	0,050	-8941,10	279,25	68,424
NC20	C2	22	10	22	10	0,650	0,050	-8941,10	372,38	76,027
NC20	C2	22	11	22	11	0,650	0,050	-8941,10	466,05	83,629
NC20	C2	22	12	22	12	0,650	0,050	-8941,10	559,42	91,232

LC20	C2	18	6	18	6	0,645	0,055	-7693,90	151,46	30,536
LC20	C2	18	7	18	7	0,645	0,055	-7693,90	209,10	35,626
LC20	C2	20	6	20	6	0,645	0,055	-7693,90	232,74	37,699
LC20	C2	18	8	18	8	0,645	0,055	-7693,90	267,11	40,715
LC20	C2	20	7	20	7	0,645	0,055	-7693,90	304,48	43,982
LC20	C2	22	6	22	6	0,645	0,055	-7693,90	322,02	45,616
LC20	C2	18	9	18	9	0,645	0,055	-7693,90	325,46	45,804
LC20	C2	20	8	20	8	0,645	0,055	-7693,90	376,73	50,265
LC20	C2	18	10	18	10	0,645	0,055	-7693,90	383,94	50,894
LC20	C2	22	7	22	7	0,645	0,055	-7693,90	410,55	53,219
LC20	C2	20	9	20	9	0,645	0,055	-7693,90	449,11	56,549
LC20	C2	22	8	22	8	0,645	0,055	-7693,90	498,69	60,821
LC20	C2	20	10	20	10	0,645	0,055	-7693,90	522,17	62,832
LC20	C2	22	9	22	9	0,645	0,055	-7693,90	587,23	68,424
LC20	C2	22	10	22	10	0,645	0,055	-7693,90	676,22	76,027

NC20	C1	18	6	18	6	0,600	0,050	-5432,90	462,96	30,536
NC20	C1	20	6	20	6	0,600	0,050	-5432,90	538,08	37,699
NC20	C1	18	8	18	8	0,600	0,050	-5432,90	569,33	40,715
NC20	C1	22	6	22	6	0,600	0,050	-5432,90	620,17	45,616
NC20	C1	20	8	20	8	0,600	0,050	-5432,90	668,30	50,265
NC20	C1	18	10	18	10	0,600	0,050	-5432,90	674,79	50,894
NC20	C1	22	8	22	8	0,600	0,050	-5432,90	777,60	60,821
NC20	C1	20	10	20	10	0,600	0,050	-5432,90	798,39	62,832
NC20	C1	22	10	22	10	0,600	0,050	-5432,90	935,85	76,027
LC20	C1	18	6	18	6	0,595	0,055	-4606,90	589,50	30,536
LC20	C1	20	6	20	6	0,595	0,055	-4606,90	657,44	37,699
LC20	C1	18	8	18	8	0,595	0,055	-4606,90	686,11	40,715
LC20	C1	22	6	22	6	0,595	0,055	-4606,90	732,99	45,616
LC20	C1	20	8	20	8	0,595	0,055	-4606,90	777,76	50,265
LC20	C1	18	10	18	10	0,595	0,055	-4606,90	783,82	50,894
LC20	C1	22	8	22	8	0,595	0,055	-4606,90	879,58	60,821
LC20	C1	20	10	20	10	0,595	0,055	-4606,90	900,20	62,832
LC20	C1	22	10	22	10	0,595	0,055	-4606,90	1031,40	76,027
NC20	C2	22	12	22	12	0,600	0,050	-8941,10	270,20	91,232
NC20	C2	22	14	22	14	0,600	0,050	-8941,10	444,40	106,437
NC20	C2	22	16	22	16	0,600	0,050	-8941,10	618,34	121,642
LC20	C2	20	10	20	10	0,595	0,055	-7693,90	257,12	62,832
LC20	C2	20	12	20	12	0,595	0,055	-7693,90	392,59	75,398
LC20	C2	22	10	22	10	0,595	0,055	-7693,90	399,36	76,027
LC20	C2	20	14	20	14	0,595	0,055	-7693,90	528,71	87,965
LC20	C2	22	12	22	12	0,595	0,055	-7693,90	564,07	91,232
LC20	C2	20	16	20	16	0,595	0,055	-7693,90	665,50	100,531
LC20	C2	22	14	22	14	0,595	0,055	-7693,90	730,08	106,437
LC20	C2	22	16	22	16	0,595	0,055	-7693,90	896,81	121,642