



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ | ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ ΑΠΟ  
ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ**

**ΜΠΕΓΚΑ ΙΩΣΗΦΙΝΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ**  
Καθηγητής Π.Θ.  
Διευθυντής Εργαστηρίου Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής



Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο  
ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ  
ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ

υπεβλήθη από την

Ιωσηφίνα Μπέγκα

για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού.

Η Διπλωματική Εργασία έλαβε την έγκριση των μελών της τριμελούς εξεταστικής  
επιτροπής.

.....  
Γεώργιος Θ. Εφραιμίδης  
Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

.....  
Πολυξένη Καλλιόγλου  
Λέκτορας Π.Θ.

.....  
Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος  
Καθηγητής Π.Θ.

Βόλος,  
19 Οκτωβρίου 2022



## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των προπτυχιακών σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και όλους όσους βρέθηκαν δίπλα μου στα χρόνια της φοίτησής μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας Καθηγητή Αιμίλιο Κωμοδρόμο για την πολύτιμη συνδρομή, υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και για τα πολύτιμα εφόδια που μου προσέφερε κατά τη διδασκαλία των σχετικών προπτυχιακών μαθημάτων. Η θεωρητική κατάρτιση και η εξοικείωση με λογισμικό ανάλυσης αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα στη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Δημόπουλο για την άρτια συνεργασία και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε. Η συμβολή του τόσο σε επίπεδο κατανόησης του προβλήματος, όσο και κατά τη διάρκεια της εμβάθυνσης στο λογισμικό και τη θεωρία υπήρξε καθοριστικής σημασίας.

Επιπλέον, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή Γεώργιο Εφραιμίδη και Λέκτορα Πολυξένη Καλλιόγλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, ευχαριστώ για τη συμπαράσταση και την προσφορά εκ μέρους της οικογενείας μου, αλλά και όλων όσων βρέθηκαν στο πλάι μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Είναι γενικά αποδεκτό πως η παγκόσμια κλιματική αλλαγή και η ενεργειακή κρίση τη δεκαετία που διανύουμε, αποδίδονται στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη, εξαιτίας μαζικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που προέρχονται από την παραγωγή, διανομή και κατανάλωση ενέργειας ορυκτών καυσίμων. Τα τελευταία έτη, η ενεργειακή πολιτική στρέφεται στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με συνεχώς αυξανόμενες εφαρμογές εκμετάλλευσης της γεωθερμίας. Η προσέγγιση των ενεργειακών στόχων παγκοσμίως μπορεί να επιτευχθεί με την αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας για τις ανάγκες θέρμανσης – δροσισμού κτιρίων. Πρόκειται για μια θερμική εγκατάσταση που αποτελείται από σωληνώσεις διανομής ρευστού, οι οποίες τοποθετούνται στο έδαφος μέσω γεωτρήσεων, αλλά και στο εσωτερικό της ανωδομής και συνδέονται μεταξύ τους μέσω της αντλίας θερμότητας. Αξιοποιείται έτσι, η θερμοκρασία του εδάφους, η οποία θεωρείται σταθερή λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του τελευταίου και αποτελεί προϊόν ηλιακής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, αποτελεί αντικείμενο έρευνας η ενσωμάτωση των σωληνώσεων εσωτερικά της θεμελίωσης του κτιρίου, μετατρέποντας τα δομικά στοιχεία της θεμελίωσης σε γεωεναλλάκτες. Η τεχνολογία αυτή αποσκοπεί στην εξοικονόμηση χρονικής περιόδου κατασκευής και αρχικού κόστους εγκατάστασης και στην αξιοποίηση της υψηλής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας του σκυροδέματος. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των ενεργειακών θεμελίων βασίζονται στη βαθιά κατανόηση των επιμέρους φυσικών φαινομένων και των αντίστοιχων καταστατικών εξισώσεων, το σύνολο των οποίων περιγράφουν τη συμπεριφορά και την απόδοση της εξεταζόμενης τεχνολογίας. Μια πλήρης και διεξοδική ανάλυση ενεργειακής θεμελίωσης απαιτεί τη σύζευξη θερμοϋδραυλικών και μηχανικών φαινομένων, ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία η ανάλυση περιορίζεται στη μονόδρομη επιρροή μεταξύ θερμικών και μηχανικών φαινομένων, αποσκοπώντας στη διερεύνηση της μηχανικής απόκρισης των δομικών στοιχείων κατά την επιβολή θερμικών και μηχανικών φορτίσεων. Το ενεργειακό μοντέλο συνίσταται από τη συνδυασμένη θεμελίωση (Combined Pile Raft Foundation – CPRF) ενός πολυώροφου κτιρίου. Περιλαμβάνει ως στοιχείο βαθιάς θεμελίωσης ομάδα πασσάλων, πακτωμένων σε ενιαίο κεφαλόδεσμο, ο οποίος έχει το ρόλο της επιφανειακής θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση). Η μελέτη της συνδυασμένης θεμελίωσης επικεντρώνεται στις επιπτώσεις στην εντατική και κινηματική κατάσταση των δομικών στοιχείων της θεμελίωσης κατά τη λειτουργία της θερμικής εγκατάστασης στην κάτω παρειά της κοιτόστρωσης. Συμπληρωματικά, εξετάζεται το ενδεχόμενο της αξιοποίησης του δυναμικού των πασσάλων. Οι πάσσαλοι ως στοιχεία βαθιάς θεμελίωσης είναι δυνατό να αυξήσουν εκθετικά την ενεργειακή απόδοση του γεωθερμικού συστήματος κατά τη λειτουργία τους ως γεωεναλλάκτες συνδυαστικά με την ενεργειακή κοιτόστρωση, επιτυγχάνοντας παράλληλα το βέλτιστο τεχνικοοικονομικό σχεδιασμό.

## Abstract

It is generally accepted that global climate change and energy crisis of the current decade are attributable to global warming due to the massive emissions of greenhouse gases from the production, distribution and consumption of fossil fuel energy. In recent years, energy policy has been turning to the use of renewable energy sources with ever-increasing applications of geothermal exploitation. Approaching the energy goals worldwide can be achieved by exploiting the shallow geothermal energy for the heating and cooling needs of buildings. It is a thermal installation consisting of fluid distribution pipes, which are placed in the ground through boreholes, but also inside the superstructure and connected to each other through the heat pump. In this way, the soil temperature is used, which is considered constant due to the large heat capacity of the latter and is a product of solar energy. In recent years, the integration of piping inside the building's foundation has been an object of research, turning the structural elements of the foundation into geo-exchangers. This technology aims to save construction time and initial installation costs and to utilize the high conductivity and heat capacity of concrete. The analysis and design of energy foundation is based on a deep understanding of the individual physical phenomena and the corresponding constitutive equations, the whole of which describes the behavior and performance of the technology under consideration. A complete and thorough energy foundation analysis requires the coupling of thermohydraulic and mechanical phenomena; however, in this thesis the analysis is limited in the one-way influence between thermal and mechanical phenomena, aiming to investigate the mechanical response of structural elements when thermal and mechanical loads are imposed. The energy model consists of the Combined Pile Raft Foundation (CPRF) of a multi-storey building. It includes as a deep foundation element a group of piles, driven into a single header, which has the role of a shallow foundation (raft foundation). The study of the combined foundation focuses on the internal and kinematic state of the structural elements of the foundation during the operation of the thermal installation on the lower side of the raft layer. In addition, the potential utilization of piles is considered. Piles as deep foundation elements can exponentially increase the energy efficiency of the geothermal system during their operation as geo-exchangers in combination with the energy raft, achieving at the same time the optimal technical and economic design.





## Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	ii
Περίληψη.....	iii
Abstract .....	iv
<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1. Η έννοια της γεωθερμίας .....	1
1.2. Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων .....	3
1.3. Προοπτικές γεωθερμίας στην Ελλάδα .....	13
<b>2. Συστήματα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας .....</b>	<b>16</b>
2.1. Λεπτομέρειες συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας .....	16
2.2. Ενεργειακά θεμέλια – Γεωεναλλάκτες.....	22
2.3. Απόδοση συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.....	28
<b>3. Ανάλυση και σχεδιασμός ενεργειακών θεμελίων .....</b>	<b>33</b>
3.1. Θεωρητική προσέγγιση ανάλυσης .....	33
3.1.1. Διάδοση θερμότητας στο ενεργειακό σύστημα πασσάλων – κεφαλόδεσμου.....	35
3.1.2. Παραμόρφωση ενεργειακού συστήματος πασσάλων – κεφαλόδεσμου .....	38
3.2. Μηχανική ανάλυση ενεργειακού μοντέλου.....	44
3.2.1. Αντίσταση εδάφους κάτω από την πλάκα.....	44
3.2.2. Αντίσταση εδάφους περιμετρικά των πασσάλων .....	47
3.3. Σχεδιασμός ενεργειακού μοντέλου.....	54
3.3.1. Οριακές καταστάσεις αντοχής.....	54
3.3.2. Συνδυασμοί φορτίσεων .....	56
<b>4. Αρχές προσομοίωσης – Αριθμητικές επιλύσεις.....</b>	<b>58</b>
4.1. Παραδοχές ανάλυσης.....	58
4.2. Πρόγραμμα SOFiSTik .....	59
4.3. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....	59
4.4. Περιγραφή φυσικού μοντέλου.....	62
4.5. Προσομοίωση προβλήματος.....	66
4.5.1. Διακριτοποίηση φορέων.....	66
4.5.2. Αριθμητική επίλυση ελατηρίων αντίστασης .....	70
4.6. Σχεδιασμός μοντέλου .....	75
<b>5. Αποτελέσματα.....</b>	<b>80</b>

5.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων κατά τη λειτουργία της ενεργειακής πλάκας .....	80
5.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων κατά τη λειτουργία της ενεργειακής συνδυασμένης θεμελίωσης.....	122
<b>6. Συμπεράσματα.....</b>	<b>155</b>
<b>Παράρτημα Α' .....</b>	<b>157</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>249</b>

## Κατάλογος σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1</b>	Ευρωπαϊκός χάρτης κατάταξης γεωθερμικών βεβαιωμένων ή εν δυνάμει πόρων ανάλογα το εύρος του ρυθμού μεταφοράς διάδοσης της θερμότητας. [12].....	2
<b>Σχήμα 1.2</b>	Διαγράμματα εξίσωσης Stallman. (i) Προφίλ θερμοκρασίας – βάθους για κάθε μήνα. (ii) Σειρές θερμοκρασίας – χρόνου για βάθη 0,1,5 και 10m. [23] .....	5
<b>Σχήμα 1.3</b>	Σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας GHP σε κτίριο. [20].....	6
<b>Σχήμα 1.4</b>	Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού. [20] .....	7
<b>Σχήμα 1.5</b>	Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκτόνωση ατμού. [20] .....	7
<b>Σχήμα 1.6</b>	Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου. [20].....	8
<b>Σχήμα 1.7</b>	Ευρωπαϊκός χάρτης απεικόνισης βεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων και γεωθερμικών εγκαταστάσεων. [12] .....	9
<b>Σχήμα 1.8</b>	Ποσοτικό διάγραμμα εγκαταστάσεων απευθείας χρήσης: υπάρχουσες και σε εξέλιξη. [22] .....	10
<b>Σχήμα 1.9</b>	Ποσοτικό διάγραμμα χωρητικότητας εγκαταστάσεων απευθείας χρήσης για τα έτη 2010 και 2020. [22].....	10
<b>Σχήμα 1.10</b>	Ποσοτικό διάγραμμα συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. [22] .....	11
<b>Σχήμα 1.11</b>	Αριθμός μονάδων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας ανά 1000 κατοικίες. [22] .....	11
<b>Σχήμα 1.12</b>	Ποσοτικό διάγραμμα ηλεκτρικών μονάδων ανά χώρα: εγκατεστημένες, σε εξέλιξη, που πρόκειται να γίνουν. [22] .....	12
<b>Σχήμα 1.13</b>	Ποσοστιαίο διάγραμμα χρήσης των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών μονάδων στην Ευρώπη. [22] .....	12
<b>Σχήμα 1.14</b>	Γεωθερμικές περιοχές της Ελλάδας. [49].....	13
<b>Σχήμα 1.15</b>	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θέρμανσης Στην Ελλάδα από το 1995 μέχρι το 2019. [30] .....	15
<b>Σχήμα 2.1</b>	Τυπικά συστήματα γεωεναλλακτών. (iA,B) Κατακόρυφο και οριζόντιο σύστημα κλειστού τύπου. (iiA,B) Κατακόρυφο και οριζόντιο σύστημα ανοιχτού τύπου (υδατοσυλλέκτες). [17].....	17
<b>Σχήμα 2.2</b>	Κύκλος θερμικής μηχανής Carnot. [50].....	18
<b>Σχήμα 2.3</b>	Εννοιολογικό μοντέλο γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση κτιρίου. [31] .....	20
<b>Σχήμα 2.4</b>	Τυπική απεικόνιση ενός γεωθερμικού συστήματος αντλίας θερμότητας σε κτιριακή εφαρμογή. [32] .....	21
<b>Σχήμα 2.5</b>	Κατασκευαστική λεπτομέρεια σωλήνων γεωθερμίας στον οπλισμό (i) ενεργειακού πασσάλου (ii) ενεργειακής πλάκας. ((i) [5] (ii) [15]) .....	23
<b>Σχήμα 2.6</b>	Τυπικές διατάξεις σωληνώσεων στους ενεργειακούς και στην ενεργειακή πλάκα. (A) Διάταξη σε σχήμα U. (B) Διάταξη καμπτώμενου U. (C) Διάταξη παράλληλων U. (D) Διάταξη παράλληλων U με ένωση. (E) Διάταξη πολλαπλού U. (F) Διπλή διάταξη. (G) Διάταξη σε σχήμα W. (H) Σπειροειδής διάταξη. (I) Ομοαξονική διάταξη. (J) Διάταξη σε σχήμα U. (K) Διάταξη καμπτώμενου U. (L) Διάταξη σε σχήμα W. (M) Διάταξη κατ'επανάληψη καμπτώμενη. [24] 24	24
<b>Σχήμα 2.7</b>	Πιθανές τοποθετήσεις σωληνώσεων σε ενεργειακή πλάκα, υποθέτοντας διάταξη σε σχήμα U. (A) Εγκατάσταση και από τις δύο πλευρές. (B) Εγκατάσταση στην πλευρά αέρα. (C) Εγκατάσταση στην πλευρά εδάφους. (D) Εγκατάσταση στην πλευρά εδάφους με μονωμένη πλευρά αέρα. [24].....	25
<b>Σχήμα 2.8</b>	Τοποθέτηση μανόμετρου στις απολήξεις. [24] .....	26
<b>Σχήμα 2.9</b>	Προστατευτικό απολήξεων σωλήνα. [34] .....	26
<b>Σχήμα 2.11</b>	Συλλεκτήριο οριζόντιο δίκτυο σωλήνων των ενεργειακών πασσάλων. [36].....	27
<b>Σχήμα 2.12</b>	Σύνδεση κυκλωμάτων με τους συλλέκτες – διανομείς. [9].....	27
<b>Σχήμα 2.10</b>	Απολήξεις σωλήνων στον κεφαλόδεσμο. [34] .....	27
<b>Σχήμα 2.13</b>	Διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας αντιψυκτικού υγρού R-407C. [16].....	29
<b>2.14</b>	Εξιδανικευμένος κύκλος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας. [31] .....	30
<b>Σχήμα 2.15</b>	Πεδίο εφαρμογής του εποχιακού συντελεστή απόδοσης SPF σύμφωνα με το SEPOMO. [31].....	32
<b>Σχήμα 2.16</b>	Διάγραμμα Sankey. Γραφική αποτύπωση της ροής ενέργειας από την πηγή στην αντλία θερμότητας με υποθετική τιμή $SPF_{H1} = 3$ . [31].....	32
<b>Σχήμα 3.1</b>	Εξιδανίκευση των συζεύξεων που αφορούν προβλήματα ενεργειακών θεμελίων: (a) Αυστηρή προσέγγιση. (b) Απλοποιημένη προσέγγιση. (c) Η πιο απλή προσέγγιση. [26].....	34

<b>Σχήμα 3.2</b>	Μετάδοση θερμότητας σε ενεργειακό πάσσαλο με αγωγή.....	36
<b>Σχήμα 3.3</b>	Μετάδοση θερμότητας σε ενεργειακή πλάκα με αγωγή.....	36
<b>Σχήμα 3.4</b>	Μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε εδαφικό υλικό. [24].....	37
<b>Σχήμα 3.5</b>	Επίδραση θερμικής φόρτισης και περιβάλλοντος εδάφους στη συμπεριφορά του πασσάλου κατά τη θέρμανση χωρίς περιορισμό κίνησης. (a) προφίλ αξονικών θερμικών παραμορφώσεων. (b) προφίλ αξονικού θερμικού φορτίου. [1].....	42
<b>Σχήμα 3.6</b>	Επίδραση θερμικής φόρτισης και περιβάλλοντος εδάφους στη συμπεριφορά του πασσάλου κατά τη θέρμανση με περιορισμό κίνησης. (a) προφίλ αξονικών θερμικών παραμορφώσεων. (b) προφίλ αξονικού θερμικού φορτίου. [1].....	42
<b>Σχήμα 3.7</b>	(i) Μοντέλο Winkler για ενεργειακή πλάκα. (ii) Κύρτωση ενεργειακής πλάκας κατά τη θέρμανση. (iii) Κύρτωση ενεργειακής πλάκας κατά την ψύξη.....	44
<b>Σχήμα 3.8</b>	Διάγραμμα εύρεσης συντελεστών $F_1, F_2$ (i). Διάγραμμα εύρεσης συντελεστή $F_3$ (ii). ....	46
<b>Σχήμα 3.9</b>	Διάγραμμα εύρεσης μειωτικού συντελεστή $I_n$ για επιβολή κατακόρυφου φορτίου σε ορθογωνική κάτοψη στην επιφάνεια ελαστικού, ισότροπου ημχώρου.....	47
<b>Σχήμα 3.10</b>	Αντίσταση πασσάλου στην επίδραση αξονικού φορτίου $Q$ . [41].....	48
<b>Σχήμα 3.11</b>	Εμπειρικοί πίνακες συσχετισμού $q_{ck}$ με τις τιμές των $q_{bk}, q_{sk}$ κατά DIN4014 για ψαθυρά εδάφη.....	49
<b>Σχήμα 3.12</b>	Εμπειρικοί πίνακες συσχετισμού $c_{uk}$ με τις τιμές των $q_{bk}, q_{sk}$ κατά DIN4014 για συνεκτικά εδάφη. ....	49
<b>Σχήμα 3.13</b>	Αντίδραση εδάφους κατά την μετακίνηση του πασσάλου, λόγω επιβολής οριζόντιας φόρτισης. [46].....	50
<b>Σχήμα 3.14</b>	Προσομοίωση πλευρικής αντίστασης πασσάλου με μη γραμμικά ελατήρια. [46].....	50
<b>Σχήμα 3.15</b>	Καμπύλη απόκρισης εδάφους υπό οριζόντια φόρτιση $p - \gamma$ συναρτήσει του βάθους. [46].....	51
<b>Σχήμα 3.16</b>	Θερμικά κριτήρια απόδοσης των ενεργειακών θεμελίων. ....	55
<b>Σχήμα 3.17</b>	Μηχανικά κριτήρια απόδοσης των ενεργειακών θεμελίων.....	55
<b>Σχήμα 3.18</b>	Πίνακας A1.2(B) Ευρωκώδικα EN 1990 για τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού ULS (STR/GEO). [13].....	57
<b>Σχήμα 3.19</b>	Πίνακας A1.1 Ευρωκώδικα EN 1990 για τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού SLS. [13].....	58
<b>Σχήμα 4.1</b>	Γραμμικό στοιχείο (στοιχείο ράβδου). ....	60
<b>Σχήμα 4.2</b>	Γραμμικό στοιχείο (στοιχείο δοκού).....	60
<b>Σχήμα 4.4</b>	Τριγωνικό επιφανειακό στοιχείο.....	61
<b>Σχήμα 4.3</b>	Ορθογωνικό στοιχείο τεσσάρων κόμβων.....	61
<b>Σχήμα 4.6</b>	Στοιχείο κελύφους.....	61
<b>Σχήμα 4.5</b>	Ορθογωνικό στοιχείο πλάκας.....	61
<b>Σχήμα 4.7</b>	Κυβικό στοιχείο οκτώ κόμβων.....	62
<b>Σχήμα 4.8</b>	Διατομή δοκών φέροντα οργανισμού.....	63
<b>Σχήμα 4.9</b>	Διατομή υποστυλωμάτων φέροντα οργανισμού. ....	63
<b>Σχήμα 4.11</b>	Διατομή κοιτόστρωσης από υποστύλωμα σε υποστύλωμα (τρεις υποπλάκες ίδιας διατομής). ....	64
<b>Σχήμα 4.12</b>	Διατομή πασσάλων θεμελίωσης.....	64
<b>Σχήμα 4.13</b>	Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης του σκυροδέματος κατηγορίας C20/25. (Sofistik).....	65
<b>Σχήμα 4.14</b>	Πίνακας χαρακτηριστικών σκυροδέματος C20/25.....	65
<b>Σχήμα 4.16</b>	Πίνακας χαρακτηριστικών χάλυθα B500B.....	65
<b>Σχήμα 4.15</b>	Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης του χάλυθα B500B. (Sofistik).....	65
<b>Σχήμα 4.17</b>	Ενδεικτική διατομή πασσάλου. (Sofistik).....	65
<b>Σχήμα 4.19</b>	Διακριτοποίηση δοκών και υποστυλωμάτων με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik).....	67
<b>Σχήμα 4.18</b>	Διακριτοποίηση δοκών και υποστυλωμάτων με γραμμικά στοιχεία. (Sofistik).....	67
<b>Σχήμα 4.21</b>	Διακριτοποίηση πλακών ορόφων με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik).....	67
<b>Σχήμα 4.20</b>	Διακριτοποίηση πλακών ορόφων με τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους. (Sofistik).....	67

<b>Σχήμα 4.22</b>	Διακριτοποίηση κοιτόστρωσης με τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους. (Sofistik).....	68
<b>Σχήμα 4.23</b>	Διακριτοποίηση κοιτόστρωσης με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik).....	68
<b>Σχήμα 4.24</b>	Διακριτοποίηση κοιτόστρωσης με τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους. (Sofistik).....	69
<b>Σχήμα 4.25</b>	Διακριτοποίηση ομάδας πασσάλων με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik).....	69
<b>Σχήμα 4.26</b>	Αρίθμηση κεφαλής πασσάλων.....	69
<b>Σχήμα 4.27</b>	Πίνακας εμπειρικών σχέσεων για το μέτρο ελαστικότητας αργίλου συγκριτικά με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή $s_u$ . [3].....	70
<b>Σχήμα 4.29</b>	Διάγραμμα απόκρισης (διγραμμικό) ελατηρίου αντίστασης αιχμής κατά την αξονική φόρτιση. (Sofistik).....	71
<b>Σχήμα 4.28</b>	Διάγραμμα απόκρισης (διγραμμικό) ελατηρίου αντίστασης τριβής κατά την αξονική φόρτιση. (Sofistik).....	71
<b>Σχήμα 4.30</b>	Διάγραμμα απόκρισης (πολυγραμμικό) κατά την αξονική φόρτιση. (Sofistik).....	72
<b>Σχήμα 4.31</b>	Γραφική απεικόνιση αξονικών (τριβής και αιχμής) και πλευρικών ελατηρίων κατά μήκος των πασσάλων. (Sofistik).....	73
<b>Σχήμα 4.32</b>	Γραφική απεικόνιση αξονικών (τριβής και αιχμής) και πλευρικών ελατηρίων κατά μήκος των πασσάλων στο σύστημα xz. (Sofistik).....	73
<b>Σχήμα 4.33</b>	Γραφική απεικόνιση τελικού μοντέλου προσομοίωσης (Sofistik).....	74
<b>Σχήμα 4.34</b>	Γραφική απεικόνιση σε μεγέθυνση τελικού μοντέλου προσομοίωσης (Sofistik).....	74
<b>Σχήμα 5.1</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC9. (Sofistik).....	81
<b>Σχήμα 5.2</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC10. (Sofistik).....	81
<b>Σχήμα 5.3</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC9. (Sofistik).....	82
<b>Σχήμα 5.4</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC9.....	82
<b>Σχήμα 5.5</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC10. (Sofistik).....	83
<b>Σχήμα 5.6</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC10.....	83
<b>Σχήμα 5.7</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής $M_z$ πασσάλων κατά τη φόρτιση LC9. (Sofistik).....	84
<b>Σχήμα 5.8</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής $M_z$ πασσάλων κατά τη φόρτιση LC10. (Sofistik).....	84
<b>Σχήμα 5.9</b>	Διανύσματα επικόμβιας κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC9. (Sofistik).....	85
<b>Σχήμα 5.10</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC9. ....	85
<b>Σχήμα 5.11</b>	Διανύσματα επικόμβιας κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC10. (Sofistik).....	86
<b>Σχήμα 5.12</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC10. ....	86
<b>Σχήμα 5.13</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC9. ....	87
<b>Σχήμα 5.14</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC10. ....	87
<b>Σχήμα 5.15</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik).....	88
<b>Σχήμα 5.16</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik).....	89
<b>Σχήμα 5.17</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC21. (Sofistik).....	90
<b>Σχήμα 5.18</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC21.....	90
<b>Σχήμα 5.19</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC22. (Sofistik).....	91
<b>Σχήμα 5.20</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC22.....	91
<b>Σχήμα 5.21</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής $M_z$ πασσάλων κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik).....	92
<b>Σχήμα 5.22</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής $M_z$ πασσάλων κατά τη φόρτιση LC22. (Sofistik).....	92
<b>Σχήμα 5.23</b>	Διανύσματα επικόμβιας κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik).....	93

<b>Σχήμα 5.24</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC21. ....	93
<b>Σχήμα 5.25</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC22. (Sofistik).....	94
<b>Σχήμα 5.26</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC22. ....	94
<b>Σχήμα 5.27</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC21. ....	95
<b>Σχήμα 5.28</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC22. ....	95
<b>Σχήμα 5.29</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC31. (Sofistik).....	96
<b>Σχήμα 5.30</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC32. (Sofistik).....	96
<b>Σχήμα 5.31</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC31. (Sofistik).....	97
<b>Σχήμα 5.32</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC31.....	97
<b>Σχήμα 5.33</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC32. (Sofistik).....	98
<b>Σχήμα 5.34</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC32.....	98
<b>Σχήμα 5.35</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC31. (Sofistik).....	99
<b>Σχήμα 5.36</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC32. (Sofistik).....	99
<b>Σχήμα 5.37</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC31. (Sofistik).....	100
<b>Σχήμα 5.38</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC31. ....	100
<b>Σχήμα 5.39</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC32. (Sofistik).....	101
<b>Σχήμα 5.40</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC32. ....	101
<b>Σχήμα 5.41</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC31. ....	102
<b>Σχήμα 5.42</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC32. ....	102
<b>Σχήμα 5.43</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	103
<b>Σχήμα 5.44</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.....	103
<b>Σχήμα 5.45</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	104
<b>Σχήμα 5.46</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.....	104
<b>Σχήμα 5.47</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.....	105
<b>Σχήμα 5.48</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	105
<b>Σχήμα 5.49</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	106
<b>Σχήμα 5.50</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	106
<b>Σχήμα 5.51</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.....	107
<b>Σχήμα 5.52</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	107
<b>Σχήμα 5.53</b>	Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.....	108







<b>Σχήμα 5.104</b>	Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	144
<b>Σχήμα 5.105</b>	Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	144
<b>Σχήμα 5.106</b>	Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	145
<b>Σχήμα 5.107</b>	Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	145
<b>Σχήμα 5.108</b>	Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	146
<b>Σχήμα Α'.1</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC17. (Sofistik) .....	158
<b>Σχήμα Α'.2</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC18. (Sofistik) .....	158
<b>Σχήμα Α'.3</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC17. (Sofistik) .....	159
<b>Σχήμα Α'.4</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC17 (ULS). ....	159
<b>Σχήμα Α'.5</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC18. (Sofistik) .....	160
<b>Σχήμα Α'.6</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC17 (ULS). ....	160
<b>Σχήμα Α'.7</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC17. (Sofistik) .....	161
<b>Σχήμα Α'.8</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC18. (Sofistik) .....	161
<b>Σχήμα Α'.9</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC17. ....	162
<b>Σχήμα Α'.10</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέσου βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) ανά κατηγορία για LC17. ....	162
<b>Σχήμα Α'.11</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC18. ....	163
<b>Σχήμα Α'.12</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέσου βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) ανά κατηγορία για LC18. ....	163
<b>Σχήμα Α'.13</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik) .....	164
<b>Σχήμα Α'.14</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC8. (Sofistik) .....	164
<b>Σχήμα Α'.15</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC7. (Sofistik) .....	165
<b>Σχήμα Α'.16</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC7. ....	165
<b>Σχήμα Α'.17</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC8. (Sofistik) .....	166
<b>Σχήμα Α'.18</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC8. ....	166
<b>Σχήμα Α'.19</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik) .....	167
<b>Σχήμα Α'.20</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik) .....	167
<b>Σχήμα Α'.21</b>	Διανύσματα επικόμβιας κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik) .....	168
<b>Σχήμα Α'.22</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC7. ....	168
<b>Σχήμα Α'.23</b>	Διανύσματα επικόμβιας κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC8. (Sofistik) .....	169
<b>Σχήμα Α'.24</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC8. ....	169
<b>Σχήμα Α'.25</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC7. ....	170
<b>Σχήμα Α'.26</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC8. ....	170
<b>Σχήμα Α'.27</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC19. (Sofistik) .....	171
<b>Σχήμα Α'.28</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC20. (Sofistik) .....	171
<b>Σχήμα Α'.29</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC19. (Sofistik) .....	172

<b>Σχήμα Α'.30</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC19. ....	172
<b>Σχήμα Α'.31</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC20. (Sofistik) .....	173
<b>Σχήμα Α'.32</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC20. ....	173
<b>Σχήμα Α'.33</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC19. (Sofistik) .....	174
<b>Σχήμα Α'.34</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC20. (Sofistik) .....	174
<b>Σχήμα Α'.35</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC19. (Sofistik) .....	175
<b>Σχήμα Α'.36</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC19. ....	175
<b>Σχήμα Α'.37</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC20. (Sofistik) .....	176
<b>Σχήμα Α'.38</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC20. ....	176
<b>Σχήμα Α'.39</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC19. ....	177
<b>Σχήμα Α'.40</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC20. ....	177
<b>Σχήμα Α'.41</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC29. (Sofistik) .....	178
<b>Σχήμα Α'.42</b>	Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC30. (Sofistik) .....	178
<b>Σχήμα Α'.43</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC29. (Sofistik) .....	179
<b>Σχήμα Α'.44</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC29. ....	179
<b>Σχήμα Α'.45</b>	Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC30. (Sofistik) .....	180
<b>Σχήμα Α'.46</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC30. ....	180
<b>Σχήμα Α'.47</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC29. (Sofistik) .....	181
<b>Σχήμα Α'.48</b>	Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC30. (Sofistik) .....	181
<b>Σχήμα Α'.49</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC29. (Sofistik) .....	182
<b>Σχήμα Α'.50</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC29. ....	182
<b>Σχήμα Α'.51</b>	Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC30. (Sofistik) .....	183
<b>Σχήμα Α'.52</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC30. ....	183
<b>Σχήμα Α'.53</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC29. ....	184
<b>Σχήμα Α'.54</b>	Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC30. ....	184
<b>Σχήμα Α'.55</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	185
<b>Σχήμα Α'.56</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	185
<b>Σχήμα Α'.57</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	185
<b>Σχήμα Α'.58</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	186
<b>Σχήμα Α'.59</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	186
<b>Σχήμα Α'.60</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. ....	186
<b>Σχήμα Α'.61</b>	Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες. ....	187















## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Η έννοια της γεωθερμίας

Γεωθερμία ορίζεται η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη υπό τη μορφή θερμότητας στα πετρώματα και ρευστά (νερό και ατμός) που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του στερεού φλοιού της Γης. Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, για τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες της χώρας, θερμό θεωρείται ένα πέτρωμα ή ένα ρευστό όταν η θερμοκρασία του ξεπερνά τους 25°C (γεωθερμικό δυναμικό).

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί μια ήπια, Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, στη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων. Συγκριτικά με τις υπόλοιπες Α.Π.Ε. υπερτερεί στα εξής:

- Η παροχή ενέργειας είναι συνεχής και σταθερή
- Το λειτουργικό κόστος είναι μικρό
- Απαιτείται η χρήση απλών τεχνολογικών μέσων
- Δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες (όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια)
- Προσδίδει σημαντικά οφέλη στις αγροτικές δραστηριότητες, συμβάλλοντας έτσι στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της περιφέρειας

Αν και τα πλεονεκτήματα της γεωθερμικής ενέργειας είναι πολυάριθμα και η υπαρκτή ποσότητα της θερμότητας στη Γη τεράστια, η χρήση της γεωθερμίας είναι οικονομικά σύμφωρη στις περιοχές όπου οι γεωλογικές, γεωφυσικές και υδρολογικές συνθήκες καθιστούν ευνοϊκή την ανάπτυξη ενός γεωθερμικού συστήματος. Το γεωθερμικό σύστημα αναπτύσσεται μέσω της άνωσης του θερμού νερού. Ειδικότερα, λόγω της θέρμανσης του υπόγειου νερού κατά την επαφή του με τους γεωλογικούς σχηματισμούς σε βάθος λίγων χιλιομέτρων και όντας πλέον λιγότερο πυκνό από το κρύο, το θερμό νερό τείνει να ανέλθει προς την επιφάνεια μέσω ρηγμάτων.

Τα γεωθερμικά συστήματα απαντώνται συνήθως σε περιοχές με ενεργή ηφαιστειότητα, όπου η θερμοκρασία του πετρώματος ανάλογα με το βάθος είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα (2.5 – 3°C/100m). Η εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου (η περιοχή που φιλοξενεί τα θερμά ρευστά) καθίσταται δυνατή μέσω της απόληψης των ρευστών με χρήση γεωτρήσεων από ανοιχτούς ή απομονωμένους ταμιευτήρες, είτε από φυσικές αναβλύσεις θερμών πηγών. Ταμιευτήρες νερού με συσσωρευμένη θερμότητα συναντώνται συνήθως σε περιοχές με έντονη ενεργή εφελκυστική τεκτονική, όπως συμβαίνει κυρίως στην περίπτωση της Ελλάδας.

Η ροή του θερμού νερού που οφείλεται στη μεταβολή της πυκνότητας (άνωση) – όπως προαναφέρθηκε – αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα φυσικής μεταφοράς της θερμότητας με συναγωγή (μετακίνηση μάζας ρευστού και κατ'επέκταση θερμότητας από μια περιοχή σε μια άλλη). Θωρώντας πως η μεταφορά του θερμού ρευστού είναι ο μοναδικός μηχανισμός διάδοσης

θερμότητας σε βάθος λίγων χιλιομέτρων, δίνεται παρακάτω ο νόμος του Fourier που συνδέει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας  $q$  [ $Wm^{-2}$ ] με τη θερμοβαθμίδα  $gradT$  [ $Km^{-1}$ ], μέσω της θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  [ $WK^{-1}m^{-2}$ ].

$$q = -\lambda gradT \quad (1.1)$$

όπου

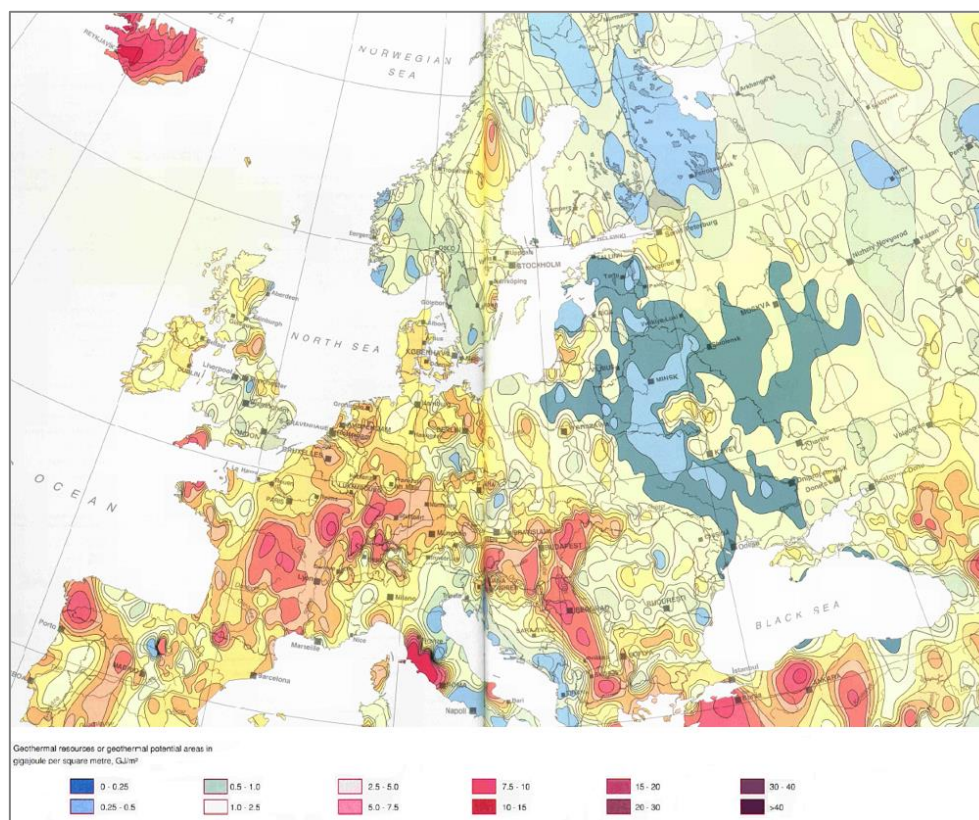
$q$ : ρυθμός μεταφοράς διάδοσης θερμότητας [ $Wm^{-2}$ ]

$\lambda$ : θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων [ $WK^{-1}m^{-2}$ ], η τιμή της οποίας εκτιμάται από δείγματα γεωτρήσεων

$gradT$ : θερμοβαθμίδα [ $Km^{-1}$ ], η οποία προκύπτει από το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας με το βάθος, όπως καταγράφεται στις γεωτρήσεις

Το πρόσημο πλην δηλώνει πως το γεωθερμικό ρευστό διαδίδεται προς την κατεύθυνση που μειώνεται η θερμοκρασία.

Με βάση την παραπάνω θεωρία, δίνεται ο ευρωπαϊκός χάρτης που απεικονίζει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας  $q$  για μικρά βάθη (Σχήμα 1.1). Φαίνεται – όπως ήταν αναμενόμενο – πως μεγαλύτερος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας συναντάται σε περιοχές της Ευρώπης με ενεργή ηφαιστειακή και ρηχότερη πυριγενή δραστηριότητα, όπως η Ισλανδία, τμήματα της Ιταλίας, καθώς και τμήματα της Ελλάδας. Η κοιλάδα του Ρήνου παρουσιάζει επίσης υψηλές τιμές ροής



Σχήμα 1.1 Ευρωπαϊκός χάρτης κατάταξης γεωθερμικών βεβαιωμένων ή εν δυνάμει πόρων ανάλογα το εύρος του ρυθμού μεταφοράς διάδοσης της θερμότητας. [12]

της θερμότητας. Επιπλέον, περιοχές σε ιζηματογενείς λεκάνες φαίνεται να έχουν ενισχυμένη ροή θερμότητας, όπως η Λεκάνη της Παννονίας και αυτή του Παρισιού.

## 1.2. Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων

Η κυριότερη ταξινόμηση των γεωθερμικών πεδίων έχει ως κριτήριο τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές θερμοκρασίας κάθε κατηγορίας κατά την ελληνική νομοθεσία.

- Χαμηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες από 25°C μέχρι 90°C
- Υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 90°C

Άλλες διαφοροποιήσεις:

Κατά Muffler and Cataldi (1978),

- Χαμηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μικρότερες των 90°C
- Μέσης θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες από 90°C έως 150°C
- Υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C

Κατά Hochstein (1990),

- Χαμηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μικρότερες των 125°C
- Μέσης θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες από 125°C έως 225°C
- Υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 225°C

Κατά Benderitter and Cormy (1990),

- Χαμηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μικρότερες των 100°C
- Μέσης θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες από 100°C έως 200°C
- Υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 200°C

Κατά Nicholson (1993),

- Χαμηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες 150°C
- Υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C

Με την εφαρμογή του νέου Νόμου 4602/2019 στην Ελλάδα αλλάζει η κατηγοριοποίηση των γεωθερμικών πεδίων και γίνεται ως εξής:

- Τοπικού ενδιαφέροντος για θερμοκρασία ρευστού 30°C έως 90°C
- Εθνικού ενδιαφέροντος για θερμοκρασία άνω των 90°C

Επιπλέον, με βάση παλαιότερη ελληνική νομοθεσία, τα γεωθερμικά πεδία ταξινομούσαν ανάλογα και με το βαθμό γνώσης των ποιοτικών, ποσοτικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους, σε βεβαιωμένα και πιθανά. Πλέον με την νέα νομοθεσία ως γεωθερμικό πεδίο λαμβάνεται το σύνολο του πεδίου (βέβαιου και πιθανού).

Η χρήση για την οποία προορίζεται το γεωθερμικό ρευστό καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του. Μπορεί να είναι είτε για άμεση χρήση, είτε για χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, είτε για παραγωγή ηλεκτρισμού.

- Άμεσες χρήσεις (Direct uses)  
Είναι η πιο συχνή εφαρμογή του γεωθερμικού ρευστού, αφού η άμεση χρήση του δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό. Πρόκειται για χρήση που υφίσταται σε χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμικά πεδία. Βρίσκει εφαρμογή στην τηλεθέρμανση μεμονωμένων κτιρίων, καθώς και σε συμπλέγματα κτιρίων με κεντρική μονάδα θέρμανσης. Επιπλέον, ευρεία εφαρμογή της άμεσης χρήσης παγκοσμίως συναντάται σε πισίνες, ιαματικά λουτρά, θερμοκήπια και υδατοκαλλιέργειες. Άλλες χρήσεις γεωθερμικού ρευστού χαμηλής θερμοκρασίας αφορούν βιομηχανικές εργασίες, όπως επεξεργασία τροφίμων και ξήρανση λαχανικών και φρούτων, ακόμα και για το λιώσιμο μεγάλης ποσότητας χιονιού. Ωστόσο, το γεωθερμικό νερό είναι βεβαρημένο με άλατα και άλλα επιβλαβή χημικά στοιχεία με επακόλουθα προβλήματα στο σύστημα άντλησης – παραγωγής. Για το λόγο αυτό – κατά κανόνα – δε χρησιμοποιείται άμεσα το θερμό νερό και αντ'αυτού έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές εκμετάλλευσης της θερμότητάς του. Οι γεωτρήσεις για ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας είναι συνήθως αρκετά ρηχές και φτηνές στην κατασκευή τους και έχουν βάθος λίγες εκατοντάδες μέτρα.
- Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Geothermal heat pumps – GHPs)  
Αξιοποιείται η αβαθής γεωθερμία για θέρμανση – δροσισμό κτιρίων. Αναλυτικότερα, ως αβαθής γεωθερμία ορίζεται η θερμότητα αποθηκευμένη στα πρώτα 150 μέτρα βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η θερμοκρασία του εδάφους διατηρεί μια σχεδόν σταθερή τιμή μικρότερη των 25°C, η οποία είναι προϊόν της ηλιακής ενέργειας και αποθηκεύεται στο έδαφος λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του. Η αμετάβλητη τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους είναι αποτέλεσμα μιας αρμονικής συνάρτησης, η αναλυτική λύση της οποίας είναι (Suzuki, 1960):

$$T(z, t) = T_m + A \exp(-dz) \sin\left(\frac{2\pi t}{p} - \varphi - Lz\right) \quad (1.2)$$

όπου

$A$ : πλάτος της αρμονικής περιόδου επιφάνειας εδάφους – θερμοκρασίας [°C]

$T_m$ : μέση θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους [°C]

$p$ : περίοδος επιφάνειας – θερμοκρασίας [s]

$\varphi$ : αλλαγή φάσης [rad]

$d$ : όρος θερμικής απόσβεσης [ $m^{-1}$ ]

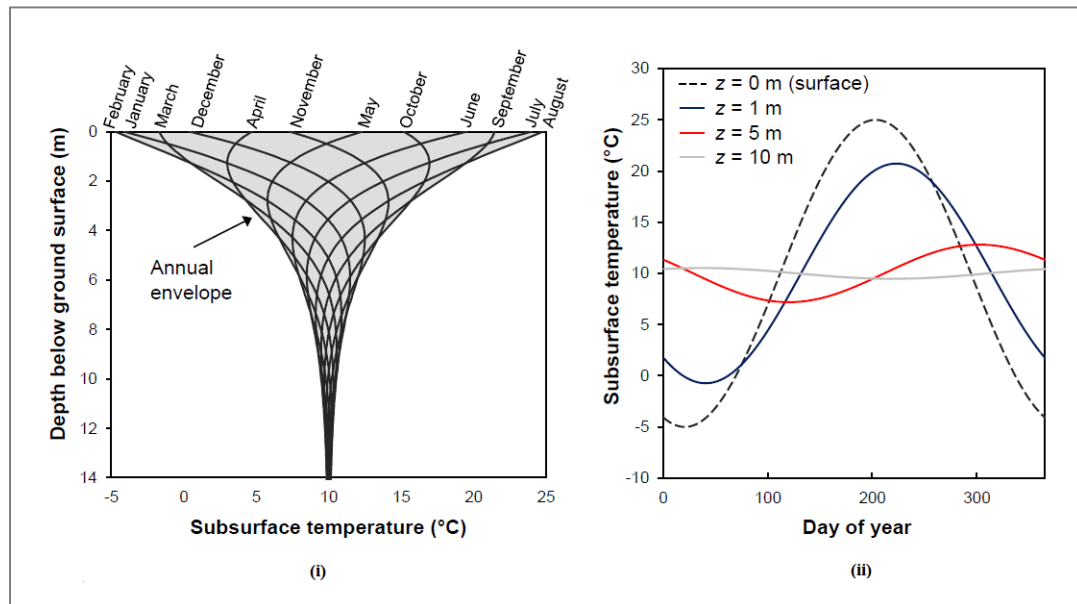
$L$ : όρος υστέρησης [ $m^{-1}$ ]

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει πως το αρμονικό σήμα της θερμοκρασίας που εκπέμπεται στην επιφάνεια του εδάφους διατηρεί την περιόδό του εντός του υπεδάφους, αλλά αποσβένει εκθετικά και υστερεί γραμμικά με το βάθος. Ο Stallman (1965) απέδειξε πως οι ακριβείς εκφράσεις των  $d$  [ $m^{-1}$ ] και  $L$  [ $m^{-1}$ ] είναι:

$$d = \left[ \left\{ \left( \frac{\pi}{Dp} \right)^2 + 0.25 \left( \frac{U}{2D} \right)^4 \right\}^{0.5} + 0.5 \left( \frac{U}{2D} \right)^2 \right] - \frac{U}{2D} \quad (1.3)$$

$$L = \left[ \left\{ \left( \frac{\pi}{Dp} \right)^2 + 0.25 \left( \frac{U}{2D} \right)^4 \right\}^{0.5} - 0.5 \left( \frac{U}{2D} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

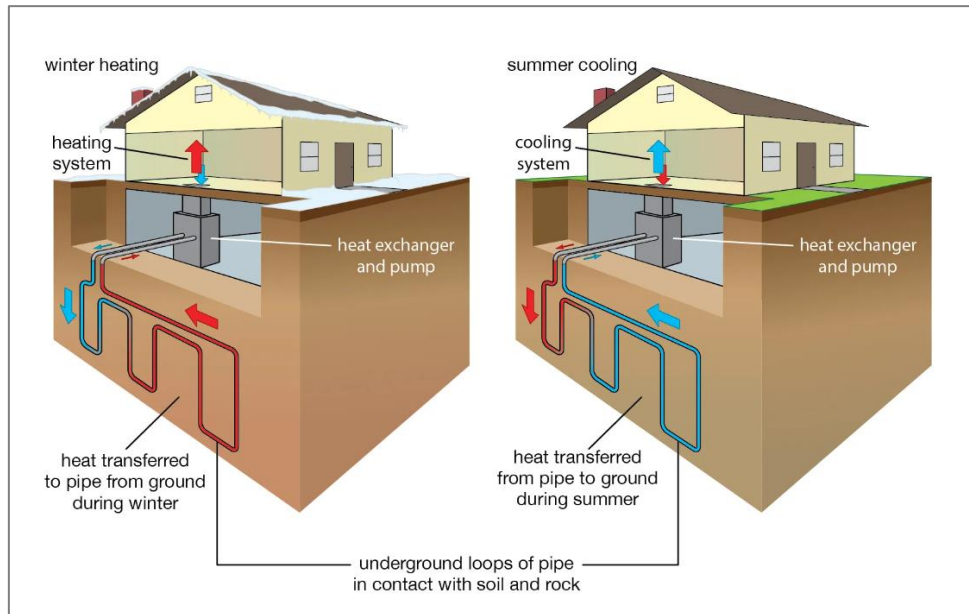
Οι παραπάνω σχέσεις αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως η εξίσωση του Stallman. (Σχήμα 1.2)



Σχήμα 1.2 Διαγράμματα εξίσωσης Stallman. (i) Προφίλ θερμοκρασίας – βάθους για κάθε μήνα. (ii) Σειρές θερμοκρασίας – χρόνου για βάθη 0,1,5 και 10m. [23]

Κατά συνέπεια, χάρη στο γεγονός ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται όλο και λιγότερο με το βάθος μέχρι το βάθος στο οποίο παραμένει σταθερή, η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να υποστηρίξει τη θέρμανση των κτιρίων κατά τους ψυχρότερους μήνες του έτους, όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι μικρότερη από αυτή του εδάφους. Ομοίως, κατά τους θερμότερους μήνες του έτους, ο θερμός αέρας μπορεί να αντληθεί από το εσωτερικό ενός κτιρίου και να κυκλοφορήσει στο υπέδαφος, όπου εκεί χάνει μεγάλο μέρος της θερμότητάς του και επιστρέφει στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Ένα σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (GHP) αποτελείται από έναν γεωεναλλάκτη (κατάταξη σωλήνων θαμμένων στο έδαφος) και μια αντλία. Ο εναλλάκτης μεταφέρει θερμική ενέργεια μεταξύ του εδάφους και του αέρα στην επιφάνεια, μέσω ενός ρευστού που κυκλοφορεί στους σωλήνες. Το ρευστό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι αντιψυκτικό υγρό ή συνδυασμός νερού και αντιψυκτικού υγρού. Κατά τους θερμότερους μήνες, η θερμότητα από το θερμό αέρα μεταφέρεται στο γεωεναλλάκτη και στο ρευστό.

Καθώς κινείται μέσα στους σωλήνες, η θερμότητα διαχέεται στα πετρώματα, στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Κατά τους ψυχρότερους μήνες, η λειτουργία της αντλίας αντιστρέφεται. Η θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στο θερμότερο έδαφος αυξάνει τη θερμοκρασία του υγρού. Στη συνέχεια, το τελευταίο μεταφέρει αυτήν την ενέργεια στην αντλία θερμότητας, η οποία θερμαίνει τον αέρα εντός του κτιρίου. (Σχήμα 1.3)



Σχήμα 1.3 Σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας GHP σε κτίριο. [20]

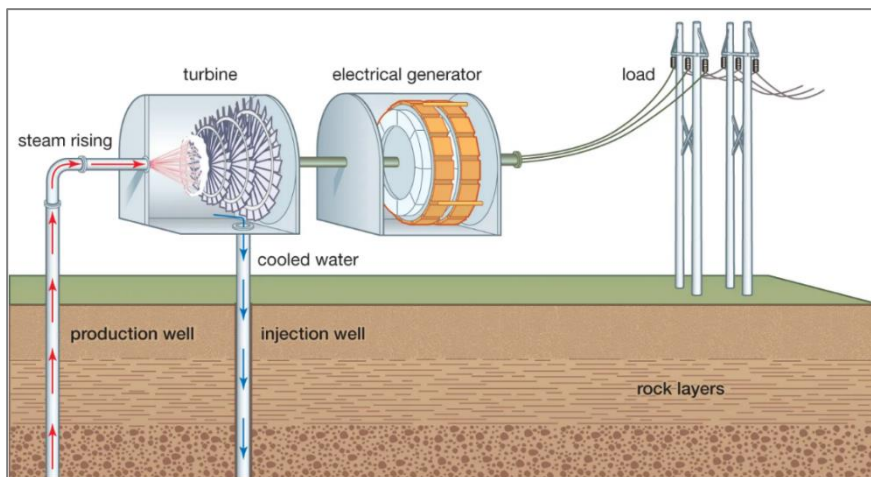
Οι αντλίες πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης – κλιματισμού. Η απόδοσή τους είναι μεγάλη, αφού καταναλώνουν 25-50% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από τα συγκρίσιμα συμβατικά συστήματα και παράγουν λιγότερα στοιχεία επιβλαβή για το περιβάλλον. Η μειωμένη ενέργεια που χρειάζεται για τη λειτουργία των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας μπορεί να μεταφραστεί σε μείωση έως και 44% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τις αντλίες θερμότητας με πηγή τον αέρα (οι οποίες μεταφέρουν θερμότητα μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα). Επιπλέον, σε σύγκριση με συστήματα θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση (που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα) σε συνδυασμό με τυπικά συστήματα κλιματισμού, οι γεωθερμικές αντλίες παράγουν έως και 72% λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. (Περαιτέρω ανάλυση των συστημάτων GHP στην Παράγραφο 2.1)

- Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή (Electric power generation)  
Αναλόγως τη θερμοκρασία και τη ροή του ατμού του γεωθερμικού ρευστού, το τελευταίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Παρά τις διαφορές τους στην κατασκευή, κοινή λειτουργία των σταθμών είναι ο έλεγχος του ατμού και η χρήση του για την κίνηση των ηλεκτρικών γεννητριών, οι οποίες με τη σειρά τους μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Δεδομένου ότι

η περίσσεια υδρατμών στο τέλος κάθε διαδικασίας συμπυκνώνεται και επιστρέφει στο έδαφος, όπου εκεί επαναθερμαίνεται για μελλοντική χρήση, η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

**Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού (Dry steam power plant)**

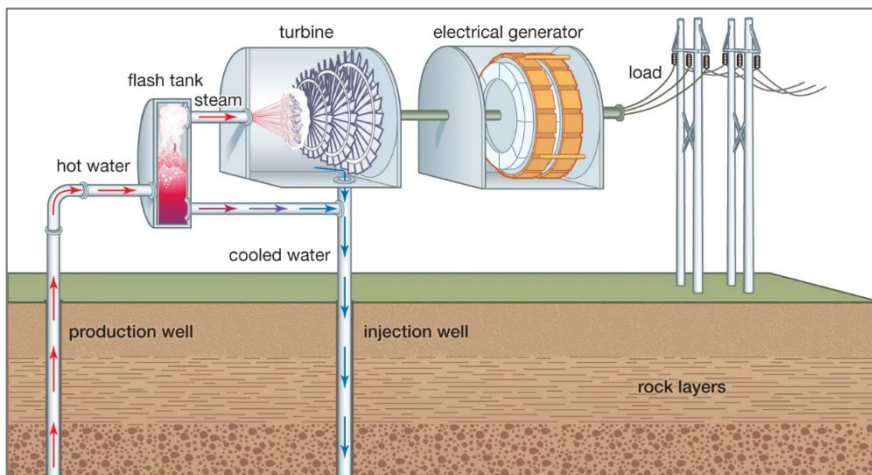
Συλλέγεται μόνο γεωθερμικός ατμός, ο οποίος διοχετεύεται απευθείας σε μια τουρμπίνα που κινεί την ηλεκτρική γεννήτρια. (Σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.4 Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού. [20]

**Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκτόνωση (Flash steam power plant)**

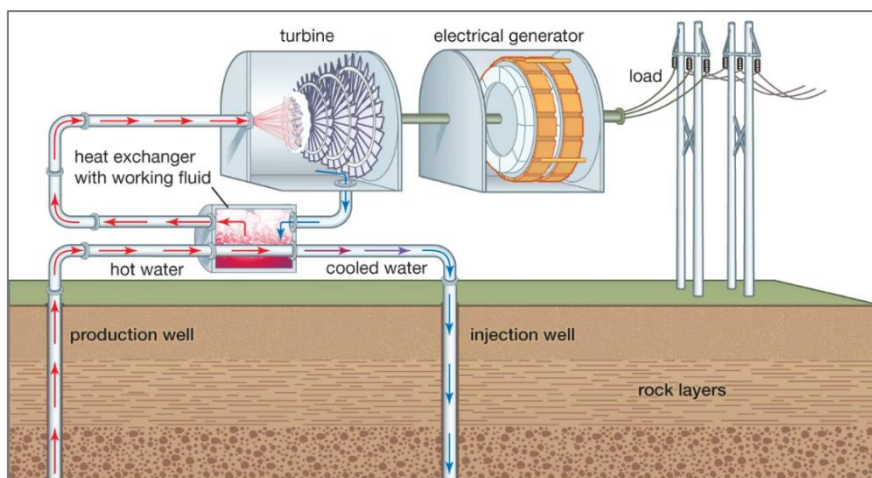
Χρησιμοποιείται ένα μείγμα ατμού και θερμού νερού (υδρατμοί), το οποίο εξάγεται από το υπέδαφος ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού. Ειδικότερα, το θερμό νερό υπό πίεση αντλείται από το έδαφος και ωθείται σε δεξαμενές εκτόνωσης (flash tanks), όπου η απότομη μείωση της πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία προκαλεί την αλλαγή φάσης λόγω εκτόνωσης του νερού, όπου γίνεται ατμός. Στη συνέχεια ο ατμός χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του συστήματος τουρμπίνας – γεννήτριας. (Σχήμα 1.5)



Σχήμα 1.5 Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκτόνωση ατμού. [20]

Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου ή κύκλου Rankine (Binary cycle power plant)

Και σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται μείγμα ατμού και θερμού νερού. Η πορεία του ατμού όμως είναι διαφορετική. Πιο συγκεκριμένα, ο ατμός διοχετεύεται από ένα δευτερεύον οργανικό ρευστό (π.χ. αμμωνία ή υδρογονάνθρακες) που περιέχεται σε έναν κλειστό βρόγχο σωληνώσεων για την τροφοδοσία του συστήματος τουρμπίνας – γεννήτριας. Σε αυτήν τη διαδικασία, το αντλούμενο γεωθερμικό ρευστό θερμαίνει το οργανικό υγρό μέσω μιας αντλίας θερμότητας κι έπειτα εισπνέζεται ξανά στον ταμιευτήρα. Το τελευταίο στη συνέχεια εξατμίζεται και αφού ο ατμός που προκύπτει περάσει στην τουρμπίνα, επανασυμπυκνώνεται και διοχετεύεται πίσω στην αντλία θερμότητας. Κατ'αυτόν τον τρόπο τα ρευστά δεν έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον κι έτσι η μονάδα δυαδικού κύκλου θεωρείται πως παρέχει τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά οφέλη συγκριτικά με τις προαναφερθείσες. Ωστόσο, αποτελούν τις πιο δαπανηρές εγκαταστάσεις. (Σχήμα 1.6)



Σχήμα 1.6 Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου. [20]

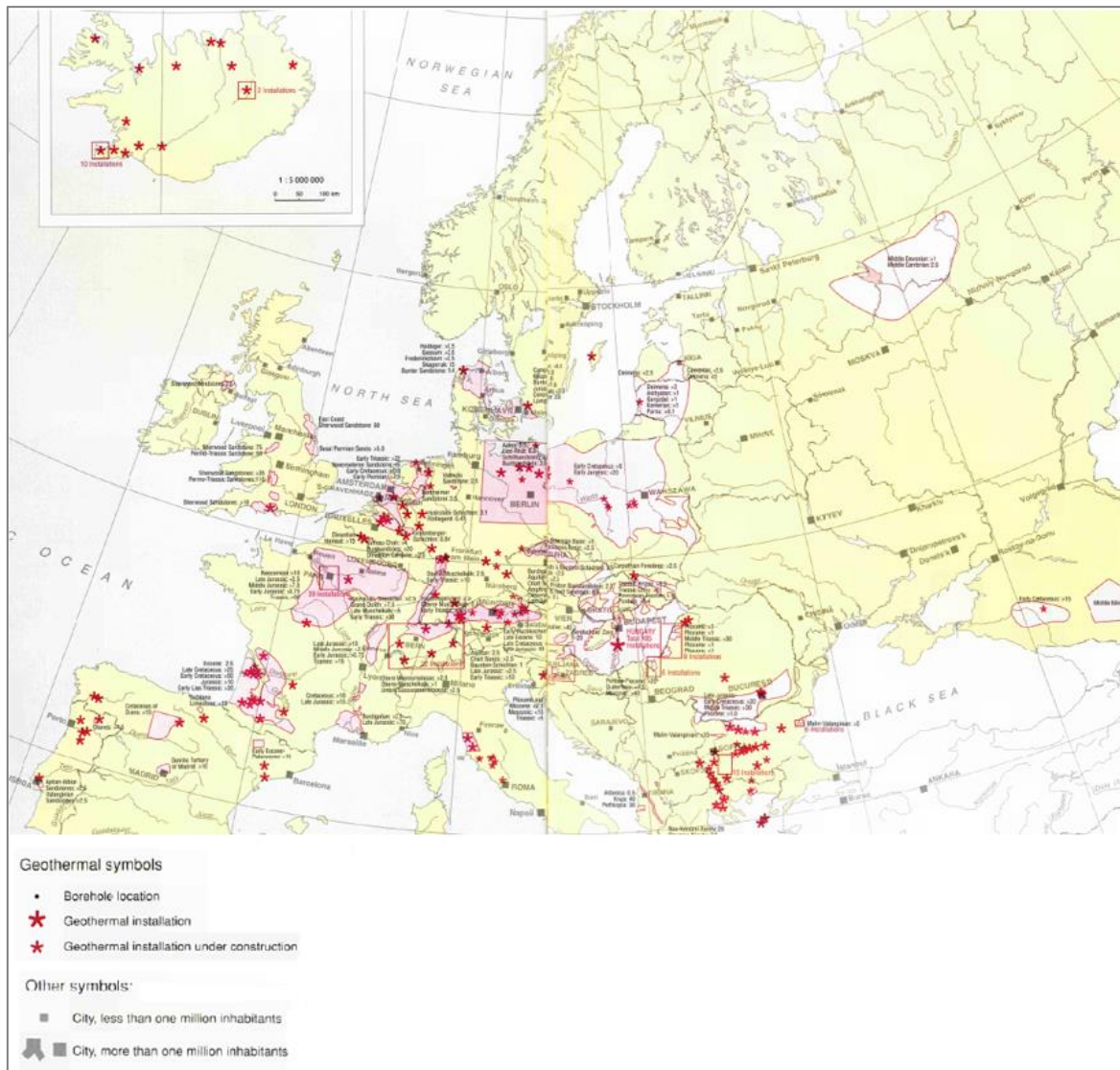
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως απαιτεί νερό θερμοκρασίας πάνω από 175°C ώστε να θεωρηθεί οικονομική. Ωστόσο, οι μονάδες κύκλου Rankine μπορούν να χρησιμοποιήσουν νερό θερμοκρασίας 85°C -90°C.

Το βάθος των γεωτρήσεων για παραγωγή ηλεκτρισμού κυμαίνεται μεταξύ 1500 έως 2500 μέτρων, υπάρχουν όμως και γεωθερμικές γεωτρήσεις βάθους 4 χιλιομέτρων. Το κόστος μιας βαθιάς γεωθερμικής γεώτρησης σε ένα ηφαιστειακό περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας είναι περίπου 1.5 εκατομμύρια € και η κατασκευή της απαιτεί 2-3 μήνες.

Στη συνέχεια δίνεται ο ευρωπαϊκός χάρτης που απεικονίζει τα βεβαιωμένα γεωθερμικά πεδία και τις εγκαταστάσεις σε αυτά, όπου υπάρχουν (Σχήμα 1.7). Διαπιστώνεται ότι σχεδόν όλες οι ευρωπαϊκές ιζηματογενείς λεκάνες έχουν χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν με κάποιον από τους τρόπους που προαναφέρθηκαν, αν και οι

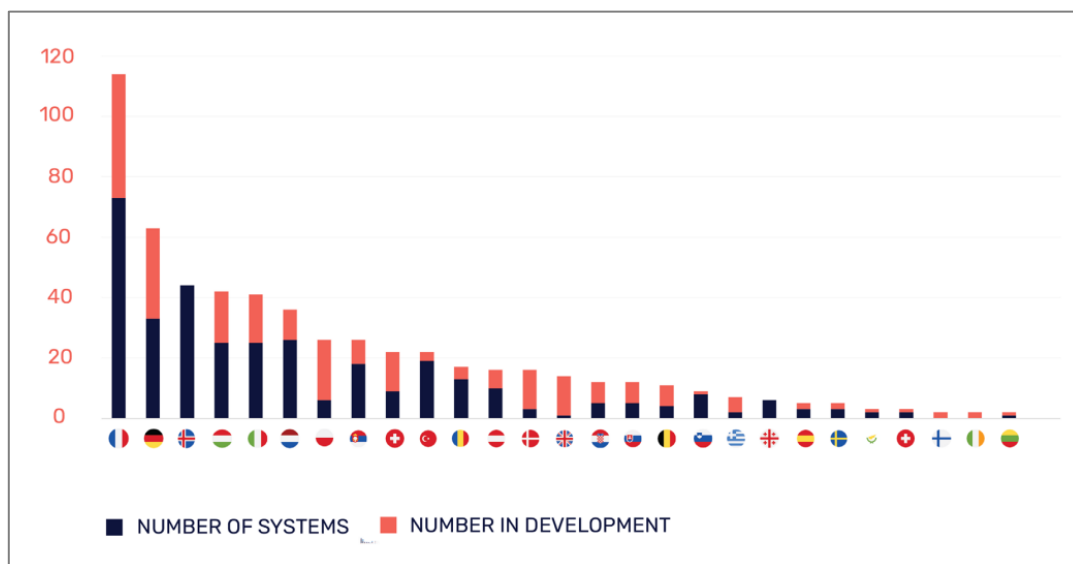


περισσότερες περιοχές φαίνεται πως έχουν εξασφαλίσει κάποια γεωθερμική χρήση. Τα πεδία με υψηλότερη θερμοκρασία (που αρκεί για ηλεκτρική παραγωγή) συμπίπτουν με τεκτονικά ή ηφαιστειακά ενεργές περιοχές, όπως η περιοχή της Μεσογείου.

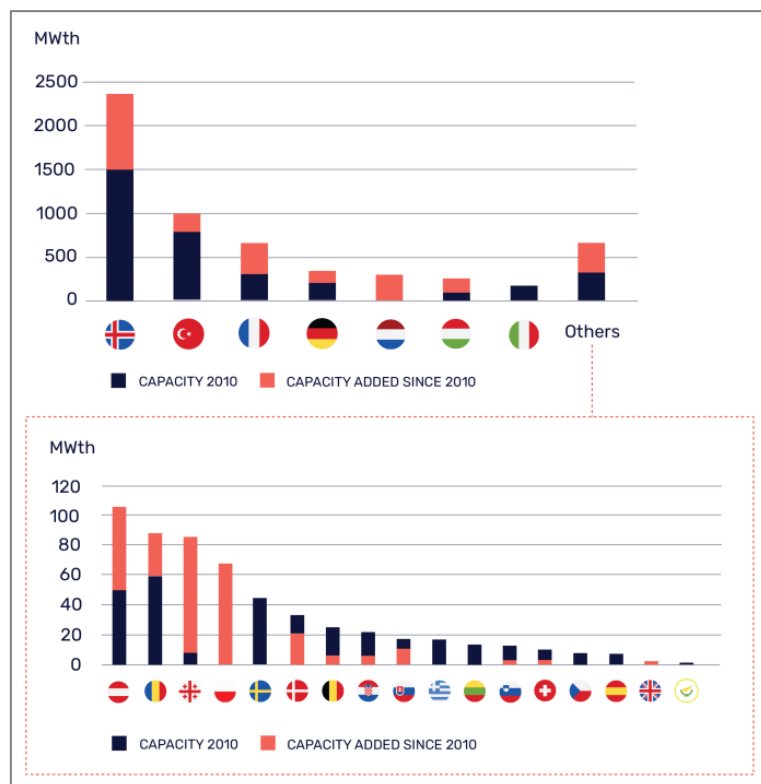


Σχήμα 1.7 Ευρωπαϊκός χάρτης απεικόνισης βεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων και γεωθερμικών εγκαταστάσεων. [12]

Με βάση τα καταγεγραμμένα στοιχεία του έτους 2020, δίνονται οι διακυμάνσεις των υπαρχόντων εγκαταστάσεων απευθείας χρήσης της γεωθερμίας, καθώς και αυτών που πρόκειται να γίνουν στο άμεσο μέλλον (Σχήμα 1.8). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ποσοτική σύγκριση της θερμικής χωρητικότητας (MWth) των εγκαταστάσεων αυτών από το 2010 έως το έτος 2020 (Σχήμα 1.9).

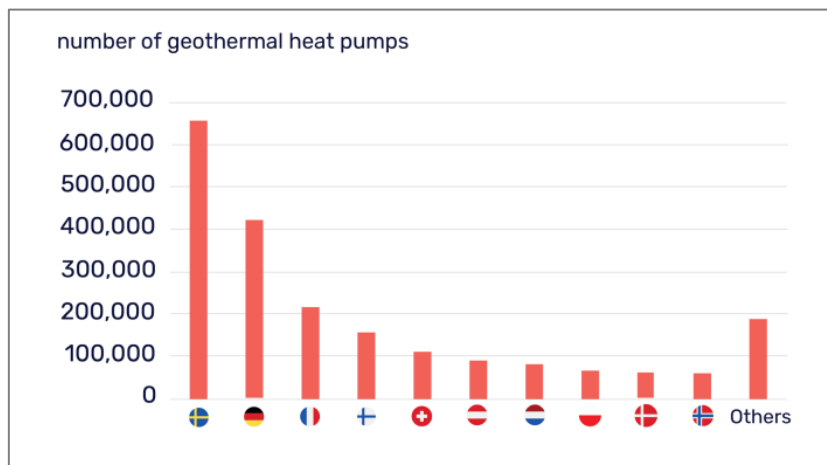


Σχήμα 1.8 Ποσοτικό διάγραμμα εγκαταστάσεων απευθείας χρήσης: υπάρχουσες και σε εξέλιξη. [22]

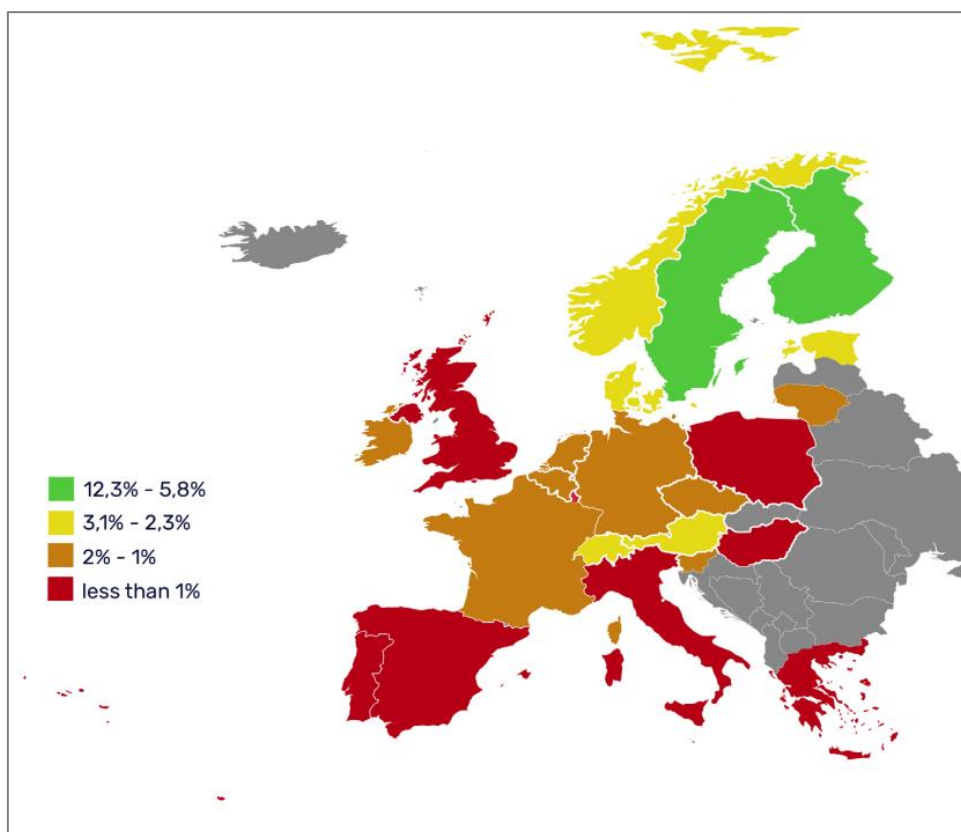


Σχήμα 1.9 Ποσοτικό διάγραμμα χωρητικότητας εγκαταστάσεων απευθείας χρήσης για τα έτη 2010 και 2020. [22]

Αντίστοιχο διάγραμμα ακολουθεί και στο Σχήμα 1.10 στο οποίο φαίνεται ο αριθμός των συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας κάθε χώρας. Ακολουθεί ευρωπαϊκός χάρτης με την ποσοστιαία ένδειξη που προκύπτει από τον αριθμό μονάδων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας ανά 1000 κατοικίες για κάθε χώρα (Σχήμα 1.11).

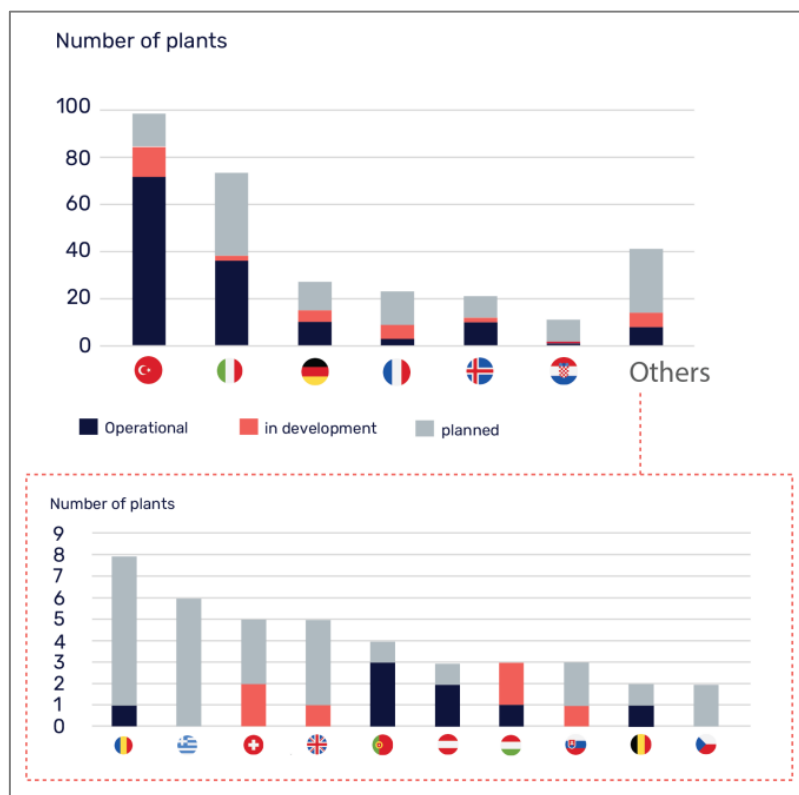


Σχήμα 1.10 Ποσοτικό διάγραμμα συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. [22]

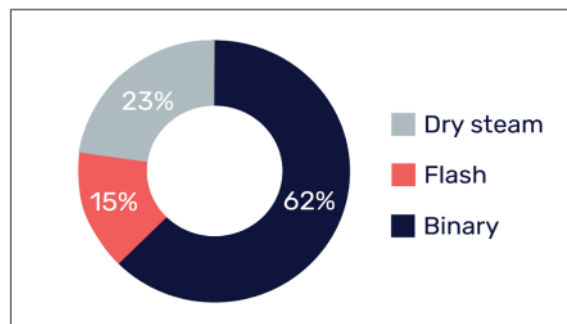


Σχήμα 1.11 Αριθμός μονάδων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας ανά 1000 κατοικίες. [22]

Παρατίθενται επιπλέον, σύμφωνα με τις πρόσφατες καταγραφές του έτους 2020, ο αριθμός εγκατεστημένων ηλεκτρικών μονάδων ανά χώρα, ο αριθμός των μονάδων που είναι σε εξέλιξη, καθώς και οι εγκαταστάσεις που πρόκειται να γίνουν (Σχήμα 1.12). Στο Σχήμα 1.13 φαίνεται η ποσοστιαία κατανομή των τριών διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών μονάδων που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 1.12 Ποσοτικό διάγραμμα ηλεκτρικών μονάδων ανά χώρα: εγκατεστημένες, σε εξέλιξη, που πρόκειται να γίνουν. [22]



Σχήμα 1.13 Ποσοστιαίο διάγραμμα χρήσης των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών μονάδων στην Ευρώπη. [22]



### Εκμετάλλευση γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή

Η γεωθερμία αυτή τη στιγμή δε χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Προσπάθειες που έγιναν στο παρελθόν απέτυχαν, λόγω τεχνικών επιπλοκών, ισχυρής αντίδρασης των τοπικών κοινοτήτων, καθώς και προβλήματα με τη χρηματοδότηση και ύπαρξη γραφειοκρατικών εμποδίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα όσον αφορά την αποτυχία εκμετάλλευσης πεδίων υψηλής ενθαλπίας για ηλεκτροπαραγωγή είναι αυτά της Μήλου και της Νίσυρου, όπου αν και εκτιμάται πως έχουν δυναμικό 200 και 50 MW αντίστοιχα, φαίνεται πως άστοχες ενέργειες του παρελθόντος από τη μεριά των αρμόδιων φορέων σταμάτησαν την όποια εξέλιξη στο κομμάτι της εγκατάστασης γεωθερμικών μονάδων για παραγωγή ηλεκτρισμού.

Το 2017 η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού – Ανανεώσιμες – θυγατρική της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) – ανακοίνωσε διεθνή πρόσκληση ενδιαφέροντος για την επιλογή εταίρου για τη χρηματοδότηση, ανάπτυξη και διαχείριση μικρών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (5-8MWe) σε τέσσερα πεδία μισθωμένα στη ΔΕΗ (Μήλος - Κίμωλος, Νίσυρος, Λέσβος και η χερσόνησος των Μεθάνων στη βορειοανατολική Πελοπόννησο και οι πρώτοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής πρόκειται να εγκατασταθούν στη Λέσβο και στα Μέθανα, ελπίζοντας πως η επιτυχία του έργου θα μετριάσει την αντίδραση των κατοίκων της Μήλου και της Νίσυρου ενάντια στην εκμετάλλευση των πόρων υψηλής ενθαλπίας.

### Εκμετάλλευση γεωθερμίας για άμεσες χρήσεις

Περνώντας στα πεδία χαμηλότερων θερμοκρασιών, φαίνεται πως μέχρι τώρα η χώρα είχε αρκεστεί στην εκμετάλλευσή τους κυρίως στον αγροτικό τομέα. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται άμεσα για λουτροθεραπεία, θέρμανση χώματος και θερμοκηπίων, σε υδατοκαλλιέργειες και για την ξήρανση λαχανικών.

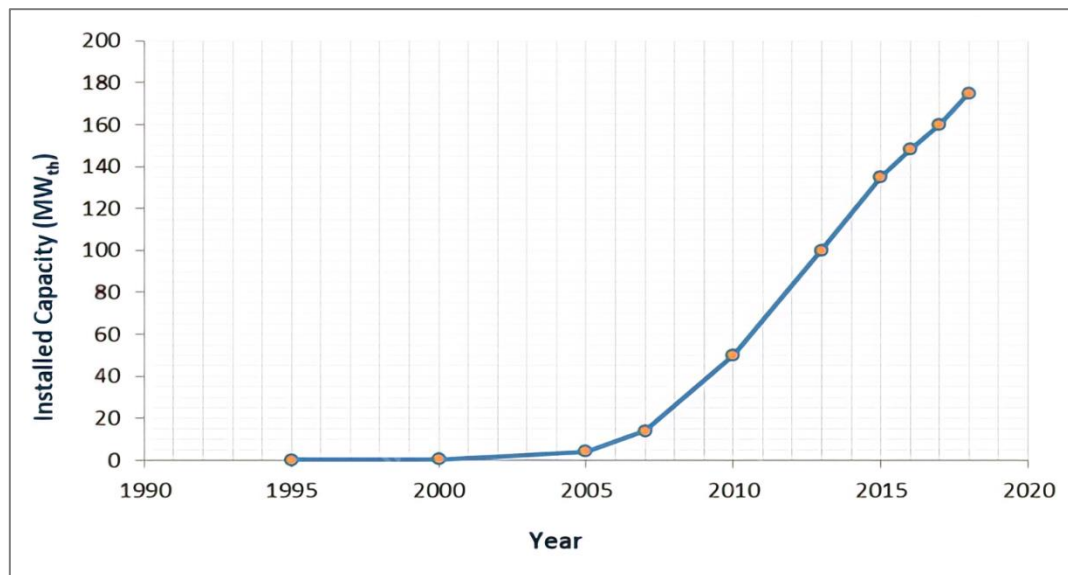
Παρά την ελλιπή διερεύνηση πολλών περιοχών που κρίνονται ελπιδοφόρες για την ενίσχυση αγροτικών – κτηνοτροφικών εργασιών, ήδη διακρίνεται μια αύξηση στην Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία και Θράκη της χρήσης της γεωθερμίας για θέρμανση θερμοκηπίων. Πιο συγκεκριμένα, υπήρξαν σημαντικές επενδύσεις για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης θερμοκηπίων εξ'ολοκλήρου από τη γεωθερμία σε δύο πεδία χαμηλής ενθαλπίας στη Βόρεια Ελλάδα, στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης και στη Χρυσούπολη Καβάλας. Βάσει στατιστικών καταγραφών του 2019, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των εφαρμογών άμεσης χρήσης κυμαίνεται στα 97 MWth, χωρίς να υπάρχει σήμερα κάποια σημαντική εξέλιξη. Ελπιδοφόρα είναι η νέα νομοθεσία 4602/2019 που έχει ως στόχο την απλοποίηση των διαδικασιών αδειοδότησης και δίνεται έμφαση στη συνεχή έρευνα γεωθερμικών δυναμικών για χρήσεις με ήπιο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Έτσι, πρόκειται να καλυφθούν μια σειρά από ανάγκες, όπως θέρμανση ιχθυοκαλλιεργειών, αφαλάτωση νερού κτλ. ενισχύοντας κατ'αυτόν τον τρόπο, την ενεργειακή αυτονομία των περιοχών.

### Εκμετάλλευση γεωθερμίας με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Η αγορά των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας χαρακτηρίζεται από σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τα επίσημα στατιστικά στοιχεία (Υπουργείο Ενέργειας και

Περιβάλλοντος) η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των εγκαταστάσεων ΓΑΘ ήταν 148 MWth το 2017. Εκτιμάται πως πάνω από 3300 μονάδες λειτουργούσαν στη χώρα το τέλος του 2018 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 175 MWth (Σχήμα 1.15). Η χρήση των γεωθερμικών αντλιών στην Ελλάδα γίνεται τόσο για θέρμανση, όσο και για ψύξη χώρου, καθώς και για τη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης. Αν και πολλές εφαρμογές αφορούν κατοικίες, η χρήση των γεωθερμικών αντλιών γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη σε δημόσια ή ιδιωτικά κτίρια γραφείων, ξενοδοχεία, πολυκαταστήματα, πισίνες, σχολικά συγκροτήματα κτλ. Σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), δέκα ξενοδοχεία στην Ελλάδα χρησιμοποιούν γεωθερμικά συστήματα αντλιών για θέρμανση και ψύξη.

Στοιχεία από ενδεικτικές εγκαταστάσεις γεωθερμικών αντλιών θερμότητας που λειτουργούν συνεχόμενα για περισσότερο από μια δεκαετία στη Βόρεια Ελλάδα, δείχνουν πως η μέση ετήσια εξοικονόμηση για θέρμανση και ψύξη υπερβαίνει το 65% και 50-55% αντίστοιχα, συγκριτικά με συμβατικά συστήματα θέρμανσης – ψύξης (λέβητας πετρελαίου σε συνδυασμό με μονάδα κλιματισμού). Ο χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται μεταξύ τριών και εννιά ετών, αναλόγως τον τύπο και το μέγεθος του κτιρίου.



Σχήμα 1.15 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θέρμανσης Στην Ελλάδα από το 1995 μέχρι το 2019. [30]

Συμπερασματικά, η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να συμβάλει στην επίτευξη του στόχου των μεταρρυθμίσεων της χώρας που αφορούν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ποσοστό 20% της συνολικής. Ωστόσο, οι γεωθερμικοί πόροι που χρησιμοποιούνται είναι ελάχιστοι συγκριτικά με το ανεκμετάλλευτο δυναμικό της χώρας. Η κάλυψη των συγκεκριμένων στόχων μπορεί να προσεγγισθεί με την ευρεία εφαρμογή γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, μιας και η μέθοδος αυτή αυξάνεται σταθερά, με πολλά νέα έργα σε εξέλιξη σε όλη τη χώρα, συμπεριλαμβανόμενων και των συστημάτων σε υπάρχοντα ή νέα δημόσια κτίρια. Στο επόμενο

κεφάλαιο περιγράφονται οι πιθανοί τύποι συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και πως αυτά εμπεριέχονται στη θεμελίωση ενός κτιρίου.

## 2. Συστήματα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

### 2.1. Λεπτομέρειες συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 1.2, η γεωθερμική αντλία θερμότητας είναι ένα σύστημα θέρμανσης – ψύξης που συνδέεται με τον γεωεναλλάκτη θερμότητας για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας. Ο γεωεναλλάκτης επιτρέπει την κυκλοφορία ενός ρευστού μέσω σωλήνων με κατεύθυνση προς την ανωδομή, οι οποίοι θάβονται υπόγεια σε διάφορους τύπους διατάξεων, ώστε να πραγματοποιείται η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευστού και περιβάλλοντος εδάφους.

Αναλυτικότερα, τα προαναφερθέντα λειτουργικά τμήματα ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας συνθέτουν το πρωτεύον και το δευτερεύον κύκλωμα, τα οποία επιτρέπουν την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του εδάφους και της ανωδομής μέσω των γεωεναλλακτών. Στο πρωτεύον κύκλωμα η θερμότητα ανταλλάσσεται μεταξύ του εδάφους και του γεωεναλλάκτη και συλλέγεται για να μεταφερθεί στην ανωδομή. Στο δευτερεύον κύκλωμα η θερμότητα μεταφέρεται στην ανωδομή, η οποία με τη σειρά της θερμαίνεται ή ψύχεται. Μεταξύ των δύο αυτών κυκλωμάτων χρησιμοποιείται συνήθως ηλεκτροκίνητη μηχανή, όπως αντλία θερμότητας ή αντίστροφη αντλία θερμότητας. Η ανάγκη χρήσης αντλίας εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος (γεωεναλλάκτης – ανωδομή). Πρακτικά, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ αυτών των δύο κυκλωμάτων κάνει την ανταλλαγή θερμότητας περισσότερο ή λιγότερο ευνοϊκή (βλ. Παράγραφο 2.3 απόδοση Carnot). Παρακάτω παρατίθενται λεπτομερώς τα κυκλώματα του συστήματος, καθώς και οι αρχές λειτουργίας της γεωθερμικής αντλίας.

- Πρωτεύον κύκλωμα

Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του γεωεναλλάκτη γίνεται μέσω του υγρού που κυκλοφορεί στους ενσωματωμένους στους γεωεναλλακτές σωλήνες, επιτρέποντας έτσι την εκμετάλλευση της μεγάλης θερμικής χωρητικότητας του εδάφους για σκοπούς θέρμανσης και ψύξης. Οι σωληνώσεις (συνδέονται με συλλέκτες) συλλέγονται σε έναν ή περισσότερους διανομείς, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την επίλυση τυχόν προβλημάτων που σχετίζονται με την εγκατάσταση και τη λειτουργία των γεωεναλλακτών. Τα στοιχεία αυτά και οι σωλήνες που προεξέχουν τοποθετούνται συνήθως κάτω από την πλάκα υπογείου.

Αναλόγως τη διάταξη των γεωεναλλακτών, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως:

#### Σύστημα κλειστού βρόγχου

Χρησιμοποιείται ένα μείγμα νερού και αντιψυκτικού υγρού ή διάλυμα άλμης που κυκλοφορεί μέσω σφραγισμένων σωλήνων, ώστε να μεταφέρει τη θερμότητα από το έδαφος στην ανωδομή ή αντίστροφα. Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων γίνεται με διάφορους τρόπους, κυρίαρχοι

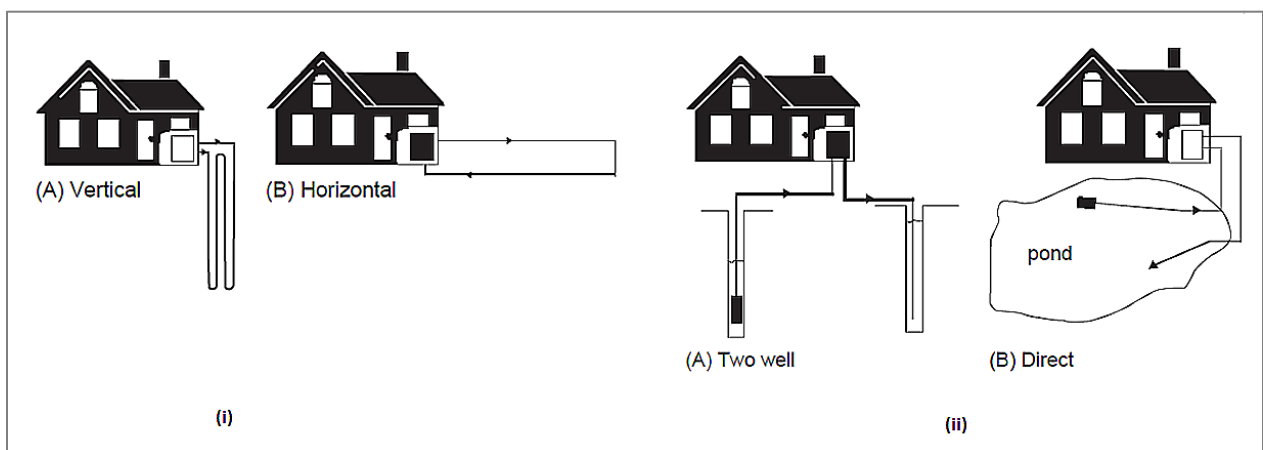


εξ' αυτών είναι οι κάθετες γεωτρήσεις (κατακόρυφος γεωεναλλάκτης) ή επιφανειακοί βρόγχοι σε οριζόντια διάταξη (οριζόντιος γεωεναλλάκτης). Οι κάθετες γεωτρήσεις κυμαίνονται σε βάθη 50-150 μέτρα. Τοποθετείται συνήθως υλικό πλήρωσης στη γεώτρηση (π.χ. μπετονίτης), ώστε να ενισχυθεί η μετάδοση της θερμότητας από το έδαφος στους σωλήνες. Συνήθως το σύστημα των κατακόρυφων γεωεναλλακτών εφαρμόζεται όταν ο περιβάλλοντας χώρος δεν επαρκεί για την τοποθέτηση οριζόντιου συτήματος ή όταν πρόκειται για βραχώδες έδαφος. Οι βρόγχοι σε οριζόντια διάταξη αποτελούν τον πιο αβαθή τύπο γεωθερμικού συστήματος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από σωλήνες, οι οποίοι τοποθετούνται περιμετρικά του κτιρίου και σε βάθος 2 έως 5 μέτρα, απορροφώντας τη θερμότητα του εδάφους που οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Απαιτούν έκταση εφαρμογής περίπου τη διπλάσια από αυτή του θερμαινόμενου χώρου.

#### Σύστημα ανοιχτού βρόγχου (Σύστημα υδατοσυλλέκτη)

Ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιούνται είτε ταμειυτήρες νερού που ενδέχεται να υπάρχουν, είτε απευθείας τα διαθέσιμα υπόγεια ύδατα που εξάγονται ή εγχέονται σε υδροφορείς μέσω δύο πηγαδιών βάθους 5-20 μέτρων. Το υπόγειο νερό αντλείται από το ένα πηγάδι και αφού οδηγηθεί στην αντλία θερμότητας διοχετεύεται ξανά στον υδροφόρο ορίζοντα μέσω του δεύτερου πηγαδιού. Σε αντίθεση με το κλειστό σύστημα, η έλλειψη ψυκτικού υγρού και η απευθείας χρήση του υπόγειου νερού για τη μεταφορά θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του συστήματος σε θερμοκρασίες που προσεγγίζουν αυτή του περιβάλλοντος εδάφους, παρέχοντας υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, το ανοιχτό σύστημα έχει μεγαλύτερες οικονομικές απαιτήσεις και ενέχει τεχνικούς κινδύνους που σχετίζονται κυρίως με τη ρύπανση του υπεδάφους και την κατακρήμνιση ορυκτών. Το τελευταίο δημιουργεί την επιπρόσθετη υποχρέωση λήψης άδειας εξορυκτικού έργου.

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται τα προαναφερθέντα συστήματα γεωθερμίας.



**Σχήμα 2.1** Τυπικά συστήματα γεωεναλλακτών. (iA,B) Κατακόρυφο και οριζόντιο σύστημα κλειστού τύπου. (iiA,B) Κατακόρυφο και οριζόντιο σύστημα ανοιχτού τύπου (υδατοσυλλέκτες). [17]

- Αντλία

Για την κατανόηση της λειτουργίας της αντλίας παρατίθενται παρακάτω οι νόμοι της θερμοδυναμικής στους οποίους βασίζεται, καθώς και ο θεωρητικός κύκλος μιας μηχανής Carnot (ισχύει ο αντίστροφος ψυκτικός κύκλος Carnot για γεωθερμικές αντλίες θερμότητας)

### 1<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος

Η ενέργεια δε μεταβάλλεται. Μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί από ένα σώμα σε ένα άλλο. (Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας)

### 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος

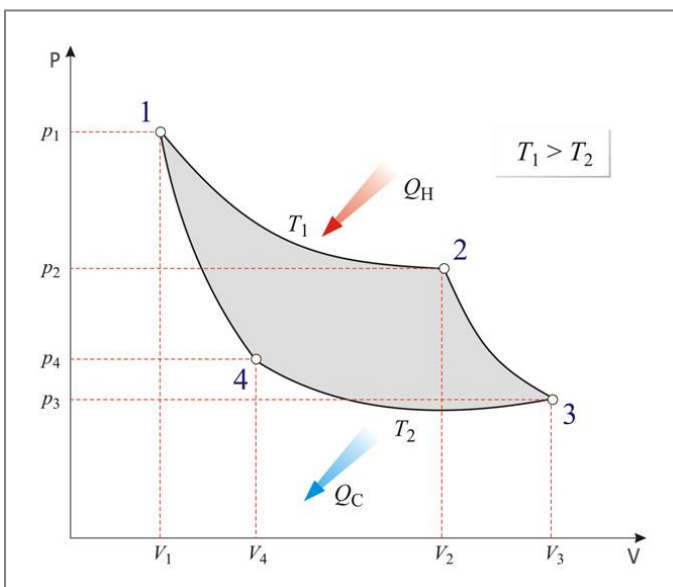
Η ενέργεια μεταφέρεται πάντα από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Για το αντίστροφο αποτέλεσμα χρειάζεται η παρουσία ενός έργου.

### 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος – Διατύπωση Kelvin – Planck

Μια κυκλική διάταξη που κυκλοφορεί ρευστό δεν είναι αδύνατο να έχει ως μοναδικό αποτέλεσμα την πλήρη μετατροπή ενός ποσού θερμότητας σε έργο. Καμιά θερμική μηχανή δεν μπορεί να έχει απόδοση 100%.

### Κύκλος Θερμικής μηχανής Carnot

Πρόκειται για μια ιδανική θερμική μηχανή, η οποία εκτελεί μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή (κύκλος Carnot). Η απόδοση που προκύπτει από αυτόν τον κύκλο είναι το ανώτατο θεωρητικό όριο, δηλαδή η μέγιστη δυνατή απόδοση της μηχανής. Ο κύκλος Carnot αποτελείται από δύο ισοθερμοκρασιακές και δύο αδιαβατικές μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται ο κύκλος Carnot στο Σχήμα 2.2 θεωρώντας δεξαμενές χαμηλής θερμοκρασίας ( $T_2$ ) και υψηλής θερμοκρασίας ( $T_1$ ).



Σχήμα 2.2 Κύκλος θερμικής μηχανής Carnot. [50]

1 → 2 : Ισόθερμη εκτόνωση, μεταφορά θερμότητας  $Q_H$  στο σύστημα από δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας

2 → 3 : Αδιαβατική εκτόνωση, η θερμοκρασία του ρευστού μειώνεται. Το σύστημα παράγει έργο.

3 → 4 : Ισόθερμη συμπίεση, αποβολή θερμότητας  $Q_C$  από το σύστημα σε δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας

4 → 1 : Αδιαβατική συμπίεση, διαδικασία στην οποία το σύστημα δέχεται έργο. Η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνεται και καταλήγει στην αρχική του κατάσταση.

Συνεπώς, αποτέλεσμα της διαδικασίας λειτουργίας της μηχανής Carnot είναι η παραγωγή μηχανικού έργου με την πρόσδοση θερμότητας.

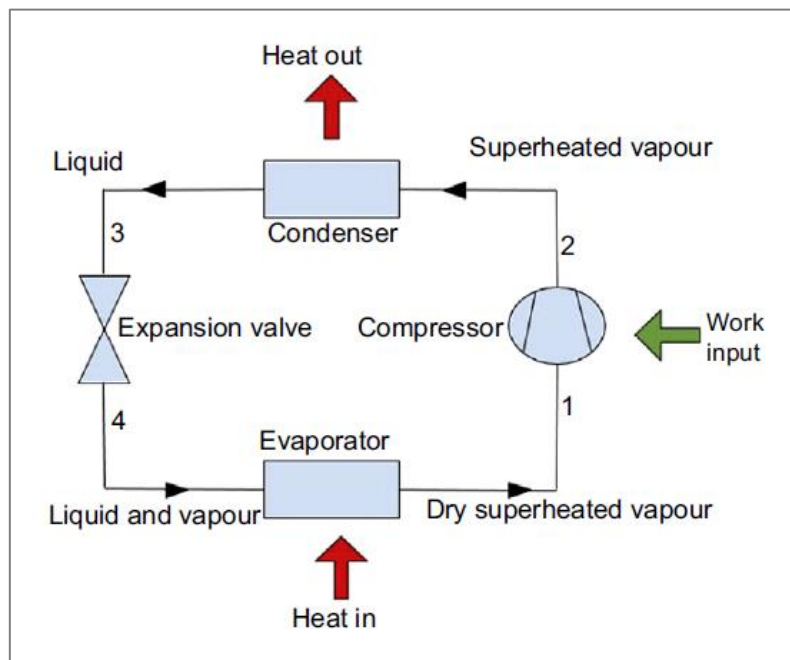
Έχοντας κατανοήσει τις παραπάνω αρχές, δίνεται ο ορισμός της αντλίας θερμότητας, καθώς και η διαδικασία λειτουργίας της.

Αντλία θερμότητας καλείται η μηχανολογική διάταξη που επιτρέπει τη μεταφορά θερμικής ενέργειας από ένα χώρο χαμηλότερης θερμοκρασίας σε ένα χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας – ροή αντίθετη της φυσικής – με την κατανάλωση πρόσθετου εξωτερικού έργου ηλεκτρικής ενέργειας (για κτιριακές εφαρμογές).

Η λειτουργία των αντλιών βασίζεται στην αντίστροφη διαδικασία λειτουργίας της μηχανής Carnot. Όπως αναλύεται και παρακάτω, με την κατανάλωση μηχανικού έργου γίνεται δυνατή η μεταφορά θερμότητας. Οι απλές αντλίες θερμότητας (π.χ. συμπίεσης) περιλαμβάνουν τέσσερις κύριες συσκευές: τον εξατμιστή, τον συμπιεστή, το συμπυκνωτή και τη βαλβίδα εκτόνωσης, καθώς και ένα ειδικό ψυκτικό ρευστό που κυκλοφορεί στο κλειστό κύκλωμα της αντλίας και μετασχηματίζεται από υγρό σε αέριο και από αέριο σε υγρό, απορροφώντας και εκλύοντας θερμότητα, αντίστοιχα. (Σχήμα 2.3)

Κατά τη διαδικασία θέρμανσης της ανωδομής (χειμερινοί μήνες), στον εξατμιστή βρίσκεται το ψυκτικό μέσο χαμηλού σημείου βρασμού (σε σχετικά χαμηλή πίεση) σε μορφή υγρού και κατά την επαφή του με το διάλυμα νερού – αντιψυκτικού υγρού προερχόμενου από τους γεωεναλλάκτες (δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας) μετατρέπεται σε αέριο (εξατμίζεται), ώστε να κυκλοφορήσει στην κλειστή διάταξη της αντλίας. Η αλλαγή φάσης του ψυκτικού υγρού από υγρό σε αέριο μειώνει τη θερμοκρασία του διαλύματος, το οποίο στη συνέχεια εγχέεται στο έδαφος μέσω των σωλήνων των γεωεναλλακτών, ώστε να θερμανθεί ξανά. Το ψυκτικό μέσο όντας σε χαμηλή πίεση και σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, περνά πλέον στο συμπιεστή. Στο συμπιεστή, ο ατμός του ψυκτικού μέσου συμπιέζεται σε υψηλότερη θερμοκρασία με τη χρήση εξωτερικής ενέργειας (ηλεκτρικής ενέργειας) και ρέει προς το συμπυκνωτή σε επίπεδα πίεσης και θερμοκρασίας κατάλληλα για θέρμανση. Στο συμπυκνωτή, ο ατμός του ψυκτικού μέσου – κατά τη συμπύκνωσή του – αποδίδει θερμότητα στο υγρό που κυκλοφορεί στο δευτερεύον κύκλωμα (υπό πολύ υψηλότερη θερμοκρασία από το σημείο βρασμού). Τελικά, το υγρό ψυκτικό μέσο υπό υψηλή πίεση διέρχεται από τη βαλβίδα εκτόνωσης, έχοντας ως αποτέλεσμα την απότομη πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας του, ανακτώντας έτσι τις αρχικές του συνθήκες πριν εισέλθει ξανά στον εξατμιστή από όπου ξεκινά νέα κυκλική διεργασία. Τυπικά οι αντλίες θερμότητας έχουν τη δυνατότητα ανύψωσης του επιπέδου θερμοκρασίας από 10 – 15°C έως 40 – 45°C για τη θέρμανση της ανωδομής.

Η προαναφερθείσα διαδικασία αντιστρέφεται όταν χρησιμοποιούνται αντίστροφες αντλίες θερμότητας, με τη συμπύκνωση του ψυκτικού υγρού να θερμαίνει το διάλυμα νερού – αντιψυκτικού υγρού του πρωτεύοντος κυκλώματος, το οποίο ρέει προς το έδαφος για να κρυσώσει ξανά (ψύξη εσωτερικού χώρου).



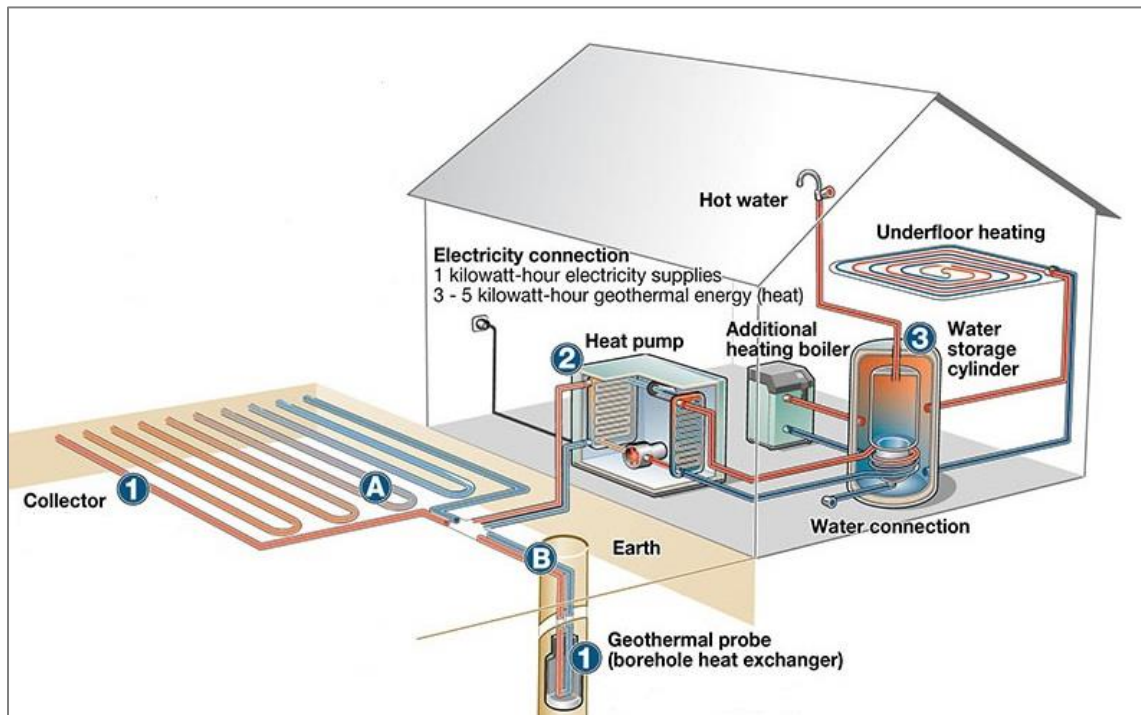
Σχήμα 2.3 Εννοιολογικό μοντέλο γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση κτιρίου. [31]

- Δευτερεύον κύκλωμα

Η μεταφορά θερμότητας από το πρωτεύον κύκλωμα καταλήγει – μέσω της αντλίας – στο δευτερεύον κύκλωμα της ανωδομής. Η ροή του υγρού επιτυγχάνεται μέσω κλειστών δικτύων σωληνώσεων, ενσωματωμένων στα δάπεδα και στους τοίχους (συστήματα ενδοδαπέδιας και ενδοτοιχίας θέρμανσης – δροσισμού) ή μέσω συστημάτων εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (fan coils). Σε συνδυασμό με μια γεωθερμική αντλία θερμότητας, ενδείκνυται η εφαρμογή ενδοδαπέδιας – ενδοτοιχίας θέρμανσης, καθώς εξασφαλίζονται τιμές θερμοκρασίας που επαρκούν για την επίτευξη επιπέδων άνεσης στους χώρους διαβίωσης, επιτρέπεται η εκμετάλλευση επιπρόσθετων ήπιων συστημάτων (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) και επιτυγχάνεται μείωση στην κατανάλωση καυσίμων. Όλα τα παραπάνω συντελούν στην προσέγγιση της βέλτιστης απόδοσης του συστήματος γεωθερμίας.

Ωστόσο, κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη της ανωδομής είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως το κλίμα που επικρατεί, η μορφή και ο προσανατολισμός του κτιρίου, η επίδραση σκιάς, ο εξαερισμός, τα φώτα και οι συσκευές, η παρουσία και η δραστηριότητα ανθρώπων, καθώς και ο σκοπός χρήσης του κτιρίου. Κατά την κατασκευή νέων κτιρίων, κάποιιοι από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι δυνατό να κατασκευαστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση θέρμανσης – ψύξης όσο το δυνατόν ισορροπημένα και να επιτευχθεί έτσι η οικονομικότερη εγκατάσταση και λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων αντλίας θερμότητας.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του συνολικού συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, παρατίθεται το Σχήμα 2.4 στο οποίο απεικονίζεται απλοποιητικά ο κύκλος ροής του θερμικού φορτίου από το έδαφος στην ανωδομή και αντίστροφα.



Σχήμα 2.4 Τυπική απεικόνιση ενός γεωθερμικού συστήματος αντλίας θερμότητας σε κτιριακή εφαρμογή. [32]

Κατά το ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο, η αδειοδότηση εγκατάστασης συστημάτων γεωθερμικής αντλίας για θέρμανση – ψύξη κτιρίου, μέσω της εκμετάλλευσης πόρων που δε θεωρούνται γεωθερμικό δυναμικό (θερμοκρασία κάτω από 25°C ) υπάγεται στην Υπουργική Απόφαση υπ' αριθμόν Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488, με τα εξής άρθρα:

- Άρθρο 1: «Σκοπός»
- Άρθρο 2: «Ορισμοί»
- Άρθρο 3: «Υπηρεσίες έκδοσης – Δικαιούχοι αδειών»
- Άρθρο 4: «Περιοριστικοί όροι»
- Άρθρο 5: «Απαιτούμενα δικαιολογητικά»
- Άρθρο 6: «Διαδικασία χορήγησης άδειας»
- Άρθρο 7: «Τροποποίηση άδειας»
- Άρθρο 8: «Ανάκληση άδειας – Πρόστιμα»
- Άρθρο 9: «Η υπ' αριθ. Δ9Β, Δ/Φ166/οικ18508 /5552 /207/19.10.2004 (ΦΕΚ 1595/Β'/ 25.10/2004) απόφαση παύει να ισχύει και εις αντικατάστασή της εκδίδεται η παρούσα»

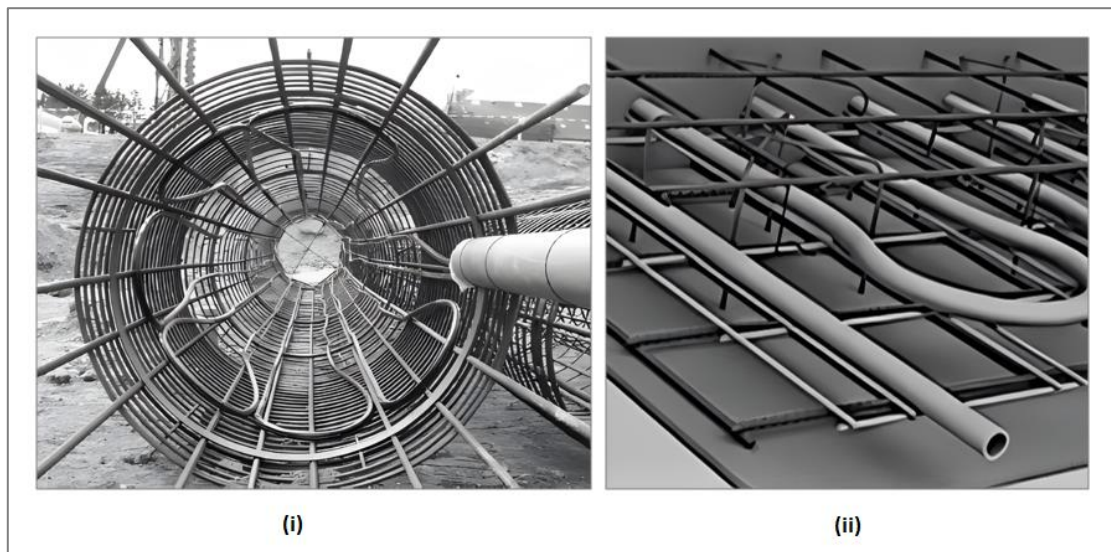
## 2.2. Ενεργειακά θεμέλια – Γεωεναλλάκτες

Το σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας – που αναλύθηκε στην Παράγραφο 2.1 – αποτελεί το πιο αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον υφιστάμενο σύστημα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, έχοντας ολοένα και μεγαλύτερη απήχηση στη θέρμανση – ψύξη κτιρίων. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα του συστήματος αυτού έγκειται στο υψηλό κόστος εγκατάστασης των γεωεναλλακτών, ιδίως των κατακόρυφων. Για την εξοικονόμηση του αρχικού κόστους εγκατάστασης, καθώς και της χρονικής περιόδου κατασκευής γίνονται συνεχείς έρευνες, με σημαντικότερο εύρημα τη χρήση ενεργειακών θεμελίων. Πρόκειται για στοιχεία θεμελίωσης – εναλλάκτες, τα οποία συνδυάζουν το ρόλο της δομικής υποστήριξης και του φορέα θερμικής ενέργειας, εφαρμόζοντας αντίστοιχη τεχνολογία με αυτή που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.1, ώστε να εξυπηρετούνται όλοι οι τύποι υποδομών. Σε αντίθεση με τα τυπικά συστήματα κλειστού και ανοιχτού βρόγχου, τα στοιχεία θεμελίωσης λειτουργούν ως γεωεναλλάκτες θερμότητας και παράλληλα αποτελούν μέρος του σχεδιασμού της κατασκευής, οπότε δε χρειάζεται επιπλέον κόστος και διαθέσιμος χώρος για τη διάτρηση εδάφους και υλοποίηση μεμονωμένων εναλλακτών θερμότητας. Επιπλέον, το σκυρόδεμα – ως υλικό θεμελίωσης – αποτελεί ιδανικό μέσο απορρόφησης θερμότητας του εδάφους, λόγω της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας συγκριτικά με το υλικό πλήρωσης των γεωτρήσεων (π.χ. μπετονίτης). Ευνοϊκό είναι και το γεγονός πως η ακτίνα κάμψης των σωληνώσεων εσωτερικά των γεωδομών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των τυπικών συστημάτων, με αποτέλεσμα τη μειωμένη αντίσταση ροής του υγρού, η οποία συνεπάγεται χαμηλότερη απαιτούμενη ισχύ άντλησης. Οι τρεις παραπάνω παράγοντες συντελούν στο μικρότερο κόστος λειτουργίας ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον στις ενεργειακές γεωδομές, καθώς το 30-40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των χωρών συνδέεται με τον κτιριακό τομέα, του οποίου οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση – ψύξη χώρου και θέρμανση νερού αντιπροσωπεύουν το 50-80% της συνολικής τελικής χρήσης ενέργειας. Παρά τα οφέλη και την ανάγκη εγκατάστασης ενεργειακών θεμελίων, η ανάλυση και ο σχεδιασμός αυτών εξακολουθούν να παρουσιάζουν ορισμένες πτυχές που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση, ώστε να επιτραπεί η ευρεία χρήση των ενεργειακών θεμελίων στη μηχανική πρακτική. Για την επίτευξη ασφαλούς και αξιόπιστου σχεδιασμού γεωδομών χρειάζεται η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής, καθώς και των μηχανικών επιπτώσεων λόγω της επίδρασης θερμικής φόρτισης στην ίδια τη γεωδομή και στο περιβάλλον έδαφος. Επίσης, χρειάζεται να δοθεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά την εγκατάσταση του εξοπλισμού και να γνωστοποιηθούν οι βέλτιστες πρακτικές τοποθέτησης των γεωθερμικών βρόγχων. Για την υλοποίηση των παραπάνω, είναι απαραίτητη η διατύπωση επαρκούς επιστημονικής θεωρίας – επικυρωμένης με επιστημονικά δεδομένα – και η εφαρμογή της, μέσω κατάλληλων προσεγγίσεων και μεθοδολογιών.

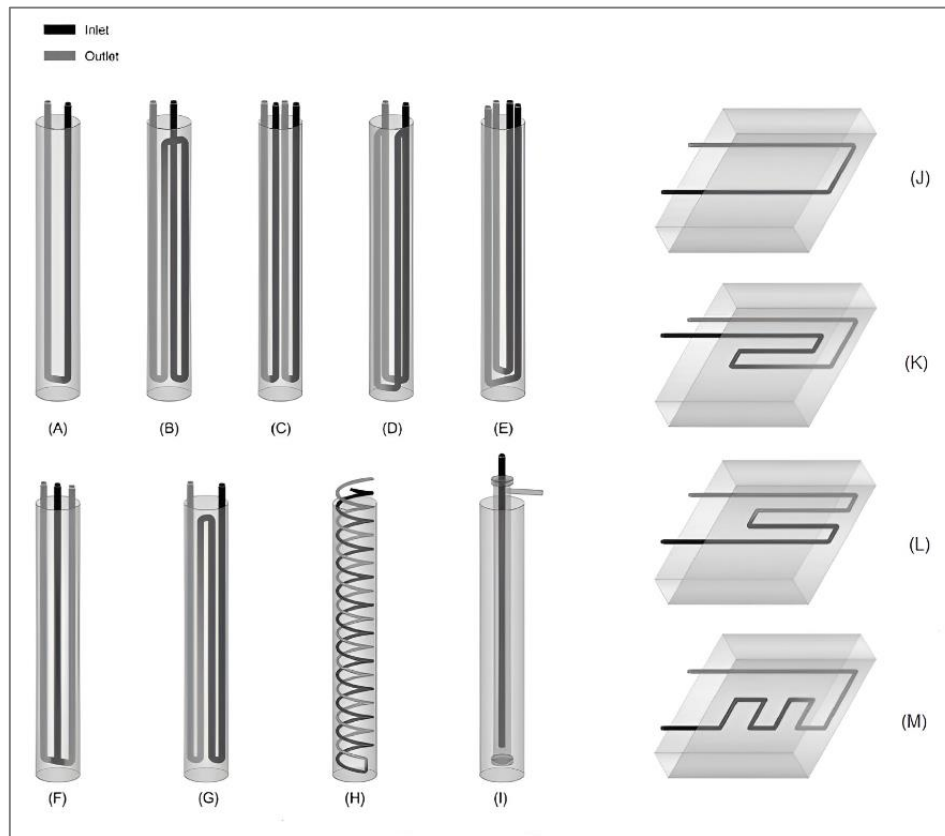
Συνηθέστερο αντικείμενο μελέτης ενεργειακών γεωδομών αποτελούν τα βαθιά θεμέλια (πάσσαλοι, βάθρα), κατασκευές αντιστήριξης (διαφραγματικοί τοίχοι, πασσαλότοιχοι) και – με μικρότερο πεδίο εφαρμογής – ακολουθούν τα ρηχά θεμέλια (κοιτοστρώσεις, πλάκες υπογείου). Συχνή είναι και η επένδυση των τοιχωμάτων σηράγγων. Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η απόκριση συνδυασμένης θεμελίωσης ομάδας πασσάλων – ενιαίου κεφαλόδεσμου υπό την επίδραση μηχανικών και θερμικών φορτίων, θεωρώντας ενεργειακό θεμέλιο τόσο την πλάκα, όσο και τους πασσάλους, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των οποίων αναλύονται παρακάτω.

Οι ενεργειακές γεωδομές κατασκευάζονται γενικά από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η τεχνική διαφοροποίησή τους με τα συμβατικά συστήματα κλειστών βρόγχων έγκειται στην τοποθέτηση των σωληνώσεων, οι οποίες σταθεροποιούνται συνήθως κατά μήκος του οπλισμού ή εντός του υλικού πλήρωσης (σκυρόδεμα). (Σχήμα 2.5)



*Σχήμα 2.5 Κατασκευαστική λεπτομέρεια σωλήνων γεωθερμίας στον οπλισμό (i) ενεργειακού πασσάλου (ii) ενεργειακής πλάκας. ((i) [5] (ii) [15])*

Οι σωλήνες κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και έχουν διάμετρο 10-40mm με πάχος τοιχώματος 2-4mm. Η αρχή για το σχεδιασμό της διάταξης των σωλήνων εσωτερικά του γεωεναλλάκτη είναι η μεγιστοποίηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος και επιλέγεται σε κάθε περίπτωση η πιο κατάλληλη, προσδίδοντας το χαμηλότερο δυνατόν λειτουργικό κόστος και συγχρόνως τη μέγιστη θερμική απόδοση. Στο Σχήμα 2.6 φαίνονται οι πιθανοί σχηματισμοί των σωληνώσεων στους πασσάλους και στην πλάκα.

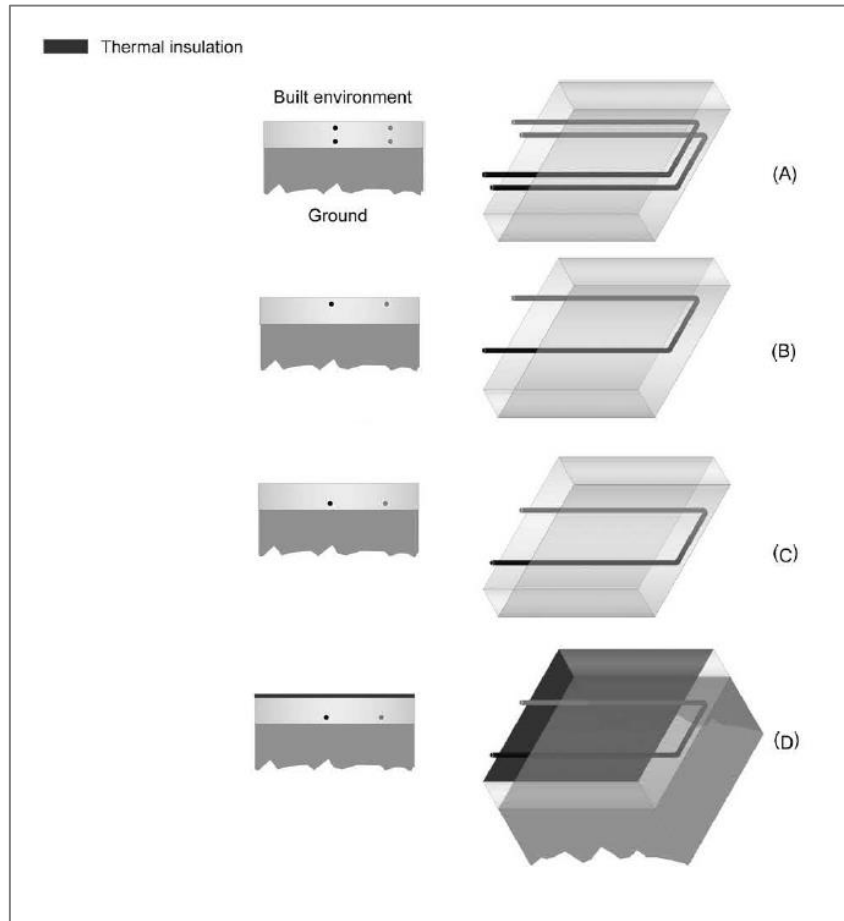


**Σχήμα 2.6** Τυπικές διατάξεις σωληνώσεων στους ενεργειακούς και στην ενεργειακή πλάκα. (Α) Διάταξη σε σχήμα U. (Β) Διάταξη καμπτώμενου U. (C) Διάταξη παράλληλων U. (D) Διάταξη παράλληλων U με ένωση. (E) Διάταξη πολλαπλού U. (F) Διπλή διάταξη. (G) Διάταξη σε σχήμα W. (H) Σπειροειδής διάταξη. (I) Ομοαξονική διάταξη. (J) Διάταξη σε σχήμα U. (K) Διάταξη καμπτώμενου U. (L) Διάταξη σε σχήμα W. (M) Διάταξη κατ'επανάληψη καμπτώμενη. [24]

Οι ενεργειακοί πάσσαλοι περιβάλλονται ομοίωμα από το έδαφος, επομένως η εγκατάσταση των σωληνώσεων δεν επηρεάζεται από τις ιδιότητες του περιβάλλοντος χώρου. Ωστόσο, για να είναι η θερμική απόδοση του πασσάλου αποτελεσματική, το μείγμα που κυκλοφορεί στους σωλήνες, ο ρυθμός ροής του και η διάμετρος των σωλήνων επιλέγονται ώστε η ροή του ρευστού μέσου να είναι τυρβώδης. Η συνολική θερμική απόδοση του ενεργειακού πασσάλου εξαρτάται από τη θέση των σωλήνων στο εσωτερικό του, καθώς και από την αναλογία κατ'όγκον σκυροδέματος του πασσάλου και των σωλήνων. Από την άλλη, η ενεργειακή πλάκα χαρακτηρίζεται από μια διεπιφάνεια με τον αέρα και μια με το έδαφος, επιτρέποντας την ανταλλαγή θερμότητας και με τα δύο μέσα. Η ιδιότητα αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψιν στο σχεδιασμό, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική απόδοση του ενεργειακού συστήματος. Ανάλογα την περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού ή ενίσχυσης της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ της πλάκας και του αέρα – εδάφους, επιλέγοντας την κατάλληλη τοποθέτηση των σωληνώσεων ή ακόμα και μονώνοντας κάποια πλευρά – συνήθως αυτή του αέρα – για την ανακούφιση της θερμικής παρεμβολής που προκαλείται από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος (η επίπτωση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα μπορεί να μειώσει αισθητά την ενεργειακή απόδοση της πλάκας, καθώς η θερμότητα του γεωεναλλάκτη



μεταφέρεται στον εσωτερικό χώρο και όχι στο έδαφος). Επιπλέον, για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου πυρκαγιάς και την αποτροπή τυχαίας ζημιάς, οι σωλήνες πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση τουλάχιστον 200mm από τα τοιχώματα της ενεργειακή πλάκας. (Σχήμα 2.7)



*Σχήμα 2.7* Πιθανές τοποθετήσεις σωληνώσεων σε ενεργειακή πλάκα, υποθέτοντας διάταξη σε σχήμα U. (A) Εγκατάσταση και από τις δύο πλευρές. (B) Εγκατάσταση στην πλευρά αέρα. (C) Εγκατάσταση στην πλευρά εδάφους. (D) Εγκατάσταση στην πλευρά εδάφους με μονωμένη πλευρά αέρα. [24]

Το γεγονός πως τα ενεργειακά θεμέλια αποτελούν δομικά στοιχεία της κατασκευής καθιστά την τοποθέτηση των σωληνώσεων εντός αυτών ιδιαίτερα κρίσιμη. Στη συνδυασμένη θεμελίωση πασσάλων – ενιαίου κεφαλόδεσμου τοποθετούνται αρχικά οι σωλήνες στο εσωτερικό των πασσάλων και με την κατάλληλη θερμική σύνδεση προσαρμόζονται στον οπλισμό της ενεργειακής πλάκας ή και κάτω από αυτήν καταλήγοντας στον συλλέκτη. Πρόκειται για σωλήνες υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου και ονομαστικής πίεσης λειτουργίας 10 ή 16 atm. Αναλυτικότερα, εφαρμόζονται στο διαμήκη οπλισμό των πασσάλων είτε στη μονάδα κατασκευής του οπλισμού, είτε πιο συχνά επί τόπου στο εργοτάξιο με τη βοήθεια μανιβέλας ή και δια χειρός. Αναλόγως την επιλεγμένη διάταξη (συνήθως σχήμα U), σχηματίζονται βρόγχοι, η καμπύλη των οποίων – όπως προαναφέρθηκε – συμβάλλει στην αντίσταση του μέσου. Οι πρώτοι ενεργειακοί πάσσαλοι ήταν προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος με ενσωματωμένους

τους σωλήνες κυκλοφορίας του ρευστού. Πλέον η τεχνολογία επιτρέπει την κατασκευή μεγάλης διαμέτρου πασσάλων (μεγαλύτερης του 1 μέτρου) και την εφαρμογή πολλαπλών βρόγχων σε σχήμα U για την επίτευξη μεγαλύτερης θερμικής απόδοσης. Για τη σταθεροποίηση λοιπόν, της κύρτωσης των βρόγχων και την προστασία των σωλήνων κατά τη σκυροδέτηση, οι διατομές των σωλήνων στο ύψος του βρόγχου δένονται σε ένα τσέρκι, συγκολλημένο στο διαμήκη σπλισμό των πασσάλων. Σε τουλάχιστον δύο από τις προεξέχουσες απολήξεις του σωλήνα (άκρες εισόδου και εξόδου) τοποθετούνται δικλίδες και μανόμετρο (Σχήμα 2.8). Στο δίκτυο του σωλήνα εφαρμόζεται πίεση 8 bar, ώστε να μείνουν σταθεροί και προστατευμένοι κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης. Τυπικά, η τιμή αυτή της πίεσης διατηρείται μέχρι και όταν το σκυρόδεμα είναι πλέον λίγων ημερών και τότε πληρώνεται ξανά με πίεση μέχρι το πρωτεύον κύκλωμα να κλείσει οριστικά. Τα άνω άκρα (απολήξεις – δικλίδες – μανόμετρο) καλύπτονται προσωρινά από ένα πλαστικό προστατευτικό (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.8 Τοποθέτηση μανόμετρου στις απολήξεις. [24]



Σχήμα 2.9 Προστατευτικό απολήξεων σωλήνα. [34]

Η διάτρηση γίνεται πριν ακριβώς τη σκυροδέτηση. Οι ενεργειακοί πάσσαλοι συνήθως χαρακτηρίζονται από αβαθή μήκη, όπου το έδαφος είναι ακόμα μαλακό. Συνήθως η διάτρηση τέτοιου εδάφους δεν απαιτεί λάσπη στο τρυπάνι, δηλαδή οι τρύπες ανοίγονται στεγνά με ελαφριά κινητά γεωτρύπανα. Ο σπλισμός συνδεδεμένος πλέον με το σύστημα των σωλήνων τοποθετείται στο διάτρημα με ιδιαίτερη προσοχή. Κατά τη σκυροδέτηση, ο χειρισμός του σωλήνα έγχυσης σκυροδέματος είναι κρίσιμος, ιδίως στην περίπτωση που η διάμετρος του ενεργειακού πασσάλου είναι μικρή με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μηχανική καταπόνηση των σωλήνων. Κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, χρειάζεται συνεχής επίβλεψη, αφού πλέον οι σωλήνες δέχονται και θερμική φόρτιση.

Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της πήξης του σκυροδέματος, ακολουθεί η διαδικασία κοπής των πασσάλων με ιδιαίτερη προσοχή στις διατομές των σωλήνων. Στη συνέχεια, αφαιρείται το προστατευτικό των απολήξεων και γίνονται περαιτέρω έλεγχοι της κατάστασης των σωλήνων (Σχήμα 2.10). Εφόσον το σύστημα είναι άρτιο, αφαιρείται η πίεση εντός των σωλήνων και οι απολήξεις συνδέονται με μια θερμική σύντηξη με το οριζόντιο δίκτυο. Το οριζόντιο δίκτυο

αποτελεί συλλεκτήριο δίκτυο των βρόγχων των ενεργειακών πασσάλων και συγχρόνως λειτουργεί ως δίκτυο σωληνώσεων της ενεργειακής πλάκας, το οποίο βρίσκεται είτε στον οπλισμό του κάτω μέρους της πλάκας, είτε κάτω από αυτήν, προκειμένου να μειωθεί η θερμική αντίσταση του σκυροδέματος του θεμελίου (Σχήμα 2.11). Η σκυροδέτηση γίνεται παράλληλα με την εγκατάσταση του οριζόντιου δικτύου, με τους σωλήνες να συγκεντρώνονται στους συλλέκτες – διανομείς (Σχήμα 2.12). Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.1, οι συλλέκτες είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο μεμονωμένων δικτύων σωληνώσεων και την αποκοπή τους σε περίπτωση προβλήματος και συνδέουν όλα τα κυκλώματα με τη γεωθερμική αντλία θερμότητας. Η σύνδεση των σωλήνων με τους συλλέκτες γίνεται στο τέλος των οικοδομικών εργασιών και αφού γίνει η πλήρωση με μείγμα νερού και αντιψυκτικού υγρού, ελέγχεται συστηματικά η πίεση κάθε κυκλώματος. Η εγκατάσταση του πρωτεύοντος δικτύου έχει πλέον ολοκληρωθεί.



Σχήμα 2.10 Απολήξεις σωλήνων στον κεφαλόδεσμο. [34]



Σχήμα 2.11 Συλλεκτήριο οριζόντιο δίκτυο σωλήνων των ενεργειακών πασσάλων. [36]



Σχήμα 2.12 Σύνδεση κυκλωμάτων με τους συλλέκτες – διανομείς. [9]

Είναι αντιληπτό πως μέχρι την ενεργοποίηση του ενεργειακού συστήματος οι αρμοδιότητες και οι παράλληλες εργασίες που υλοποιούνται είναι πολλές. Ο συντονισμός των συνεργείων και η εξειδίκευση του εργολάβου μηχανικού είναι απαραίτητα στοιχεία για την αξιολόγηση κρίσιμων σημείων καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και για τη διευθέτηση τυχόν προβλημάτων κατά τη διεκπεραίωση του γεωθερμικού έργου. Ο μακροπρόθεσμος έλεγχος ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού κατά τη λειτουργία του συστήματος των γεωεναλλακτών εξασφαλίζει την επίτευξη των αναγκών θέρμανσης – ψύξης του κτιρίου, δηλαδή την ικανοποίηση των οριακών τιμών θερμοκρασίας του συστήματος και η συστηματική παρακολούθηση της λειτουργίας των κυκλωμάτων ωθεί στη βελτιστοποίησή τους, συγκρίνοντας το ενεργειακό μοντέλο σχεδιασμού με το πραγματικό και ελέγχοντας την τιμή θερμοκρασίας εξόδου της αντλίας. Η βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος συνδράμει στη γρηγορότερη απόσβεση του αρχικού κόστους επένδυσης, καθώς και στην εξοικονόμηση διοξειδίου του άνθρακα. Όσον αφορά το σχεδιασμό ενός γεωθερμικού συστήματος, χρειάζεται να προβλέπονται τυχόν αστοχίες και να λαμβάνονται υπ' όψιν ενδεχόμενες αποκλίσεις. Για τα ενεργειακά θεμέλια προβλέπεται παραλαβή σωληνώσεων αυξημένη κατά 10% σε περίπτωση που υπάρξει αλλοίωση των βρόγχων είτε κατά την εγκατάστασή τους, είτε κατά την κοπή των πασσάλων. Ωστόσο, χρειάζεται η περαιτέρω ανάπτυξη τεχνολογίας συντήρησης και αντικατάστασης των σωλήνων, αφού ενδέχεται να αλλοιωθούν ή και να καταστραφούν ακόμα και από τη διάβρωση που προκαλεί το μέσο κατά την κυκλική μεταφορά θερμότητας.

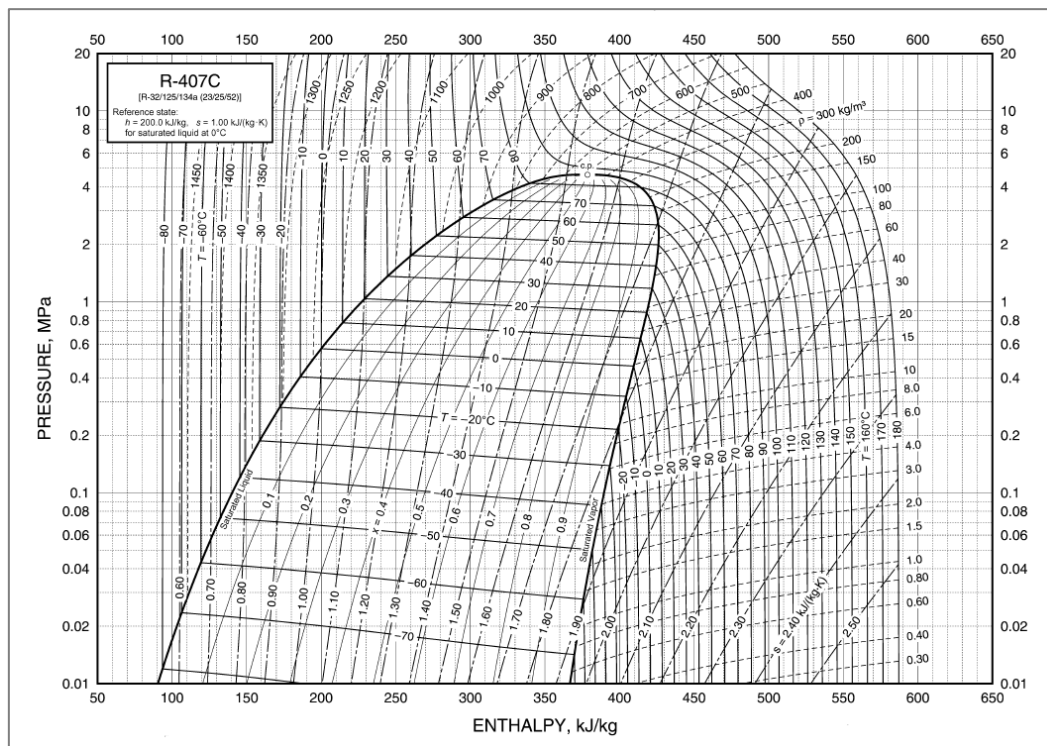
### 2.3. Απόδοση συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

Για τη λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιείται υγρό χωρίς χλώριο που δεν είναι καταστροφικό για το στρώμα του όζοντος και με χαμηλή συνεισφορά στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιλέγονται γενικά μη εύφλεκτα αντιψυκτικά (R 407C, R 404A, R 410A, R 134a κτλ) επιτρέποντας την προσθήκη βιοδιασπώμενου συνθετικού ψυκτικού λαδιού (λάδι με εστέρα) και δε συνιστώνται εύφλεκτα ψυκτικά (π.χ. R 290) για λόγους ασφάλειας. Παρακάτω περιγράφεται το λογαριθμικό διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας του αντιψυκτικού υγρού, ακολουθώντας την κυκλική διάταξη της αντλίας που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 2.1 και αναλύονται οι έννοιες απόδοσης του συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Στο διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας η καμπύλη που σχηματίζεται σε μορφή ανάποδου U υποδεικνύει τα σημεία στα οποία το ψυκτικό υγρό αλλάζει φάση. Αριστερά σχηματίζεται η καμπύλη κορεσμένου υγρού και δεξιά η καμπύλη κορεσμένων ατμών. Η περιοχή μεταξύ των δύο καμπυλών αυτών περιγράφει την κατάσταση του αντιψυκτικού μέσου ως μείγμα υγρού και ατμών. Η περιοχή αριστερά της καμπύλης κορεσμένου υγρού υποδεικνύει ότι το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε υγρή μορφή και η περιοχή δεξιά της καμπύλης κορεσμένων ατμών υποδεικνύει ότι το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε μορφή ατμών. Το σημείο στο οποίο συναντώνται οι δύο καμπύλες ονομάζεται κρίσιμο σημείο. Η σημασία αυτού του σημείου έγκυται στο γεγονός πως σε οποιοδήποτε σημείο πάνω από το κρίσιμο, η επιβολή πρόσθετης πίεσης δεν είναι δυνατό να μετατρέψει τον ατμό σε υγρό. Η περιοχή που περιγράφει την υγρή φάση του ψυκτικού μέσου

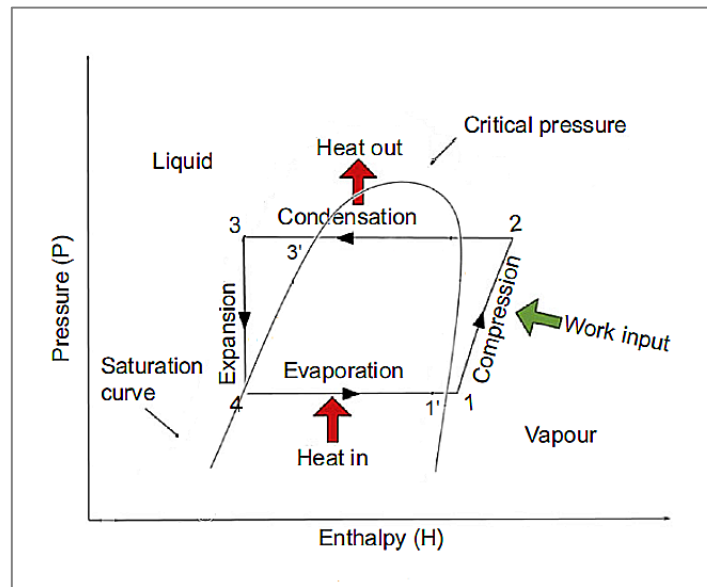
είναι γνωστή ως περιοχή υπόψυξης. Επιπλέον, η περιοχή που περιγράφει τη φάση ατμών του μέσου είναι γνωστή ως περιοχή υπερθέρμανσης. Στις περιοχές αυτές υπάρχουν κατακόρυφες γραμμές θερμοκρασίας, οι τιμές των οποίων αυξάνονται όσο αυξάνεται η ενθαλπία. Υπάρχουν επίσης γραμμές σταθερής εντροπίας, οι οποίες είναι εξίσου σημαντικές, καθώς η εντροπία αποτελεί μέτρο της αταξίας του συστήματος. Στην περιοχή μείγματος υγρού – ατμού υπάρχουν οριζόντιες γραμμές θερμοκρασίας, δηλαδή η θερμοκρασία είναι σταθερή. Πρόκειται για περιοχή αλλαγής φάσης, κατά την οποία οποιαδήποτε προσθήκη ενθαλπίας προκαλεί την εξάτμιση επιπλέον υγρού, χωρίς την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν επίσης ανοδικές κεκλιμένες καμπύλες που υποδηλώνουν την ποιότητα. Η ποιότητα είναι το μέτρο του λόγου της μάζας των ατμών προς τη συνολική μάζα.

Για την απεικόνιση των παραπάνω παρατίθεται το λογαριθμικό διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας του αντιψυκτικού υγρού R 407C στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας αντιψυκτικού υγρού R-407C. [16]

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η διαδικασία ενσωμάτωσης ενός κύκλου γεωθερμικής αντλίας σε διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση του συστήματος. Το διάγραμμα που εξετάζεται στο Σχήμα 2.14 είναι απλοποιημένο και αποσκοπεί στη διατύπωση του ορισμού της έννοιας του συντελεστή ενεργειακής απόδοσης COP.



2.14 Εξιδανικευμένος κύκλος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας. [31]

Η μεταβολή της ενθαλπίας στον εξατμιστή και στο συμπυκνωτή υποδεικνύουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μάζας ψυκτικού που ρέει. Ο πρωταρχικός λόγος που κάνει τη χρήση αντλιών θερμότητας για την παροχή θέρμανσης και ψύξης ενδιαφέρουσα είναι πως χρειάζεται μικρότερο έργο για να μετακινηθεί η θερμότητα από την πηγή στην ανωδομή απ'ό,τι για να μετατραπεί η πρωτογενής ενέργεια (ηλεκτρική) σε θερμότητα. Η απαιτούμενη ισχύς δηλαδή, είναι αισθητά μικρότερη από την ποσότητα θέρμανσης ή ψύξης που μεταφέρεται. Το φαινόμενο αυτό ποσοτικοποιείται στην κλασσική θερμοδυναμική με το συντελεστή απόδοσης  $COP$  (Coefficient of Performance). Θεωρώντας πως η απόδοση θέρμανσης (Heat out) και το έργο που απαιτείται (Work input) συμβολίζονται ως  $Q_H$  [kW] και  $W$  [kW] αντίστοιχα, ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης  $COP$  ως:

$$COP = \frac{Q_H}{W} \quad (2.1)$$

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη μεταβολή 1'-1 (Σχήμα 2.14) προκαλείται υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου, ενώ κατά τη μεταβολή 3'-3 υπόψυξη. Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης μπορεί να προκαλέσει πολύ χαμηλές θερμοκρασίες εξατμισμού, απώλεια ψυκτικού ή και φθορά του συμπιεστή. Αντίστοιχα, ανεπαρκής υπερθέρμανση ενδέχεται να προκαλέσει περίσσεια ψυκτικού στο συμπιεστή, μειώνοντας το συντελεστή απόδοσης. Όσον αφορά το φαινόμενο της υπόψυξης – στην περίπτωση που αυτή δεν επαρκεί – έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη ψυκτικού, μειώνοντας έτσι τον συντελεστή απόδοσης. Συνήθως, όσον αφορά την οικονομική λειτουργία γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, η τιμή του  $COP$  χρειάζεται να ξεπερνά το 4, δηλαδή τουλάχιστον το 75% της ενέργειας να προέρχεται από το έδαφος.

Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του συντελεστή απόδοσης συμπίπτει με τη μέγιστη τιμή του κύκλου Carnot (απόδοση Carnot) τα όρια της οποίας είναι η απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας της πηγής  $T_C$  ( $T_1$ ) και της εξόδου  $T_H$  ( $T_2$ ) οπότε προκύπτει κατά τη θέρμανση:

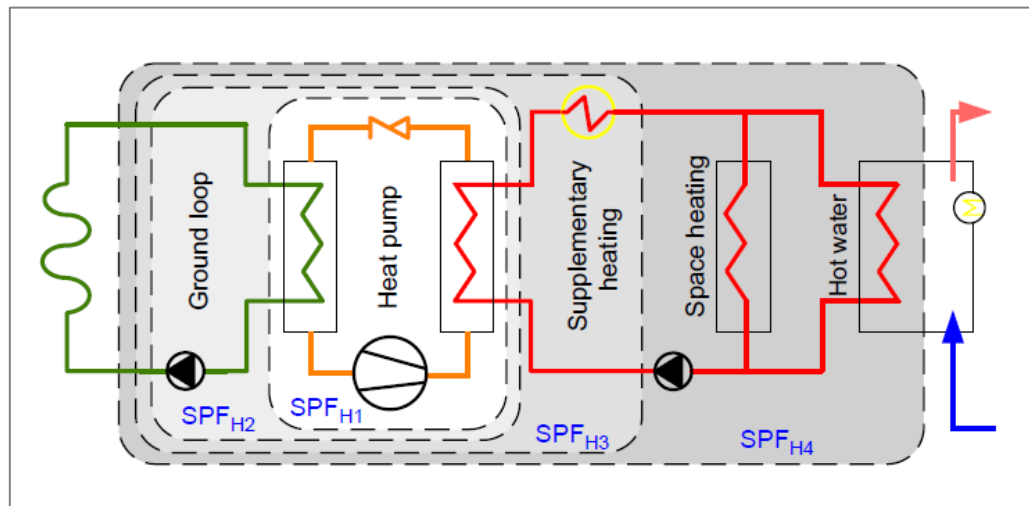
$$COP_{\max} = \frac{T_H}{(T_H - T_C)} \quad (2.2)$$

Υπό αυτήν την έννοια, προκύπτει το συμπέρασμα πως μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση του συστήματος αν η τιμή θερμοκρασίας πηγής και εξόδου έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους (Σχήμα 2.14). Γενικά η θερμοκρασία που μεταφέρεται στο δευτερεύον κύκλωμα δεν πρέπει να ξεπερνά τους 35 – 40°C και αντίστοιχα η τιμή της θερμοκρασίας του πρωτεύοντος κυκλώματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 5°C. Οι προϋποθέσεις είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές όταν επιλέγεται ως πηγή θερμότητας του εναλλάκτη το έδαφος, αφού λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητάς του, το εύρος των θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του έτους μεταβάλλεται λιγότερο συγκριτικά με τον αέρα (εναλλάκτης με πηγή τον αέρα).

Κατά τη λειτουργία ψύξης ο συντελεστής παίρνει τη μορφή του λόγου ενεργειακής απόδοσης *EER* (Energy Efficiency Ratio):

$$EER = \frac{Q_c}{W} \quad (2.3)$$

Οι παραπάνω μετρήσεις (*COP-EER*) αποσκοπούν στην εξέταση των προδιαγραφών της συσκευής της αντλίας μεμονωμένα. Στην πράξη, για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος στο σύνολό του, εξετάζονται οι ενεργειακές συνθήκες λειτουργίας τόσο της αντλίας, όσο και των σωληνών που κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο και χρησιμοποιείται μια εποχιακή μέτρηση που αντιπροσωπεύει την απόδοση όταν η αντλία θερμότητας αποτελεί μέρος του ευρύτερου συστήματος θέρμανσης – ψύξης. Η δυσκολία αξιολόγησης της περιπλοκότητας του συνολικού συστήματος αντιμετωπίστηκε με την ευρωπαϊκή έρευνα SEPEMO (Seasonal Performance factor and Monitoring for heat pump systems in the building sector), στην οποία δημοσιεύτηκε ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης *SPF* (Seasonal Performance Factor), ο οποίος αποτελεί τη μετρούμενη ετήσια απόδοση σε καθορισμένο πεδίο εφαρμογής. Το σύστημα που βασίζεται η έρευνα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.15. Οι συντελεστές ορίζονται από  $SPF_{H1}$  έως  $SPF_{H4}$  ανάλογα με τις συμπληρωματικές ηλεκτρικές παροχές. Ο συντελεστής  $SPF_{H1}$  περιλαμβάνει μόνο τον εξοπλισμό της αντλίας θερμότητας και ο  $SPF_{H2}$  τις σωληνώσεις του γεωεναλλάκτη. Επιπλέον, ο  $SPF_{H3}$  αναφέρεται σε οποιαδήποτε πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνοδεύει την αντλία και η  $SPF_{H4}$  πειραλαμβάνει το δίκτυο του δευτερεύοντος κυκλώματος.



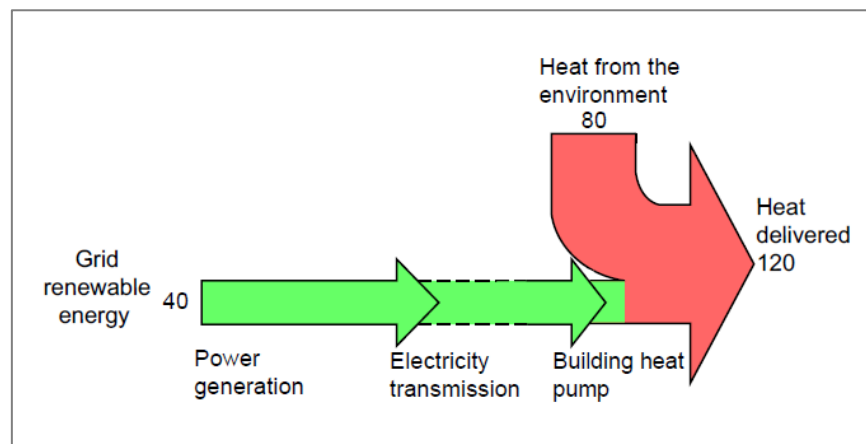
Σχήμα 2.15 Πεδίο εφαρμογής του εποχιακού συντελεστή απόδοσης  $SPF$  σύμφωνα με το SEPAMO. [31]

Για κάθε ενεργειακή διάταξη, ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης  $SPF_{Hi}$  ορίζεται ως ο λόγος της θερμότητας εξόδου  $Q_{Hi}$  προς τη θερμότητα της πηγής  $Q_{Ci}$ :

$$SPF_{Hi} = \frac{Q_{Hi}}{Q_{Ci}}, \quad i = 1,2,3,4 \quad (2.4)$$

Κατά τη λειτουργία τυπικών ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας η τιμή του  $SPF_{H1}$  κυμαίνεται από 3.8 – 4.3 με αύξηση 10% - 15% όταν χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές άμεσης εξάτμισης.

Γενικά η απόδοση των συστημάτων γεωθερμικής αντλίας θερμότητας παριστάνεται σε ένα διάγραμμα Sankey, κατά το οποίο απεικονίζεται ο ενεργειακός προϋπολογισμός ενός συστήματος με εσωτερικές και εξωτερικές ροές ενέργειας. (Σχήμα 2.16)



Σχήμα 2.16 Διάγραμμα Sankey. Γραφική αποτύπωση της ροής ενέργειας από την πηγή στην αντλία θερμότητας με υποθετική τιμή  $SPF_{H1}$  3. [31]

Ορίζονται και οι εποχιακοί δείκτες απόδοσης  $SCOP$  (Seasonal Coefficient of Performance) και  $SEER$  (Seasonal Energy Efficiency Ratio) που αποτελούν μοντελοποιημένη εκτίμηση της απόδοσης μιας ηλεκτροκίνητης αντλίας θερμότητας σε ένα δεδομένο κλίμα. Βασίζεται σε



εργαστηριακές μετρήσεις του συντελεστή απόδοσης  $COP - EER$  σε συνδυασμό με τα κλιματικά δεδομένα για μια δεδομένη τοποθεσία, μακροπρόθεσμα.

$$SCOP = \frac{\text{annual heating demand (kWh)}}{\text{annual electricity consumption for heating (kWh)}} \quad (2.5)$$

$$SEER = \frac{\text{annual cooling demand (kWh)}}{\text{annual electricity consumption for cooling (kWh)}} \quad (2.6)$$

### 3. Ανάλυση και σχεδιασμός ενεργειακών θεμελίων

Το ενεργειακό μοντέλο που πρόκειται να αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική συνιστάται από τη συνδυασμένη θεμελίωση (Combined Pile Raft Foundation – CPRF) ενός κτιρίου 9 ορόφων. Το έργο αυτό περιλαμβάνει ως στοιχείο βαθιάς θεμελίωσης ομάδα 42 πασσάλων, πακτωμένων σε ενιαίο κεφαλόδεσμο, ο οποίος έχει το ρόλο της επιφανειακής θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση). Η μελέτη της συνδυασμένης θεμελίωσης επικεντρώνεται στη λειτουργία ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με γεωεναλλάκτες τόσο τους πασσάλους, όσο και την πλάκα και εξετάζεται η μηχανική απόκριση της ενεργειακής πλέον συνδυασμένης θεμελίωσης κατά την επίδραση μηχανικών και θερμικών φορτίων. Το παρόν κεφάλαιο εξυπηρετεί την παρουσίαση του απαιτούμενου θεωρητικού υπόβαθρου για την ανάλυση και το σχεδιασμό ενεργειακών θεμελίων. Αργότερα περιγράφεται η σύνθεση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και τα αποτελέσματα αυτού.

#### 3.1. Θεωρητική προσέγγιση ανάλυσης

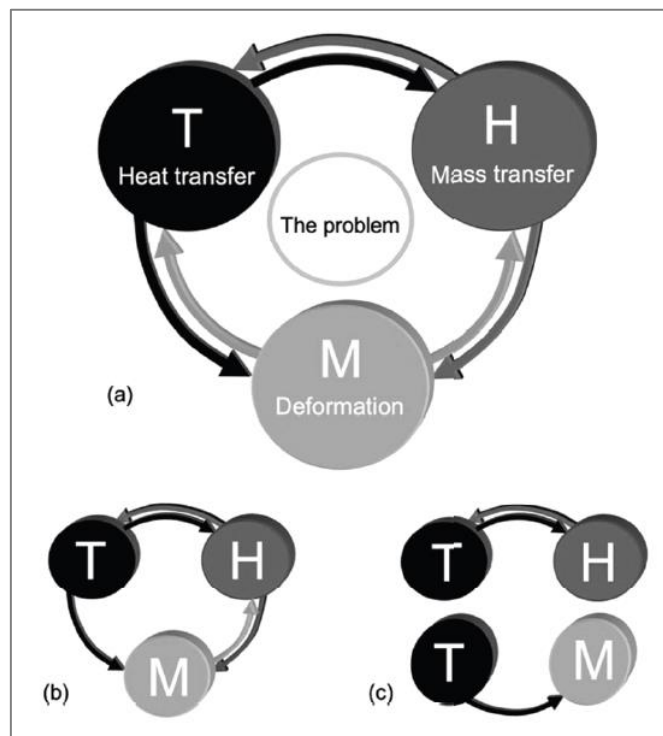
Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των ενεργειακών θεμελίων βασίζονται στη σωστή κατανόηση των επιμέρους φυσικών φαινομένων και των αντίστοιχων καταστατικών εξισώσεων, το σύνολο των οποίων περιγράφουν τη συμπεριφορά και την απόδοση της εξεταζόμενης τεχνολογίας. Τα φαινόμενα από τα οποία προκύπτει η ανάλυση των ενεργειακών θεμελίωσης είναι:

- μετάδοση της θερμότητας (διεπιφάνεια μεταξύ σωληνώσεων και ρευστού εντός αυτών, σωληνώσεων και γεωεναλλάκτη, καθώς και γεωεναλλάκτη - εδάφους)
- μετάδοση της μάζας (ρευστό που κυκλοφορεί στους σωλήνες)
- παραμόρφωση (επίδραση φορτίων στους γεωεναλλάκτες)

Η μετάδοση θερμότητας χαρακτηρίζει τη θερμική συμπεριφορά των υλικών και συνδέεται με την επίδραση θερμικών φορτίων. Αντίστοιχα, η μετάδοση μάζας χαρακτηρίζει την υδραυλική συμπεριφορά των υλικών και συνδέεται με την επίδραση υδραυλικών φορτίων. Ομοίως, η παραμόρφωση χαρακτηρίζει τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών και σχετίζεται με την ύπαρξη μηχανικών φορτίων.

Όλα τα παραπάνω φυσικά φαινόμενα είναι συζευγμένα μεταξύ τους, δηλαδή η μετάδοση θερμότητας μπορεί να προκαλέσει μετάδοση της μάζας και παραμόρφωση των υλικών, με

οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό των τριών φαινομένων να επαληθεύεται (Σχήμα 3.1 (a)). Σύνθετες αναλύσεις και σχεδιασμοί γεωθερμικών θεμελίων απευθύνονται σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των παραπάνω φαινομένων. Ωστόσο, για πρακτική διευκόλυνση σε τέτοιου είδους φυσικά προβλήματα - που εκ των πραγμάτων αποτελούν εξιδανίκευση της πραγματικότητας - μπορεί να γίνει απλοποίηση της υφιστάμενης ανάλυσης και να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα και σχεδιαστικοί υπολογισμοί. Μια τυπική προσέγγιση μοντελοποίησης του προβλήματος χαρακτηρίζεται από αμφίδρομη σχέση μεταξύ μετάδοσης μάζας με μετάδοση θερμότητας και αντίστοιχα μετάδοσης μάζας με παραμόρφωση, ενώ η μεταφορά θερμότητας μπορεί να επηρεάσει τη παραμόρφωση, με την αντίστροφη σχέση να μην ισχύει (Σχήμα 3.1 (b)). Μια απλούστερη προσέγγιση μοντελοποίησης αποτελεί ένα ζεύγος ξεχωριστών αναλύσεων που αφορούν αφενός την αμοιβαία επίδραση θερμικών και υδραυλικών φαινομένων και αφετέρου τη μονόδρομη επιρροή μεταξύ θερμικών και μηχανικών φαινομένων (Σχήμα 3.1 (c)).



Σχήμα 3.1 Εξιδανίκευση των συζεύξεων που αφορούν προβλήματα ενεργειακών θεμελίων: (a) Αυστηρή προσέγγιση. (b) Απλοποιημένη προσέγγιση. (c) Η πιο απλή προσέγγιση. [26]

Στην παρούσα διπλωματική το μοντέλο των γεωεναλλακτών προσεγγίζεται με την απλούστερη μέθοδο από τις παραπάνω και παρουσιάζεται το δεύτερο σκέλος της ανάλυσης, δίνοντας έμφαση στη μηχανική απόκριση (παραμόρφωση) της θεμελίωσης, επιβάλλοντας σε αυτήν και θερμικά φορτία, τα οποία μεταφράζονται ως μεταβολή θερμοκρασίας τόσο στους πασσάλους, όσο και στην πλάκα, χωρίς να γίνεται θερμοϋδραυλική διερεύνηση. Εξετάζεται έτσι, η

θερμομηχανική συμπεριφορά της συνδυασμένης θεμελίωσης και εξάγονται αποτελέσματα της μηχανικής απόκρισης της κατασκευής. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας, παρατίθενται παρακάτω οι βασικοί μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας στα πλαίσια των ενεργειακών θεμελιώσεων.

### 3.1.1. Διάδοση θερμότητας στο ενεργειακό σύστημα πασσάλων – κεφαλόδεσμου

Για την περιγραφή των μηχανισμών διάδοσης της θερμότητας γίνεται η παραδοχή του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου (ΑΣΟ), κατά τον οποίο αμελείται η ετερογένεια του υλικού και θεωρείται πως το μέσο είναι συνεχές και ομοιογενές. Επιπλέον γίνεται η παραδοχή ισότροπου υλικού (ίδιες ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις) τόσο για το έδαφος, όσο και για το σκυρόδεμα.

Η διάδοση θερμότητας ορίζεται ως το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο μεταφέρεται ενέργεια μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σωματιδίων ύλης που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Υπάρχουν τρεις τρόποι διάδοσης της θερμότητας: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η ανάλυση της διάδοσης της θερμότητας σχετίζεται άμεσα με τον προσδιορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας εντός του μέσου, το οποίο υπόκειται σε αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

#### Αγωγή (Conduction)

Ως αγωγή ορίζεται ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας με επαφή μεταξύ σωματιδίων ενός στερεού ή ενός ρευστού που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Σχετίζεται με το μηχανισμό διάχυσης της ενέργειας και το φαινόμενο είναι περισσότερο έντονο στα στερεά σώματα.

Η κίνηση των μορίων κατά το φαινόμενο της αγωγής μπορεί να εξηγηθεί μέσω ενός μέσου, το οποίο οριοθετείται από δύο επίπεδες επιφάνειες – τοιχώματα διαφορετικών θερμοκρασιών. Κατά τους νόμους της θερμοδυναμικής, η συνεχής σύγκρουση των μορίων προκαλεί μεταφορά ενέργειας από τις πιο ενεργητικές περιοχές του συστήματος (περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας) σε περιοχές λιγότερο ενεργητικές (περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας). Όπως έχει αναφερθεί και στην Παράγραφο 1.1, η εξίσωση του φαινομένου της αγωγής προκύπτει από το νόμο του Fourier και είναι (στο χώρο):

$$q_{\text{cond},i} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \hat{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{e}_z \right) \quad (3.1)$$

όπου

$q_{\text{cond},i}$ : πυκνότητα ροής θερμότητας με αγωγή [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

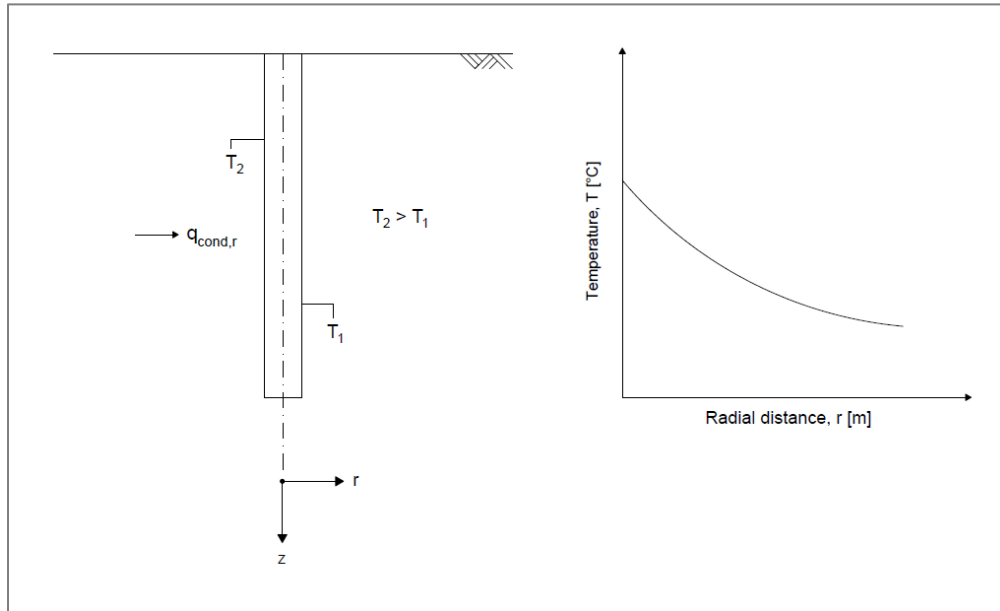
$\lambda$ : θερμική αγωγιμότητα του μέσου [ $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ ]

$\text{grad}T$ : θερμοβαθμίδα [ $\text{Km}^{-1}$ ]

$\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ : μοναδιαία διανύσματα στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

Η υπόθεση ομογενούς και ισότροπου μέσου δηλώνει πως η θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση και τη θέση και για το λόγο αυτό ο όρος της θερμικής αγωγιμότητας στην εξίσωση εμφανίζεται έξω από το όρισμα της θερμοκρασιακής κλίσης.

Η φυσική κατάσταση αυτή χαρακτηρίζει τους ενεργειακούς πασσάλους, λόγω της κυλινδρικής τους διατομής και όταν ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο είναι μικρός (Σχήμα 3.2).

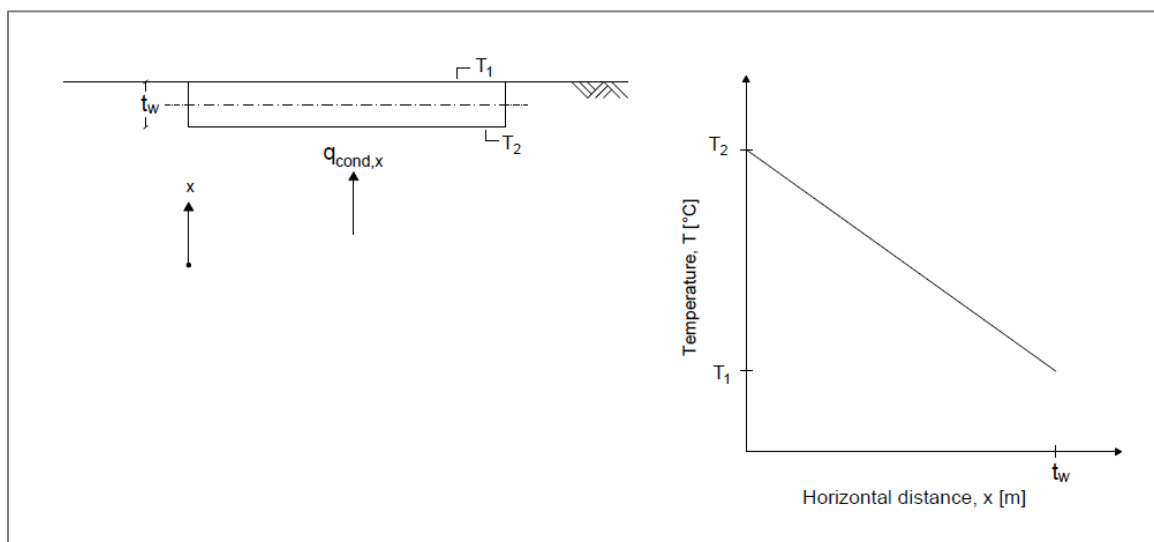


Σχήμα 3.2 Μετάδοση θερμότητας σε ενεργειακό πάσσαλο με αγωγή.

Η μαθηματική σχέση του Fourier απλοποιείται όταν η θερμοκρασιακή κλίση του συστήματος είναι σταθερή και κατά συνέπεια η διάδοση της θερμοκρασίας στο μέσο είναι πλέον γραμμική. Η εξίσωση γίνεται:

$$q_{conv,i} = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{t_w} \quad (3.2)$$

όπου



Σχήμα 3.3 Μετάδοση θερμότητας σε ενεργειακή πλάκα με αγωγή.

$T_1, T_2$ : οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων του μέσου ( $T_2 > T_1$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_w$ : το πάχος του μέσου [m]

$\lambda$ : θερμική αγωγιμότητα του μέσου [ $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ ]

Η φυσική κατάσταση αυτή χαρακτηρίζει την ενεργειακή πλάκα (και τον ενεργειακό πάσσαλο απλοποιητικά) (Σχήμα 3.3).

Συμπερασματικά λοιπόν, η μετάδοση της θερμότητας με μέσο τη θεμελίωση από σπλισμένο σκυρόδεμα είναι η αγωγή.

### Συναγωγή (Convection)

Ως συναγωγή ορίζεται ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας που χαρακτηρίζει τα ρευστά σε κίνηση. Σχετίζεται με την υπέρθεση δύο μηχανισμών, μεταφορά ενέργειας με διάχυση και με μαζική μεταφορά του ρευστού. Η συναγωγή μπορεί να είναι είτε ελεύθερη (οφείλεται σε διαφορά πυκνότητας του ρευστού λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς), είτε εξαναγκασμένη (οφείλεται σε εξωτερικά αίτια).

Η μαθηματική εξίσωση της συναγωγής προκύπτει από το νόμο του Νεύτωνα για την ψύξη:

$$q = h_c(T_s - T_{\infty}) \quad (3.3)$$

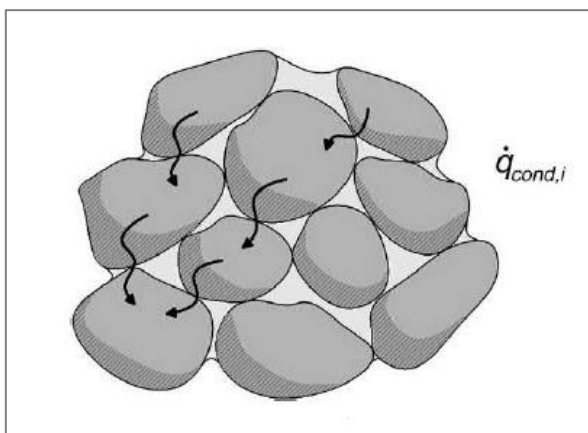
όπου

$h_c$ : συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή

$T_s$ : θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\infty}$ : θερμοκρασία του ρευστού [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Στην περίπτωση του μοντέλου ενεργειακής θεμελίωσης, το φαινόμενο της συναγωγής (εξαναγκασμένης) συναντάται στο ρευστό κατά την κίνησή του μέσα στους σωλήνες του γεωεναλλάκτη.



Σχήμα 3.4 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε εδαφικό υλικό. [24]

Η μετάδοση της θερμότητας σε εδαφικό υλικό γίνεται κυρίως με αγωγή, αλλά και με συναγωγή, αναλόγως τη σημασία της παρουσίας νερού στη διαδικασία της μεταφοράς θερμότητας. Στο μοντέλο που προσομοιώνεται για την παρούσα διπλωματική, το έδαφος αποτελείται από στιφρή άργιλο μεγάλης αντοχής, γεγονός που υποδηλώνει πως ο όγκος του εδαφικού σκελετού συγκριτικά με τον όγκο των κενών είναι αρκετά μεγαλύτερος. Επιλέγεται έτσι, η μετάδοση της θερμότητας να γίνεται μέσω του στερεού σκελετού των εδαφικών κόκκων με το φαινόμενο της αγωγής (Σχήμα 3.4).

### Ακτινοβολία (Radiation)

Ως ακτινοβολία ορίζεται η θερμότητα όλων των σωμάτων με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν. Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους τρόπους μετάδοσης της θερμότητας, η ακτινοβολία είναι αμελητέα σε μέσα διάδοσης θερμότητας (στερεό ή υγρό) και ενισχύεται στο αέριο μέσο (κενό).

#### 3.1.2. Παραμόρφωση ενεργειακού συστήματος πασσάλων – κεφαλόδεσμου

Ομοίως, για την περιγραφή του φαινομένου παραμόρφωσης των γεωεναλλακτών γίνεται η παραδοχή του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου (ΑΣΟ), κατά τον οποίο αμελείται η ετερογένεια του υλικού και θεωρείται πως το μέσο είναι συνεχές και ομογενές. Επιπλέον γίνεται η παραδοχή ισότροπου υλικού (ίδιες ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις) τόσο για το έδαφος, όσο και για το σκυρόδεμα. Για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος θεωρείται πως η θεμελίωση είναι ελαστοπλαστική και θερμοελαστική. Έτσι, τόσο η ομάδα πασσάλων όσο και ο κεφαλόδεσμος ακολουθούν ελαστική συμπεριφορά υπό την επιβολή μηχανικού και θερμικού φορτίου, χωρίς η καταπόνηση που δέχονται να ξεπερνά τη φέρουσα ικανότητά τους (όριο διαρροής). Υπό αυτές τις συνθήκες, η επιβολή μηχανικού ή θερμικού φορτίου προκαλεί παραμορφώσεις στον γεωεναλλάκτη, οι οποίες όμως με την αφαίρεση του φορτίου, ανακτώνται πλήρως. Επιπλέον, ισχύει πως η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι γραμμική και οι παραμορφώσεις πολύ μικρές, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή η καταπόνηση ενός συστήματος από μηχανικό και θερμικό φορτίο ισούται με το άθροισμα της καταπόνησης που θα προκαλούσε κάθε φορτίο μεμονωμένα.

Η παραμόρφωση ενός φορέα κατά τη μεταβολή θερμοκρασίας βασίζεται στην ανάπτυξη ενός εσωτερικού καταναγκασμού, με τη μεταβολή να είναι είτε ομοιόμορφη για κάθε σημείο του φορέα, είτε ανομοιόμορφη, δηλαδή μεταβολή θερμοκρασίας άνω και κάτω ίνας του φορέα.

Όπως παρουσιάστηκε και στα Σχήματα 3.2, 3.3 η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φορέα μπορεί να μεταβάλλεται είτε γραμμικά (κεφαλόδεσμος), είτε μη γραμμικά (πάσσαλος), με τη μεταβολή να μηδενίζεται στον άξονα του φορέα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καταστατικές σχέσεις της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, από τις οποίες προκύπτουν οι παραμορφώσεις των γεωεναλλακτών κατά την επίδραση θερμοκρασιακής μεταβολής.

Αθροίζοντας τις τροπές σε συνθήκες πολυαξονικής φόρτισης, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha \Delta T \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] + \alpha \Delta T \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha\Delta T \quad (3.6)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση φόρτισης με διατμητικές τάσεις, οι σχέσεις τάσεων – τροπών γράφονται ως:

$$\gamma_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G} \quad (3.7)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G} \quad (3.8)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{G} \quad (3.9)$$

Αντιστρέφοντας τις παραπάνω καταστατικές σχέσεις (σχέσεις τάσεων – τροπών) ως προς τις τάσεις:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{xx} + \nu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{yy} + \nu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz})] - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{zz} + \nu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})] - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (3.13)$$

$$\sigma_{yz} = G\gamma_{yz} \quad (3.14)$$

$$\sigma_{zx} = G\gamma_{zx} \quad (3.15)$$

Με συμβολισμό δεικτών οι παραπάνω σχέσεις γράφονται ως:

$$\varepsilon_{ij} = D_{ijkl}\sigma_{kl} + \alpha\Delta T\delta_{ij} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} - \frac{\alpha E \Delta T \delta_{ij}}{1-2\nu} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.17)$$

όπου

$$D_{ijkl} = \frac{1 + \nu}{2E} \left( -\frac{2\nu}{1 + \nu} \delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} \right) \quad (3.18)$$

$$C_{ijkl} = \frac{1 + \nu}{2(1 + \nu)} \left( \frac{2\nu}{1 - \nu} \delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} \right) \quad (3.19)$$

και  $\delta_{ij}$  το δέλτα του Kronecker που λαμβάνει τιμές

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \alpha\nu \ i = j \\ 0 & \alpha\nu \ i \neq j \end{cases} \quad (3.20)$$

Η προσομοίωση των ενεργειακών πασσάλων έγινε με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία. Η πρώτη προσπάθεια προσέγγισης μονοδιάστατου ενεργειακού μοντέλου έγινε από τους Laloui et al. (2003), κατά το οποίο ένας ενεργειακός πάσσαλος μπορεί να παραμορφωθεί ελεύθερα. Κατά την επίδραση ομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας χαρακτηρίζεται από μια θερμική τροπή ( $\varepsilon_f$ ) που συνδέεται γραμμικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ):

$$\varepsilon_f^{th} = -\alpha \Delta T \quad (3.21)$$

όπου

$\varepsilon_f^{th}$ : αξονική τροπή (ανηγμένη παραμόρφωση) λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής [αδιάστατο]

$\alpha$ : συντελεστής θερμικής γραμμικής διαστολής σκυροδέματος [ $1/^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T$ : θερμοκρασιακή μεταβολή που υπόκειται ο πάσσαλος [ $^\circ\text{C}$ ]

Η αξονική παραμόρφωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του μήκους του ενεργειακού πασσάλου κατά:

$$\Delta L = L' - L = -L \varepsilon_f^{th} = L \alpha \Delta T \quad (3.22)$$

όπου

$L'$ : το μήκος του πασσάλου μετά την εφαρμογή της μεταβολής θερμοκρασίας [m]

Κατά τη θέρμανσή του, ο ενεργειακός πάσσαλος τείνει να διαστέλεται (αύξηση μήκους), ενώ κατά την ψύξη συστέλεται κατά τον άξονά του (μείωση μήκους), προκαλώντας θερμικές τροπές και τάσεις.

Στην περίπτωση που ο ενεργειακός πάσσαλος δεν έχει ελευθερία κίνησης, ισχύει:

$$\varepsilon_b^{th} = -\varepsilon_f^{th} = \alpha \Delta T \quad (3.23)$$

Όμως η παραμόρφωση που παρατηρείται είναι μηδενική



$$\varepsilon_o^{th} = 0 \quad (3.24)$$

Γ'αυτό το λόγο αναπτύσσεται μια τάση λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής με τιμή:

$$\sigma_b^{th} = E e_b^{th} = E \alpha \Delta T \quad (3.25)$$

Στην πραγματικότητα, οι ενεργειακοί πάσσαλοι δεν παραμορφώνονται ελεύθερα, αφού εμποδίζονται τόσο από το έδαφος, όσο και από την ανωδομή. Έτσι, η παραμόρφωση που παρατηρείται είναι μικρότερη της παραμόρφωσης του ενεργειακού πασσάλου σε ελευθερία κίνησης:

$$\varepsilon_o^{th} \leq \varepsilon_f^{th} \quad (3.26)$$

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει πως μόνο ένα ποσοστό της παραμόρφωσης εμποδίζεται, το οποίο ισούται με:

$$\varepsilon_b^{th} = \varepsilon_o^{th} - \varepsilon_f^{th} \quad (3.27)$$

Η απόκριση λοιπόν, του ενεργειακού πασσάλου διέπεται από ένα συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας, ο οποίος ορίζεται ως:

$$DOF = \frac{\varepsilon_o^{th}}{\varepsilon_f^{th}} \quad (3.28)$$

όπου

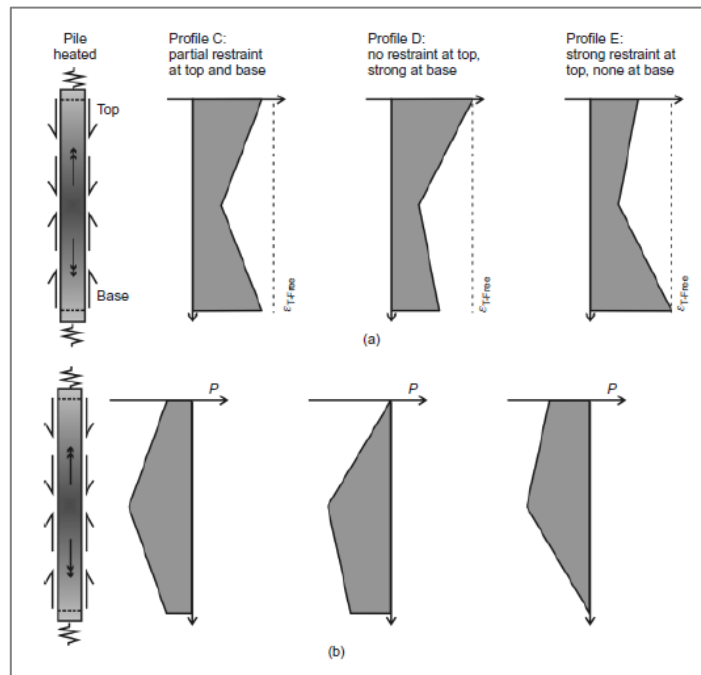
$DOF$ : βαθμός ελευθερίας πασσάλου ( $0 \leq DOF \leq 1$ )

Η παρεμπόδιση της εξέλιξης της παραμόρφωσης κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του ενεργειακού πασσάλου οδηγεί στην ανάπτυξη αξονικής τάσης, η οποία υπολογίζεται ως:

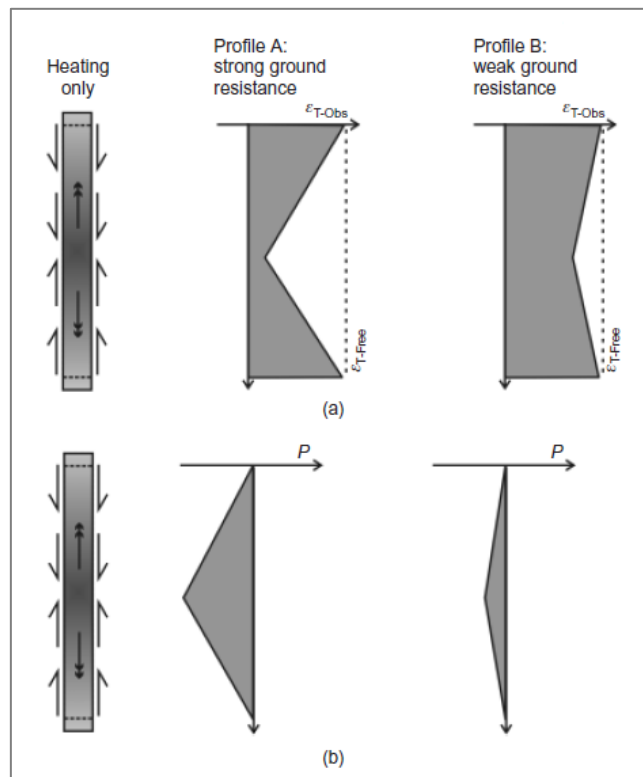
$$\sigma_o^{th} = E \varepsilon_b^{th} = E (\varepsilon_o^{th} - \varepsilon_f^{th}) = E (\varepsilon_o^{th} + \alpha \Delta T) = E \alpha \Delta T (1 - DOF) \quad (3.29)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την καταστατική σχέση γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας σε μία διάσταση.

Συμπερασματικά, όσο περισσότερο παρεμποδίζεται ο πάσσαλος από την παρουσία του περιβάλλοντος εδάφους και της ανωδομής, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που αναπτύσσεται λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς και ανάλογα μικρότερη η παραμόρφωση. (Σχήματα 3.5, 3.6)



**Σχήμα 3.5** Επίδραση θερμικής φόρτισης και περιβάλλοντος εδάφους στη συμπεριφορά του πασσάλου κατά τη θέρμανση χωρίς περιορισμό κίνησης. (α) προφίλ αξονικών θερμικών παραμορφώσεων. (β) προφίλ αξονικού θερμικού φορτίου. [1]



**Σχήμα 3.6** Επίδραση θερμικής φόρτισης και περιβάλλοντος εδάφους στη συμπεριφορά του πασσάλου κατά τη θέρμανση με περιορισμό κίνησης. (α) προφίλ αξονικών θερμικών παραμορφώσεων. (β) προφίλ αξονικού θερμικού φορτίου. [1]

Ομοίως προκύπτουν οι καταστατικές σχέσεις για τη διδιάστατη πλάκα, η οποία δέχεται παρεμπόδιση κινήσεων τόσο από το έδαφος και τους πασσάλους, όσο και από την ανωδομή.

Η αξονική παραμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του μήκους κάθε πλευράς της πλάκας κατά:

$$\Delta L_x = L'_x - L_x = -L_x \varepsilon_f^{th} = L_x a_x \Delta T \quad (3.30)$$

$$\Delta L_y = L'_y - L_y = -L_y \varepsilon_f^{th} = L_y a_y \Delta T \quad (3.31)$$

Επομένως η μεταβολή του εμβαδού προκύπτει:

$$\begin{aligned} \Delta A &= L'_x L'_y - L_x L_y = (L_x + \Delta L_x)(L_y + \Delta L_y) - L_x L_y \\ &= L_x \Delta L_y + L_y \Delta L_x + \Delta L_x \Delta L_y \end{aligned} \quad (3.32)$$

Το γινόμενο μεταβολής μήκους  $\Delta L_x \Delta L_y$  είναι πολύ μικρό, επομένως μπορεί να αγνοηθεί

$$\Delta A \approx L_x \Delta L_y + L_y \Delta L_x \quad (3.33)$$

Εφόσον η πλάκα θεωρείται ομοιογενής, ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι ίδιος και για τις δύο διαστάσεις:

$$\Delta A = L_x (a L_y \Delta T) + L_y (a L_x \Delta T) = 2a L_x L_y \Delta T \quad (3.34)$$

όπου

$\beta = 2a$ : συντελεστής θερμικής διαστολής επιφάνειας

Στην περίπτωση ανομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής  $\Delta T$  προκαλείται διαστολή της μίας ίνας και συστολή της άλλης, έχοντας ως αποτέλεσμα την καμπύλωση της γεωμετρίας της πλάκας για την οποία ισχύει:

$$K_{\Delta T} = \frac{\alpha \Delta T}{h} \quad (3.35)$$

όπου

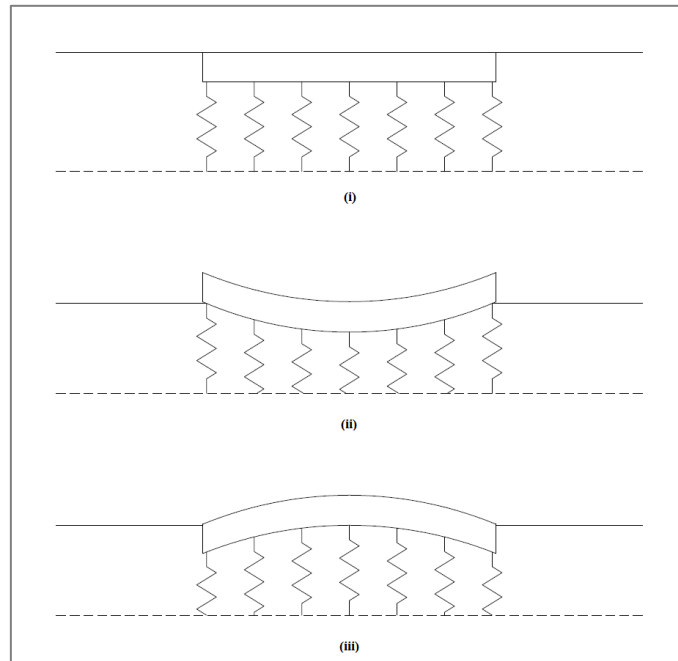
$h$ : το πάχος του της πλάκας

Και αντίστοιχα, για την ακτίνα της καμπυλότητας:

$$R_{\Delta T} = \frac{1}{K_{\Delta T}} \quad (3.36)$$

Για την περιγραφή του μηχανισμού κύρτωσης της ενεργειακής πλάκας, χρησιμοποιείται το μοντέλο Winkler για επιφανειακές θεμελιώσεις, κατά το οποίο απεικονίζεται η βύθιση της πλάκας αναλόγως την αντίσταση που δέχεται από το έδαφος. Η αντίσταση του εδάφους προσομοιώνεται με άπειρα ελατήρια. (Σχήμα 3.7 (i))

Κατά τη θέρμανση της πλάκας τους καλοκαιρινούς μήνες, η άνω ίνα του θεμελίου επιμηκύνεται περισσότερο από,τι η κάτω ίνα, με τα ελατήρια στις ακμές της πλάκας να την απωθούν. Κατ'αυτόν τον τρόπο, κυρτώνεται προς τα πάνω, με την άνω ίνα να βρίσκεται υπό θλίψη και την κάτω σε εφελκυσμό (Σχήμα 3.7 (ii)). Η αντίστροφη διαδικασία παρατηρείται κατά την ψύξη της ενεργειακής πλάκας τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 3.7 (iii)).



*Σχήμα 3.7 (i) Μοντέλο Winkler για ενεργειακή πλάκα. (ii) Κύρτωση ενεργειακής πλάκας κατά τη θέρμανση. (iii) Κύρτωση ενεργειακής πλάκας κατά την ψύξη.*

## 3.2. Μηχανική ανάλυση ενεργειακού μοντέλου

### 3.2.1. Αντίσταση εδάφους κάτω από την πλάκα

Η αντικατάσταση του εδάφους κάτω από την επιφάνεια της πλάκας γίνεται με τη χρήση κατακόρυφων ελατηρίων, τα οποία δηλώνουν την αντίσταση στη διδιάστατη καθίζηση (άμεση και στερεοποίησης) του υπεδάφους. Μέγιστη απόδοση έναντι καταπόνησης της συνδυασμένης θεμελίωσης συμβαίνει όταν η ομάδα πασσάλων παραλαμβάνει περίπου το 70% της συνολικής πραγματικής φόρτισης. Για το λόγο αυτό, οι καθιζήσεις της πλάκας θα μπορούσαν να υπολογιστούν για το 30% της αξονικής φόρτισης, όμως στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης παραλείπεται η αλληλεπίδραση των στοιχείων κατά τον αριθμητικό υπολογισμό των καθιζήσεων της πλάκας. Η τιμή που αναλογεί στην καθίζηση της πλάκας ως θεμελίου, δε λαμβάνει υπόψιν την αλληλεπίδραση με τους πασσάλους και άρα την παραλαβή αξονικού φορτίου και από τα δομικά στοιχεία των πασσάλων και για το λόγο αυτό, η δυσκαμψία που προκύπτει μειώνεται κατά 50%.

Η μεταβολή των κατακόρυφων ενεργών τάσεων σε τυχαίο σημείο  $i$  προκύπτει από την επαλληλία τεσσάρων φορτίσεων ορθογωνικής κάτοψης, στην κοινή γωνία των οποίων βρίσκεται το σημείο  $i$ . Στην πράξη, υπολογίζεται ο μειωτικός συντελεστής για κάθε ορθογωνική επιφάνεια  $I_n$  όπου  $n = 1,2,3,4$  ο οποίος εκφράζει το ποσοστό μείωσης της αρχικής φόρτισης αναλόγως το βάθος. Το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών πολλαπλασιασμένο με το καθαρό φορτίο της θεμελίωσης εκφράζει τη μεταβολή των κατακόρυφων ενεργών τάσεων στο επίπεδο, από όπου προκύπτει και η τελική κατακόρυφη ενεργός τάση και άρα οι καθιζήσεις στο σημείο αυτό.

$$\Delta\sigma_z = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)q_{\text{net}} \quad (3.37)$$

όπου

$I_1, I_2, I_3, I_4$ : μειωτικοί συντελεστές των επιμέρους ορθογωνικών επιφανειών αντίστοιχα  
 $q_{\text{net}}$ : καθαρό φορτίο κατασκευής (συμπεριλαμβάνεται και η εκσκαφή)

Κάνοντας χρήση της παραπάνω επαλληλίας και θεωρώντας πως η πλάκα είναι εύκαμπτη και το έδαφος ελαστικό και ισότροπο, υπολογίζονται οι άμεσες και οι καθιζήσεις στερεοποίησης για το αργιλικό υπέδαφος, αγνοώντας τις δευτερογενείς καθιζήσεις του υπεδάφους της θεμελίωσης.

- Άμεση καθίζηση

Για την εύρεση των άμεσων καθιζήσεων κάτω από ορθογωνική πλάκα χρησιμοποιείται η μέθοδος Steinbrenner με την τιμή της καθιζήσης να προκύπτει ως:

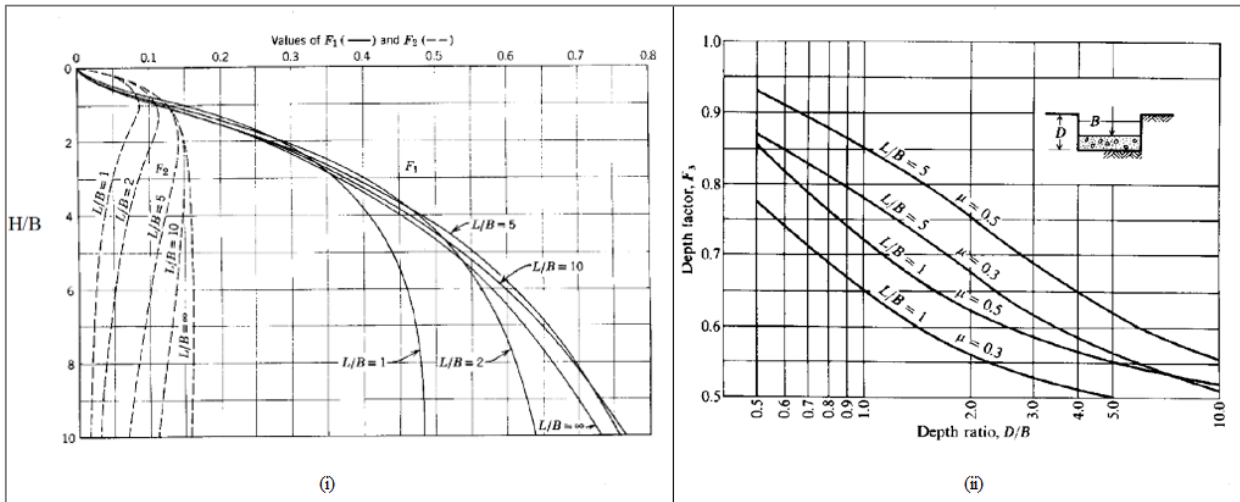
$$S_i = q_{\text{net}} B_i \frac{(1 - \nu^2)}{E} (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) F_3 \quad (3.38)$$

όπου οι μειωτικοί συντελεστές  $I_n$  δίνονται από τον τύπο:

$$I_n = F_1 + \frac{(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} F_2 \quad (3.39)$$

Οι συντελεστές  $F_1, F_2$  προκύπτουν από τους ανάλογους τύπους ή από πινακοποιημένες τιμές. Η τιμή του συντελεστή  $F_3$  προκύπτει μόνο από το αντίστοιχο διάγραμμα. Στην παρούσα εργασία, οι τιμές των συντελεστών προσεγγίζονται από τα κατάλληλα διαγράμματα που φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 3.8(i), (ii)).

Οι συντελεστές  $F_1, F_2$  εξαρτώνται από τους λόγους  $H/B$  και  $D/B$ , ενώ ο συντελεστής  $F_3$  είναι συνάρτηση των λόγων  $L/B$  και  $D/B$ . Για πολύ μικρές διορθώσεις ( $D/B < 0.5$ ), ο συντελεστής  $F_3$  παίρνει την τιμή 1.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα εύρεσης συντελεστών  $F_1$ ,  $F_2$  (i). Διάγραμμα εύρεσης συντελεστή  $F_3$  (ii).

- Καθίζηση στερεοποίησης

Για την εύρεση των καθιζήσεων στερεοποίησης της αργίλου κάτω από ορθογωνική πλάκα χρησιμοποιείται το διάγραμμα του Σχήματος 3.9.

Υποθέτοντας πως η άργιλος είναι κανονικά στερεοποιημένη ( $OCR = 1$ ), η τιμή της καθίζησης μέσω της δοκιμής οιδημέτρου προκύπτει ως:

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e} \log \left( \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (3.40)$$

ενώ για υπερστερεοποιημένες αργίλους,

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e} \log \left( \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}} \right) + \frac{C_r H}{1 + e} \log \left( \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (3.41)$$

όπου:

$C_c$ : δείκτης συμπίεσότητας εδάφους

$C_r$ : δείκτης διόγκωσης εδάφους

$H$ : πάχος εδαφικής στρώσης

$e$ : αρχικός λόγος κενών εδάφους

$\sigma'_{v0}$ : αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση (τάση πεδίου)

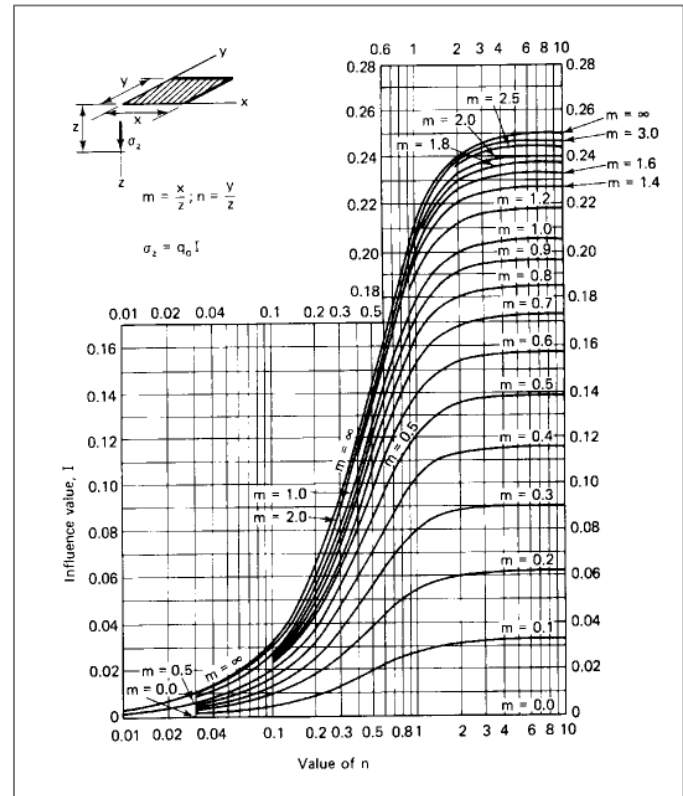
$\Delta\sigma_v$ : μεταβολή ενεργού κατακόρυφης τάσης

Στο Σχήμα 3.9 προσεγγίζεται ο μειωτικός συντελεστής  $I_n$  συναρτήσει των αδιάστατων συντεταγμένων:

$$m = \frac{x}{z} \text{ και } n = \frac{y}{z}$$

όπου

$$x = B_i \text{ και } y = L_i$$



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα εύρεσης μειωτικού συντελεστή  $I_n$  για επιβολή κατακόρυφου φορτίου σε ορθογωνική κάτοψη στην επιφάνεια ελαστικού, ισότροπου ημιχώρου.

Υπολογίζεται τελικά η τιμή των κατακόρυφων ελατηρίων κάτω από την επιφάνεια της πλάκας. Η δυσκαμψία του ελατηρίου προκύπτει από το λόγο του φορτίου προς τη συνολική καθίζηση:

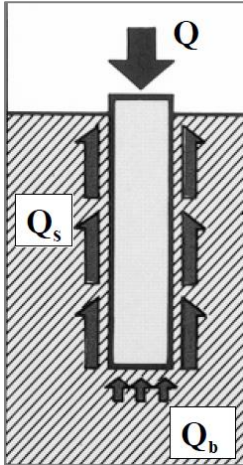
$$K = \frac{q_{\text{net}}}{S_{\text{tot}}} = \frac{q_{\text{net}}}{S_i + S_c} \quad (3.42)$$

Όπως προαναφέρθηκε, η τελική τιμή της δυσκαμψίας λόγω αλληλεπίδρασης του κεφαλόδεσμου με την ομάδα πασσάλων μειώνεται κατά 50%.

### 3.2.2. Αντίσταση εδάφους περιμετρικά των πασσάλων

Όσον αφορά τις αντιστάσεις του εδάφους περιμετρικά των πασσάλων και στην αιχμή τους, προσεγγίζονται με μη γραμμικά ελατήρια, η δυσκαμψία των οποίων μεταβάλλεται αναλόγως το βάθος.

- Κατακόρυφα ελατήρια



Επιβάλλοντας ένα αξονικό φορτίο, οι πάσσαλοι αποκτούν μια αντίσταση αιχμής  $Q_b$  στη βάση τους και μια αντίσταση τριβής  $Q_s$  κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους – πασσάλων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «ανάρτηση» του πασσάλου στο έδαφος, δηλαδή η δύναμη που επιβάλλεται μέσω του απαραμόρφωτου στοιχείου του πασσάλου μεταφέρεται στο έδαφος περιμετρικά και στην αιχμή, με την πλευρική αντίσταση να δραστηριοποιείται πολύ πιο σύντομα από αυτήν της αιχμής. (Σχήμα 3.10)

Σχήμα 3.10 Αντίσταση πασσάλου στην επίδραση αξονικού φορτίου  $Q$ . [41]

Για ένα θλιβόμενο πάσσαλο ισχύει:

$$Q = Q_s + Q_b \quad (3.43)$$

όπου

$Q_s$ : φορτίο που παραλαμβάνεται πλευρικά

$Q_b$ : φορτίο που παραλαμβάνεται από την αιχμή

Η πλευρική αντίσταση  $Q_s$  είναι μεταβλητή, με τη μεταβλητότητά της να χαρακτηρίζεται από τη μεταβλητή μοναδιαία τριβή για κάθε στρώση  $f_{si}$ . Δίνεται από τον τύπο:

$$Q_s = \int_0^L P f_s dz = \pi D \int_0^L f_s dz = \pi D \sum_i f_{si} \Delta z_i \quad (3.44)$$

όπου

$P$ : περίμετρος διατομής πασσάλου

$f_s$ : συντελεστής μοναδιαίας τριβής

Αντίστοιχα, η αντίσταση αιχμής προκύπτει από τη σχέση:

$$Q_b = A_b q_b \quad (3.45)$$

όπου

$A_b$ : εμβαδό αιχμής πασσάλου

$q_b$ : οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής

Τα κατακόρυφα ελατήρια των πασσάλων πρόκειται να υπολογιστούν με βάση τον κανονισμό DIN 4014 για μεμονωμένο πάσσαλο, θεωρώντας πως η ανάλυση του μεμονωμένου πασσάλου προσεγγίζει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα ανάλυσης ομάδας πασσάλων. Για τη χρήση του κανονισμού, γίνεται η παραδοχή πως ο πάσσαλος είναι απαραμόρφωτος κι έτσι δε λαμβάνεται



υπόψιν η μεταβλητότητα στην ανάπτυξη της μοναδιαίας τριβής που οφείλεται στη βράχυνση του πασσάλου. Ο κανονισμός αναφέρεται πλέον σε αντιστάσεις και όχι φορτία, οπότε ισχύει:

$$R = R_s + R_b \quad (3.46)$$

όπου

$R_s$ : αντίσταση τριβής

$R_b$ : αντίσταση αιχμής

Η πλήρης ανάπτυξη της αντίστασης αιχμής αντιστοιχεί σε καθίζηση 10%D, ενώ η ανάπτυξη της παράπλευρης αντίστασης προκύπτει από τον τύπο:

$$S_{rg} = 0.5R_s(MN) + 0.5 \quad (3.47)$$

με την πλήρη ενεργοποίηση της παράπλευρης αντίστασης να έχει ανώτατο όριο καθίζησης 3cm.

Κατά τον DIN4014, η αντοχή του εδάφους ταξινομείται σύμφωνα με τη χαρακτηριστική τιμή της αντοχής διείδυσης κώνου  $q_{ck}$  για μη συνεκτικά εδάφη (ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού διερχομένου από κόσκινο No.200 <15% και σύμφωνα με τη χαρακτηριστική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_{uk}$  από εργαστηριακές δοκιμές για τα συνεκτικά εδάφη (ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού διερχομένου από κόσκινο No.200 >15%). Οι τιμές των παραπάνω δύο μεγεθών συσχετίζονται με τις παραμέτρους  $q_{bk}$ ,  $q_{sk}$ , οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζονται από τους εμπειρικούς πίνακες του Σχήματος 3.11 και 3.12.

Για Ψαθυρά Εδάφη ( $q_{ck}$ )				
Δείκτης Καθίζησης S/D ή S/D <sub>f</sub>	Χαρακτηριστική Αντίσταση Αιχμής $q_{bk}$ (MPa) για Μέση Τιμή Αντίστασης Διείδυσης Κώνου $q_{ck}$ (MPa)			
	10	15	20	25
0.02	0.7	1.05	1.4	1.75
0.03	0.9	1.35	1.8	2.25
0.1 = S <sub>g</sub> (Οριακή)	2	3	3.5	4

Αντίσταση Αιχμής:  $R_{b(s)} = A_b \times q_{bk(s)}$   
με την πλήρη ανάπτυξή της να αντιστοιχεί σε καθίζηση  $S_g = 10\% \times D$

Αντοχή Μη Συνεκτικού Εδάφους όπως καθορίζεται από τη μέση τιμή Αντίστασης Διείδυσης Κώνου $q_{ck}$ (MPa)	Χαρακτηριστική Οριακή Πλευρική Τριβή $q_{sk}$ (MPa)
0	0
5	0.04
10	0.08
> 15	0.12

Αντίσταση Τριβής:  $R_{s(s)} = \pi \times D \times \Sigma(q_{sk(s)} \times L_i)$   
με την πλήρη ανάπτυξή της να αντιστοιχεί σε καθίζηση  $S_g = 0.5 \times R_s(MN) + 0.5 < 3$  cm όπου στα 3 cm ενεργοποιείται πλήρως η πλευρική τριβή

**Σχήμα 3.11** Εμπειρικοί πίνακες συσχετισμού  $q_{ck}$  με τις τιμές των  $q_{bk}$ ,  $q_{sk}$  κατά DIN4014 για ψαθυρά εδάφη.

Για Συνεκτικά Εδάφη ( $c_{uk}$ )		
Δείκτης Καθίζησης S/D ή S/D <sub>f</sub>	Χαρακτηριστική Αντίσταση Αιχμής $q_{bk}$ (MPa) για Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή $c_{uk}$ (MPa)	
	0.1	0.2
0.02	0.35	0.9
0.03	0.45	1.1
0.1 = S <sub>g</sub> (Οριακή)	0.8	1.5

Αντίσταση Αιχμής:  $R_{b(s)} = A_b \times q_{bk(s)}$   
με την πλήρη ανάπτυξή της να αντιστοιχεί σε καθίζηση  $S_g = 10\% \times D$

Αντοχή Μη Συνεκτικού Εδάφους όπως καθορίζεται από την Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή $c_{uk}$ (MPa)	Χαρακτηριστική Οριακή Πλευρική Τριβή $q_{sk}$ (MPa)
0.025	0.025
0.1	0.04
> 0.2	0.06

Αντίσταση Τριβής:  $R_{s(s)} = \pi \times D \times \Sigma(q_{sk(s)} \times L_i)$   
με την πλήρη ανάπτυξή της να αντιστοιχεί σε καθίζηση  $S_g = 0.5 \times R_s(MN) + 0.5 < 3$  cm όπου στα 3 cm ενεργοποιείται πλήρως η πλευρική τριβή

**Σχήμα 3.12** Εμπειρικοί πίνακες συσχετισμού  $c_{uk}$  με τις τιμές των  $q_{bk}$ ,  $q_{sk}$  κατά DIN4014 για συνεκτικά εδάφη.

Το επιτρεπόμενο φορτίο σχεδιασμού προκύπτει από τον κανονισμό DIN4014 και τον Ευρωκώδικα 7, με τις αντιστάσεις τριβής και αιχμής να διαιρούνται με τους επιμέρους συντελεστές  $\gamma_{SR}$  και  $\gamma_{bR}$  αντίστοιχα και γίνεται συνολική απομείωση με το συντελεστή προσομοίωσης  $\gamma_m$ .

$$R_{ud} = \frac{1}{\gamma_m} \left( \frac{1}{\gamma_{SR}} \pi D \sum_i f_{suk} L_i + \frac{1}{\gamma_{bR}} A_b q_{buk} \right) \quad (3.48)$$

Με τους συντελεστές να παίρνουν τις κατάλληλες τιμές του τρόπου ανάλυσης στην ελληνική επικράτεια (A1+M1+R2).

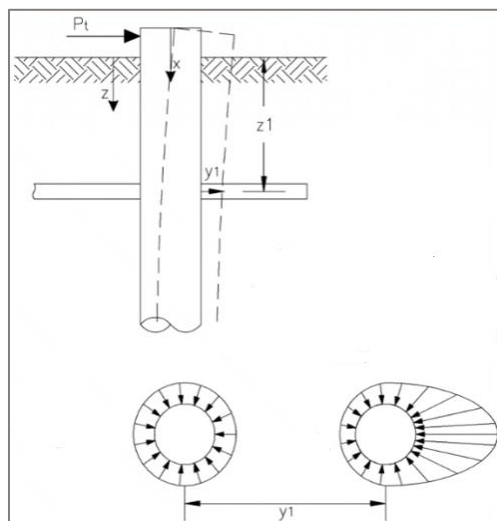
Σε περίπτωση πολυστρωματικού εδάφους η μεταβλητότητα της αντίστασης τριβής εκφράζεται με τον υπολογισμό της επιμέρους δυσκαμψίας κάθε εδαφικού στρώματος, γνωρίζοντας πως για συγκεκριμένη τιμή καθίζησης, οι επιμέρους δυσκαμψίες δίνουν τη συνολική που ήδη έχει υπολογιστεί.

Επομένως, η δυσκαμψία κάθε εδαφικής στρώσης προκύπτει αναλογικά ως εξής:

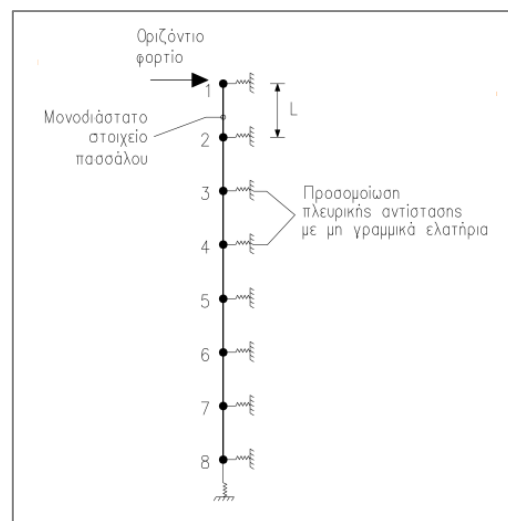
$$K_{vi} = \frac{R_{si} K_{v,tot}}{R_{s,tot}} \quad (3.49)$$

- **Οριζόντια ελατήρια**

Επιβάλλοντας ένα οριζόντιο φορτίο στο μεμονωμένο πάσσαλο, αυτός κινείται προς την κατεύθυνση του φορτίου με μετάθεση, εφόσον είναι πακτωμένος κι έτσι το έδαφος συμπιέζεται και αναπτύσσει μια αντίδραση (Σχήμα 3.13). Η αντίδραση του εδάφους αντικαθίσταται με οριζόντια ελατήρια τριβής και η απλούστερη μέθοδος προσομοίωσης της απόκρισης του εδάφους με οριζόντια φόρτιση είναι η μέθοδος καμπυλών  $p - y$  (Σχήμα 3.14).



**Σχήμα 3.13** Αντίδραση εδάφους κατά την μετακίνηση του πασσάλου, λόγω επιβολής οριζόντιας φόρτισης. [46]

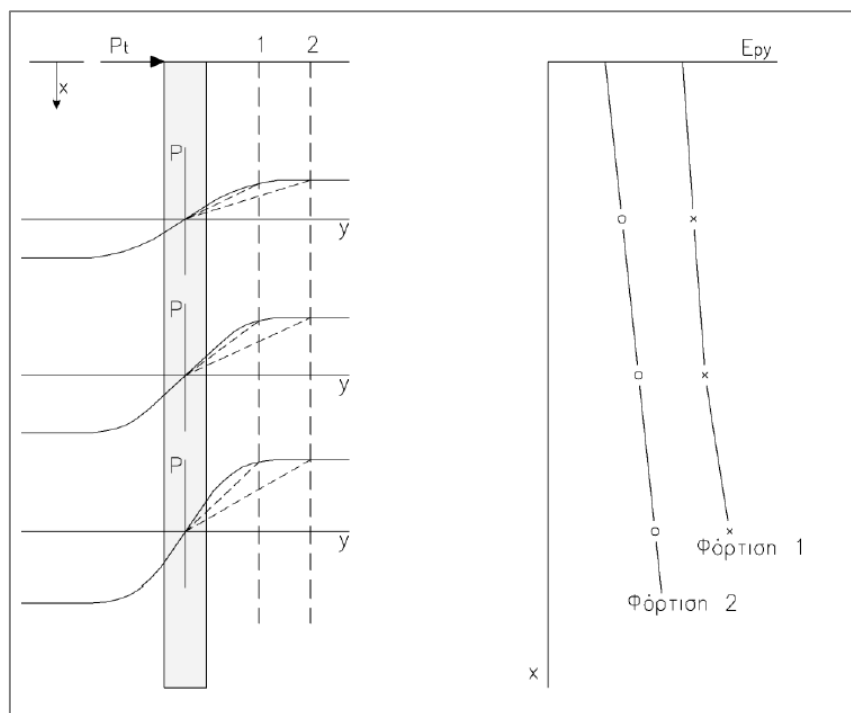


**Σχήμα 3.14** Προσομοίωση πλευρικής αντίστασης πασσάλου με μη γραμμικά ελατήρια. [46]

Η επίδραση οριζόντιας και κατακόρυφης πίεσης, δημιουργεί ροπή και ο πάσσαλος παραμορφώνεται γεωμετρικά (θεωρία 2<sup>ης</sup> τάξης).

Η μέθοδος  $p - y$  αποτυπώνει γραφικά τη σχέση της εδαφικής αντίδρασης  $p$  με την οριζόντια μετακίνηση  $y$  για ένα συγκεκριμένο εξεταζόμενο βάθος, με την καμπύλη απόκρισης να είναι μη γραμμική μέχρι το όριο διαρροής της αντίστασης του εδάφους.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, η καμπύλη  $p - y$  χωρίζεται σε πέντε γραμμικούς κλάδους και υπολογίζεται η δυσκαμψία κάθε τμήματος από την κλίση του. Αυξάνοντας το βάθος, αυξάνεται και η δυσκαμψία του εδάφους, ενώ όσο αυξάνεται η μετακίνηση η δυσκαμψία μειώνεται (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15 Καμπύλη απόκρισης εδάφους υπό οριζόντια φόρτιση  $p - y$  συναρτήσει του βάθους. [46]

Επιλέγεται η χρήση των καμπυλών  $p - y$  υπερβολικής μορφής, οι οποίες έχουν γενικότερη μορφή, καθώς αφορούν όλους τους τύπους εδάφους. Το αρχικό τμήμα της καμπύλης είναι γραμμικό και εξαρτάται εξ'ολοκλήρου από την αρχική δυσκαμψία του εδάφους, η οποία για αργιλικά εδάφη δίνεται από τον τύπο:

$$K_i = \frac{1.3E_i}{(1 - \nu^2)} \left( \frac{E_i D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (3.50)$$

ενώ για αμμώδη εδάφη,

$$K_i = E_i \left( \frac{z}{D} \right)^{0.2} \quad (3.51)$$

όπου

$E_i$ : αρχικό μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

$\nu$ : λόγος Poisson

$D$ : διάμετρος πασσάλου

$E_p$ : μέτρο ελαστικότητας πασσάλου

$I_p$ : ροπή αδράνειας πασσάλου

$z$ : βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

Η σχέση μεταξύ αντίστασης εδάφους  $p$  και οριζόντιας μετακίνησης  $y$  ισούται με:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K_i} + \frac{y}{p_{ult}}} \quad (3.52)$$

όπου

$K_i$ : αρχική δυσκαμψία της καμπύλης  $p - y$

$p_{ult}$ : μέγιστη πλευρική αντίσταση του εδάφους

Για αργιλικά εδάφη, η μέγιστη πλευρική αντίσταση του εδάφους είναι:

$$p_{ult} = N_p c_u D \quad (3.53)$$

όπου

$c_u$ : αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{po}) e^{-\lambda \left( \frac{z}{D} \right)} \quad (3.54)$$

όπου

$N_{pu}$ : μέγιστη τιμή του συντελεστή φέρουσας ικανότητας που αντιστοιχεί σε αστοχία διαρροής σε βάθος μεγαλύτερο από το κρίσιμο και δίνεται από τον τύπο

$$N_{pu} = \pi + 2\Delta + 2\cos\Delta + 4 \left( \cos \frac{\Delta}{2} + \sin \frac{\Delta}{2} \right) \quad (3.55)$$

όπου

$\Delta = \arcsin(a)$  σε ακτίνια

$N_{po}$ : τιμή του συντελεστή φέρουσας ικανότητας που αντιστοιχεί σε επιφανειακή αστοχία και ισχύει:

$$N_{po} = 2 + 1.5\alpha \quad (3.56)$$

και

$$\lambda = 0.55 - 1.5\alpha \quad (3.57)$$

όπου

$\alpha$ : συντελεστής συνάφειας στη διεπιφάνεια εδάφους – πασσάλου (επιλέγεται  $\alpha = 0$ : λεία διεπιφάνεια)

Ενώ για αμμώδη εδάφη, η μέγιστη πλευρική αντίσταση για βάθος μικρότερο από το κρίσιμο αντιστοιχεί σε αστοχία τύπου σφήνας και δίνεται από τον τύπο:

$$p_{st} = \gamma'z \left[ \frac{K_0 z \tan \varphi \sin \beta}{\tan(\beta - \varphi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \varphi)} (D + z \tan \beta \tan \alpha) + K_0 z \tan \beta (\tan \varphi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a D \right] \quad (3.58)$$

Για βάθος μεγαλύτερο από το κρίσιμο αντιστοιχεί σε διαρροή του εδάφους και ισούται με:

$$p_{sd} = K_a D \gamma'z (\tan^8 \beta - 1) + K_0 D \gamma'z \tan^4 \varphi \sin \beta \quad (3.59)$$

όπου

$\gamma'$ : ενεργό φαινόμενο βάρος εδάφους

$z$ : βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$K_0$ : συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας

$K_a$ : συντελεστής ενεργητικών ωθήσεων

$\varphi$ : γωνία τριβής του εδάφους

$D$ : διάμετρος του πασσάλου

$$\beta = 45 + \varphi/2$$

$$\alpha = \varphi/2$$

Το υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης είναι υπερβολικής μορφής και προσεγγίζει εφαπτομενικά τη μέγιστη πλευρική αντίσταση  $p_{ult}$ .

Εφαρμόζοντας την παραπάνω θεωρία των υπερβολικών καμπυλών  $p - \gamma$  υπολογίζεται η αρχική δυσκαμψία  $K_i$  και η μέγιστη πλευρική αντίσταση  $p_{ult}$  κάθε εδαφικής στρώσης. Προκύπτουν τα γραφήματα των καμπυλών με βήμα οριζόντιας μετακίνησης 1cm και όπως προαναφέρθηκε, η καμπύλη υποδιαιρείται σε πέντε γραμμικούς κλάδους, καθένας εκ των οποίων έχει διαφορετική δυσκαμψία. Ανάγεται έτσι το πρόβλημα από μη γραμμικό σε γραμμικό.

### 3.3. Σχεδιασμός ενεργειακού μοντέλου

Λόγω της απουσίας ενός ενοποιημένου πλαισίου για το θερμομηχανικό σχεδιασμό ενεργειακών θεμελίων, έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια διάφορες συστάσεις για την καθοδήγηση σχεδιασμού από ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γερμανία (VDI 4640, 2009), η Ελβετία (SIAD0190, 2005), το Ηνωμένο Βασίλειο (Ground Source Heat Pump Association, 2012) και η Γαλλία (CFMS-SYNTECSOFFONS-FNTP, 2017), με τη γαλλική σύσταση να ενσωματώνει και να επεκτείνει το μεγαλύτερο τμήμα γνωστικού πεδίου που περιλαμβάνεται στις προηγούμενες οδηγίες. Επιπλέον, μια άλλη προσέγγιση σχεδιασμού ενεργειακών θεμελίων είναι η προσαρμογή στον Ευρωκώδικα της μεταβολής της θερμοκρασίας ως αποτέλεσμα θερμικής φόρτισης, η οποία εκδηλώνεται ως κινητό φορτίο που κατευθύνεται και καταναίμεται στα δομικά στοιχεία και προκαλεί τη στατική παραμόρφωσή τους (variable, indirect, free and static action).

#### 3.3.1. Οριακές καταστάσεις αντοχής

Ακολουθώντας οποιαδήποτε από τις παραπάνω παραδοχές, ο σχεδιασμός προβλέπει τη συστηματική εξέταση δύο βασικών ζητημάτων:

- συμπεριφορά των δομικών στοιχείων κατά την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (φέρουσα ικανότητα θεμελίου) – Ultimate Limit State (ULS): επαρκές περιθώριο ασφαλείας έναντι αστοχίας.
- συμπεριφορά των δομικών στοιχείων κατά την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας – Serviceability Limit State (SLS): παραμορφώσεις εντός αποδεκτών ορίων, ώστε να διατηρείται η άνεση του κτιρίου.

Όπως έχει οριστεί και στην Παράγραφο 2.2., η φύση των θεμελίων – γεωεναλλακτών είναι διττή, συνδυάζοντας το ρόλο της δομικής υποστήριξης και του φορέα θερμικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, οι οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας χρειάζεται να εξεταστούν τόσο από θερμικής, όσο και από μηχανικής (γεωτεχνικής) πλευράς.

Όσον αφορά το θερμικό σχεδιασμό, κανένα από τα υπάρχοντα πρότυπα καθοδήγησης σχεδιασμού ενεργειακών θεμελίων δεν παρέχει ενδείξεις για το πως πρέπει να μετράται η θερμική απόδοση ενός λειτουργικού συστήματος και ποια κριτήρια αστοχίας κρίνονται ως κατάλληλα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, προτάθηκε [2] μια σειρά παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην αξιολόγηση απόδοσης του συστήματος και παρατίθενται στον πίνακα του Σχήματος 3.16.

<b>1 Energy delivered</b>	An EGS scheme will be designed to deliver a certain proportion of the overlying buildings heating and cooling requirements and if this is not achieved then it may be considered to have failed. The consequences of failure will be greatest when no backup system is available. A suggested recommended approach would be to consider a 10% margin between required and expected energy supply as a starting value and then to revise it on a project-by-project basis depending on the specific conditions that occur.
<b>2 Efficiency of system</b>	The seasonal performance factor (SPF) gives the measured efficiency of an installed heatpump system. It is the ratio of the heat delivered for space heating and hot water and the electricity used to run the system. Under the EU Renewable Energy Sources Directive, heatpumps are considered renewable if their SPF is greater than 2.5. This could also be a convenient measure of acceptable serviceability performance of EGS.
<b>3 System temperatures</b>	More work is required to establish guidance on operational temperature limits for EGS. Current practice tends to recommend that the lower limit on the heat transfer fluid temperature in BHE&EGS should be kept above freezing with a 2 °C margin of error. This is to ensure the ground does not freeze. It has been shown both theoretically and in practice, that for large diameter piles, temperatures lower than 0 °C can be sustained within the heat transfer fluid for short periods and have no detrimental effects on the ground. Due to the impact of high temperatures on pump efficiency and thus SPF, the circulating fluid is usually kept below 40 °C, although values as high as 60 °C are used.
<b>4 Environmental</b>	The development of SGE and EGS systems in the future will increasingly need to consider interactions with adjacent systems and/or the potential for heat to propagate outside site boundaries and thus, compromise future developments. Currently, there is no guidance or regulation relating to this issue.

Σχήμα 3.16 Θερμικά κριτήρια απόδοσης των ενεργειακών θεμελίων.

Ως προς το μηχανικό σχεδιασμό, η επίδραση θερμοκρασιακών μεταβολών προκαλεί πρόσθετες παραμορφώσεις στο σύστημα των ενεργειακών θεμελίων – όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.1.2. – οι οποίες εκφράζονται είτε τη συστολή και διαστολή των δομικών στοιχείων, είτε με την ανάπτυξη εσωτερικών εντάσεων. Στην απόκριση αυτή υπάρχουν όρια, τα οποία δίνονται στον πίνακα του Σχήματος 3.17.

<b>1 Deformations</b>	Field observation of pile thermal expansion and contraction gave measured pilehead movement in the range of 40% to 60% of the theoretical maximum values, i.e. that of a free-standing column. As a serviceability issue, this is only likely to require specific consideration if either very long piles are to be used, and/or large temperature changes are likely to be imposed. Limiting criteria for assessing the acceptability of such movements would have to be defined on a case-by-case basis, as is generally the case for structural movement limits currently.
<b>2 Overstress</b>	Field observations of the internal stress changes in PHE suggest values between 50% and 100% of the theoretical value for a perfectly restrained column may occur. Such stress changes could lead to the compressive stress in a pile exceeding the maximum value allowed in some design codes. Tensile forces have also been observed during cooling; in many design codes, the tensile strength of concrete is often ignored and thus, tensile reinforcement would be required. In addition, stress variations in reinforced concrete geostructures can induce cracking phenomena that may reduce concrete durability and this effect is often countered by the addition of extra reinforcing steel. While failure is unlikely, consideration of internal stress changes is required to ensure an adequate margin is maintained between the expected stresses in the EGS and the ultimate resistance of the constituent material.
<b>3 Resistance</b>	Strength and volume change characteristics of the ground may be altered due to temperature change, and cyclic expansion and contraction may lead to further alterations in the available resistance and stiffness. In some soil conditions, it will be necessary to verify, by means of specific tests, how the mechanical properties of the ground may vary with temperature change. Experience from offshore pile installations suggests that when initial static loading represents a large proportion of the available pile resistance, cyclic loading effects can have an important influence on stability. Until application specific guidance is developed for PHE, this experience can be used as an indicator of the need for consideration of cyclic thermal loading effects. This issue requires further investigation to provide complete understanding of the actual risk and how this should be accommodated in design.

Σχήμα 3.17 Μηχανικά κριτήρια απόδοσης των ενεργειακών θεμελίων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο σχεδιασμός της ενεργειακής συνδυασμένης θεμελίωσης ακολουθεί το σκεπτικό του κλασσικού σχεδιασμού πασσάλων ως βαθιά θεμελίωση και γενικής κοιτόστρωσης ως επιφανειακή θεμελίωση.

#### Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ULS)

Κριτήρια έναντι θραύσης κοιτόστρωσης (επιφανειακής θεμελίωσης):

- Έλεγχος σε ολίσθηση (αντίσταση σε οριζόντια φόρτιση). Θεωρείται ότι η αντίσταση έναντι σε ολίσθηση εκδηλώνεται πλήρως με την ανάπτυξη μετακίνησης στη διεπιφάνεια πλάκας – εδάφους της τάξης των 5 έως 10 mm.
- Έλεγχος εκκεντρότητας
- Έλεγχος σε κάμψη (δομητικός σχεδιασμός)
- Έλεγχος σε διάτμηση (δομητικός σχεδιασμός)
- Έλεγχος σε διάτρηση (δομητικός σχεδιασμός)

Κριτήρια έναντι θραύσης πασσάλων (βαθιάς θεμελίωσης):

- Έλεγχος έναντι υπέρβασης της αξονικής φέρουσας ικανότητας
- Έλεγχος έναντι υπέρβασης των αποδεκτών καθιζήσεων
- Έλεγχος έναντι υπέρβασης της αντοχής του πασσάλου (ως δομικού στοιχείου)
- Έλεγχος έναντι υπέρβασης της εγκάρσιας φέρουσας ικανότητας και των αποδεκτών εγκάρσιων μετακινήσεων

#### Οριακή Κατάσταση Λειτουργίας (SLS)

- Έλεγχος έναντι επιτρεπόμενων καθιζήσεων
- Ο έλεγχος λειτουργικότητας επικεντρώνεται στον υπολογισμό των καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών) που προκαλούν τα επιβαλλόμενα φορτία στη συμμόρφωσή τους με τα αποδεκτά όρια της ανωδομής.
- Έλεγχος σε ανύψωση (για διογκούμενα εδάφη)
- Έλεγχος έναντι στη ρηγμάτωση (λειτουργική), παραμόρφωση ή δόνηση.

### 3.3.2. Συνδυασμοί φορτίσεων

Οι συνδυασμοί φορτίσεων ακολουθούν τον Ευρωκώδικα EN 1990 (Basics of structural design).

Για οριακή κατάσταση αστοχίας ULS γίνεται ευρεία χρήση του παρακάτω γενικού τύπου:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,I} Q_{k,I} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.60)$$

όπου για τις οριακές καταστάσεις STR (εσωτερική αστοχία ή υπερβολική παραμόρφωση του δομικού στοιχείου – αντοχή δομικών υλικών) και GEO (αστοχία ή υπερβολική παραμόρφωση του εδάφους – αντίσταση εδάφους) παίρνει τη μορφή:



$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{array} \right. \quad (3.61)$$

Με τους συντελεστές  $\psi$  να βρίσκονται στους Ευρωκώδικες EN 1990 και EN 1997-1 και τους μερικούς συντελεστές  $\gamma$  στους Ευρωκώδικες EN 1992, EN 1999.

Persistent and transient design situations	Permanent actions		Leading variable action	Accompanying variable actions (*)		Persistent and transient design situations	Permanent actions		Leading variable action (*)	Accompanying variable actions (*)	
	Unfavourable	Favourable		Main (if any)	Others		Unfavourable	Favourable		Action	Main
(Eq. 6.10)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	(Eq. 6.10a)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$		$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
						(Eq. 6.10b)	$\xi_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(\*) Variable actions are those considered in Table A1.1

NOTE 1 The choice between 6.10, or 6.10a and 6.10b will be in the National annex. In case of 6.10a and 6.10b, the National annex may in addition modify 6.10a to include permanent actions only.

NOTE 2 The  $\gamma$  and  $\xi$  values may be set by the National annex. The following values for  $\gamma$  and  $\xi$  are recommended when using expressions 6.10, or 6.10a and 6.10b.

$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$   
 $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$   
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$  where unfavourable (0 where favourable)  
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$  where unfavourable (0 where favourable)  
 $\xi = 0,85$  (so that  $\xi \gamma_{G,j,sup} = 0,85 \times 1,35 \cong 1,15$ ).  
 See also EN 1991 to EN 1999 for  $\gamma$  values to be used for imposed deformations.

NOTE 3 The characteristic values of all permanent actions from one source are multiplied by  $\gamma_{G,sup}$  if the total resulting action effect is unfavourable and  $\gamma_{G,inf}$  if the total resulting action effect is favourable. For example, all actions originating from the self weight of the structure may be considered as coming from one source; this also applies if different materials are involved.

NOTE 4 For particular verifications, the values for  $\gamma_G$  and  $\gamma_Q$  may be subdivided into  $\gamma_G$  and  $\gamma_Q$  and the model uncertainty factor  $\gamma_{\phi}$ . A value of  $\gamma_{\phi}$  in the range 1,05 to 1,15 can be used in most common cases and can be modified in the National annex.

Σχήμα 3.18 Πίνακας A1.2(B) Ευρωκώδικα EN 1990 για τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού ULS (STR/GEO). [13]

Για οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS) ισχύουν κατά τον Ευρωκώδικα οι παρακάτω συνδυασμοί φορτίσεων.

1) Χαρακτηριστικός συνδυασμός (Characteristic combination):

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.62)$$

Ο συνδυασμός αυτός συνήθως χρησιμοποιείται για μη αναστρέψιμες καταστάσεις αστοχίας

2) Συχνός συνδυασμός (Frequent combination):

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.63)$$

Ο συνδυασμός αυτός συνήθως χρησιμοποιείται για αναστρέψιμες καταστάσεις αστοχίας

3) Οικονομική – μόνιμος συνδυασμός (Quasi – permanent combination):

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.64)$$

Ο συνδυασμός αυτός συνήθως χρησιμοποιείται για μακροπρόθεσμες εντατικές καταστάσεις και για την εμφάνιση της κατασκευής.

Action	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1-1)			
Category A : domestic, residential areas	0,7	0,5	0,3
Category B : office areas	0,7	0,5	0,3
Category C : congregation areas	0,7	0,7	0,6
Category D : shopping areas	0,7	0,7	0,6
Category E : storage areas	1,0	0,9	0,8
Category F : traffic area, vehicle weight $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Category G : traffic area, $30\text{kN} < \text{vehicle weight} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Category H : roofs	0	0	0
Snow loads on buildings (see EN 1991-1-3)*			
Finland, Iceland, Norway, Sweden	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H > 1000$ m a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H \leq 1000$ m a.s.l.	0,50	0,20	0
Wind loads on buildings (see EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperature (non-fire) in buildings (see EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NOTE The $\psi$ values may be set by the National annex.			
* For countries not mentioned below, see relevant local conditions.			

Σχήμα 3.19 Πίνακας A1.1 Ευρωκώδικα EN 1990 για τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού SLS. [13]

#### 4. Αρχές προσομοίωσης – Αριθμητικές επιλύσεις

Η μηχανική ανάλυση και ο σχεδιασμός του ενεργειακού μοντέλου της συνδυασμένης θεμελίωσης έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του SOFiSTiK με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πριν την περιγραφή αφενός του αντικειμένου προσομοίωσης και αφετέρου της αριθμητικής ανάλυσης που ακολουθήθηκε, κρίνεται αναγκαία η αρίθμηση των παραδοχών που πραγματοποιήθηκαν και η επισήμανση της ανάλογης θεωρίας, όπου αυτή περιγράφεται.

##### 4.1. Παραδοχές ανάλυσης

- i. Θερμοελαστική συμπεριφορά υλικού (σκυροδέματος) στα στοιχεία κοιτόστρωσης και πασσάλων (Παράγραφος 3.1.2.)
- ii. Τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά εδάφους
- iii. Κριτήριο αστοχίας εδάφους κατά Mohr – Coulomb

- iv. Θερμική μόνωση κοιτόστρωσης από την πλευρά του αέρα – αδιαβατικές συνθήκες (Παράγραφος 2.2.)
- v. Τα ελατήρια προσομοίωσης των αντιστάσεων του εδάφους χαρακτηρίζονται από ελαστοπλαστική συμπεριφορά με ανισότροπο υλικό (Παράγραφος 3.2.)
- vi. Αγνοείται η συνέχεια του εδάφους
- vii. Αγνοείται η μεταβολή του όγκου του εδάφους κατά την επίδραση θερμικών φορτίων
- viii. Δε λαμβάνονται υπόψιν οι διαδικασίες μεταφοράς της θερμότητας (για λόγους πληρότητας περιγράφονται στην Παράγραφο 3.1.1.)
- ix. Η αντίσταση στη διεπιφάνεια των πασσάλων θεωρείται αναλλοίωτη και σταθερή από του κύκλους θέρμανσης και φόρτισης
- x. Αγνοείται η λειτουργία ομάδας πασσάλων
- xi. Σε κάθε όροφο τηρείται το φαινόμενο της διαφραγματικής λειτουργίας (βλ. Παράγραφο 5.3)

#### 4.2. Πρόγραμμα SOFiSTik

Το SOFiSTik είναι ένα κατασκευαστικό πρόγραμμα ανάλυσης και σχεδιασμού με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο βασίζεται στον αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό (object-oriented programming). Έχει τη δυνατότητα μη γραμμικής στατικής ανάλυσης σε ελαφριές ή μη κατασκευές, στο σχεδιασμό γεφυρών, στα γεωτεχνικά ζητήματα και στην κατασκευή σηράγγων, επιτρέποντας τη διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων. Επιπλέον, παρέχει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων δυναμικής ανάλυσης, με τη δυνατότητα της υπολογιστικής δυναμικής ρευστών. Για τις ανάγκες γραφικού σχεδιασμού (Pre-processing) είναι δυνατή η εισαγωγή αρχείων από σχεδιαστικά προγράμματα (AutoCAD, Revit), ενώ το ίδιο παρέχει γραφήματα των αποτελεσμάτων ανάλυσης, σχεδιασμού και διαστασιολόγησης (Post-processing).

#### 4.3. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Αποτελεί προσεγγιστική αριθμητική μέθοδο επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων (προβλήματα συνοριακών και αρχικών τιμών) και είναι ευρέως διαδεδομένη στην επίλυση προβλημάτων μηχανικής των κατασκευών (Structural mechanics) και στη μετάδοση θερμότητας ρευστών. Συνίσταται από:

- τη δημιουργία του αριθμητικού προσομοιώματος του φυσικού προβλήματος.  
Πρόκειται για προσεγγιστικό προσομοίωμα, καθώς γίνεται μια σειρά παραδοχών: το υλικό του σώματος παρουσιάζει γραμμική και ελαστική συμπεριφορά, καθώς και μικρές παραμορφώσεις (μετατοπίσεις – στροφές). Επίσης, δηλώνεται αυθαίρετα η μορφή της συνάρτησης (απλή πολυωνυμική) που εκφράζει την κατανομή των μετατοπίσεων του φορέα σε ένα σύστημα συντεταγμένων.
- τη διακριτοποίηση των σωμάτων που το αποτελούν.  
Η μετατροπή του συνεχούς προβλήματος σε διακριτό υλοποιείται χωρίζοντας τον φορέα σε υποκομμάτια, τα οποία ονομάζονται στοιχεία (elements). Τα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους με σημεία, τους λεγόμενους κόμβους (nodes). Με την παραδοχή της

συνάρτησης κατανομής μετατοπίσεων που αναφέρθηκε παραπάνω στο εσωτερικό του στοιχείου, υπολογίζεται το μέγεθος των μετατοπίσεων. Ως εκτούτου, η εκ των προτέρων γνώση της κατανομής των μετατοπίσεων εντός του στοιχείου συνεπάγεται τη δυνατότητα έκφρασής της ως προς τις επικόμβιες άγνωστες συντεταγμένες των κόμβων του στοιχείου (interpolation). Έτσι, ενώ στο αρχικό πρόβλημα συνοριακών τιμών που έπρεπε να λυθεί αναζητούνταν μια άγνωστη συνεχής συνάρτηση (πεδίο μετατοπίσεων), με την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αναζητούνται πρακτικά οι άγνωστες τιμές των μετατοπίσεων μόνο στους κόμβους.

- την αριθμητική επίλυση του αλγεβρικού γραμμικού συστήματος εξισώσεων. Πλέον, είναι δυνατή η αλγεβρική επίλυση του διακριτού συστήματος, υπολογίζοντας τις μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων μέσω της σχέσης παρεμβολής (interpolation) που περιγράφηκε παραπάνω και ακολούθως τις τάσεις και παραμορφώσεις μέσω των κινηματικών και καταστατικών εξισώσεων.

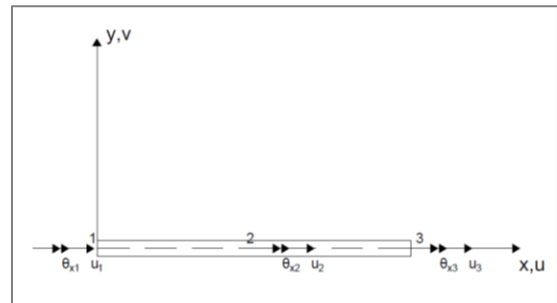
Οι βασικότεροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και το σχεδιασμό στη μηχανική των κατασκευών παρουσιάζονται παρακάτω.

- Γραμμικά στοιχεία (1D elements)

Πιο συνηθισμένα μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία είναι τα στοιχεία δικτυώματος (truss elements), τα οποία αποτελούνται από 2 κόμβους, ο καθένας εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από 1 βαθμό ελευθερίας (μετατόπισης), καθώς και τα στοιχεία δοκού (beam elements) τα οποία αποτελούνται από 3 κόμβους, ο καθένας εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από 2 βαθμούς ελευθερίας (μετατόπισης και στροφής).



Σχήμα 4.1 Γραμμικό στοιχείο (στοιχείο ράβδου).

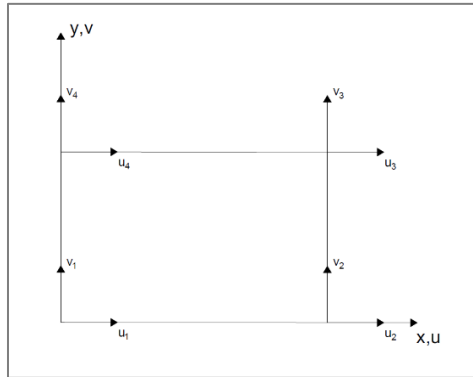


Σχήμα 4.2 Γραμμικό στοιχείο (στοιχείο δοκού).

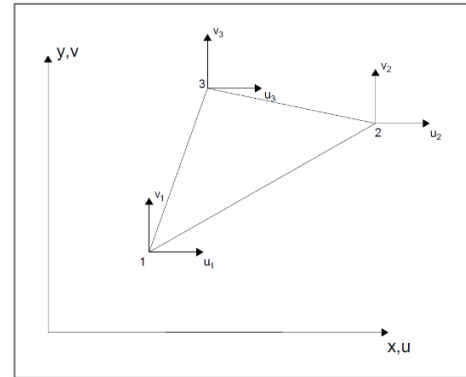
- Επιφανειακά στοιχεία (2D elements)

Πιο συνηθισμένα διδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία είναι τα τετρακομβικά στοιχεία (Quadrilateral elements) και τα τριγωνικά (triangular elements) τα οποία αποτελούνται από 4 και 3 κόμβους αντίστοιχα, καθένας εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από 2 βαθμούς ελευθερίας (μετατόπισης) και είναι στοιχεία επίπεδης έντασης / παραμόρφωσης. Επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως τα ορθογωνικά στοιχεία πλάκας – κάμψης (flat plate elements), τα οποία αποτελούνται από 4 κόμβους, καθένας εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από 3 βαθμούς ελευθερίας (1 μετατόπισης, 2 στροφής). Από την

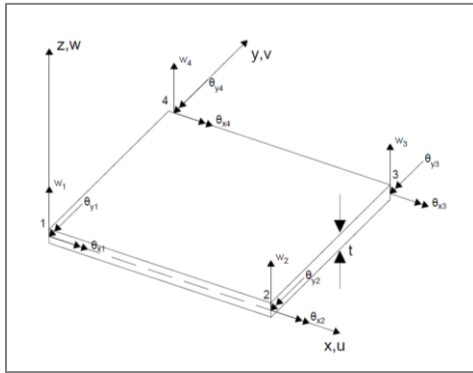
υπέρθεση των τετρακομβικών και των ορθογωνικών στοιχείων πλάκας προκύπτουν τα στοιχεία κελύφους (shell elements), τα οποία αποτελούνται από 4 κόμβους, καθένας εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από 5 βαθμούς ελευθερίας (3 μετατόπισης, 2 στροφής).



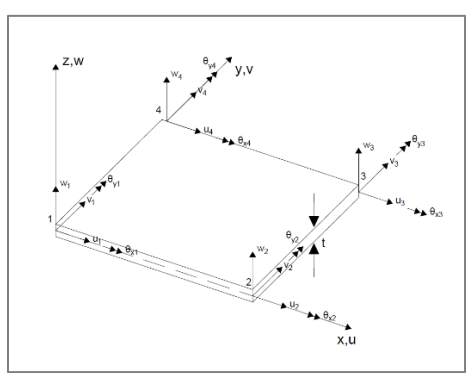
Σχήμα 4.3 Ορθογωνικό στοιχείο τεσσάρων κόμβων.



Σχήμα 4.4 Τριγωνικό επιφανειακό στοιχείο.



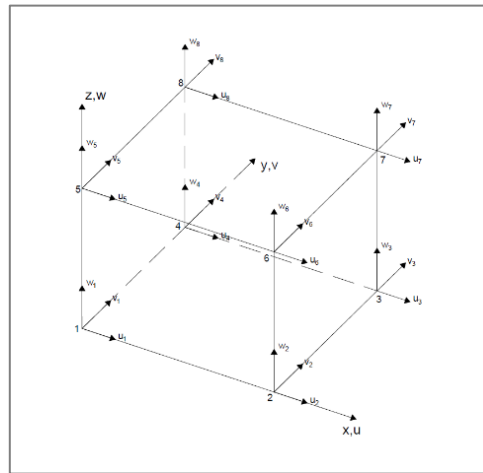
Σχήμα 4.5 Ορθογωνικό στοιχείο πλάκας.



Σχήμα 4.6 Στοιχείο κελύφους.

- Χωρικά στοιχεία (3D elements)

Τα πιο συνηθισμένα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία είναι τα τετραεδρικά στοιχεία, τα οποία αποτελούνται από 8 κόμβους, καθένας εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από 3 βαθμούς ελευθερίας (μετατόπισης).



Σχήμα 4.7 Κυβικό στοιχείο οκτώ κόμβων.

#### 4.4. Περιγραφή φυσικού μοντέλου

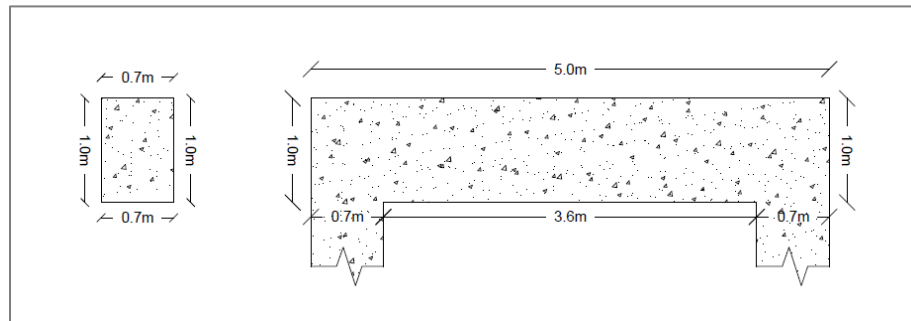
Το παρόν μοντέλο μελετάται για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας και δεν αφορά πραγματική κατασκευή, ωστόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι ενδεικτικά και μπορούν να συγκριθούν με παρόμοιες περιπτώσεις κτιρίων. Πρόκειται για ένα πολυώροφο κτίριο (9 όροφοι), εδραζόμενο σε μια συνδυασμένη θεμελίωση (Combined Pile Raft Foundation – CPRF), αποτελούμενη από δομικά στοιχεία βαθιάς και επιφανειακής θεμελίωσης, τα οποία χαρακτηρίζονται από κοινή λειτουργία. Το υπέδαφος προς εξέταση ορίζεται ως ενιαία στρώση στιφρής αργίλου υψηλής αντοχής.

Ο φέρων οργανισμός της ανωδομής αποτελείται από δομικά στοιχεία δοκών, υποστυλωμάτων και πλακών, διατομής του Σχήματος 4.8, 4.9 και 4.10 αντίστοιχα, εξασφαλίζοντας τη στατική επάρκεια καθενός εκ των ορόφων. Το στοιχείο της πλάκας κάθε ορόφου, καθώς και της πλάκας εδραζόμενης επί εδάφους χαρακτηρίζεται ως δύσκαμπτο, λόγω των διαστάσεών του, έχοντας ως αποτέλεσμα την κίνηση του σκελετού του κτιρίου (δοκοί και κεφαλές υποστυλώματων) με γνώμονα την μετακίνηση της πλάκας (διαφραγματική λειτουργία).

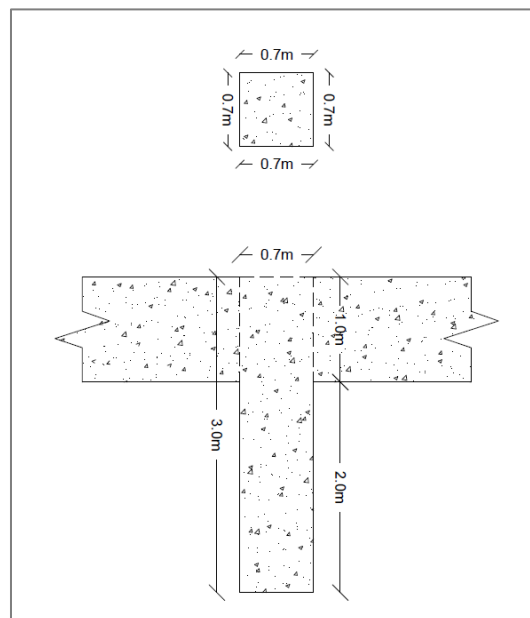
Η συνδυασμένη θεμελίωση περιλαμβάνει ως στοιχείο βαθιάς θεμελίωσης ομάδα 42 πασσάλων, πακτωμένων σε ενιαίο κεφαλόδεσμο, ο οποίος έχει το ρόλο της επιφανειακής θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση). Όπως προαναφέρθηκε, η κοιτόστρωση θεωρείται απαραμόρφωτη λόγω του πάχους της και οι πάσσαλοι χαρακτηρίζονται από κοινές διαστάσεις για λόγους απλοποίησης. Οι τυπικές διατομές των παραπάνω στοιχείων θεμελίωσης φαίνονται στο Σχήμα 4.11 και 4.12, αντίστοιχα.

Κατά την εκσκαφή των θεμελίων, η γεωστατική ένταση θεωρείται ισότροπη ( $\sigma_{v0} = \sigma_{h0}$ ). Επιπλέον, η θεώρηση ομοιόμορφου αργλικού μέσου καθ'όλο το βάθος της θεμελίωσης συντελεί στην υδροστατική φόρτιση των δομικών στοιχείων ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ). Λόγω των παραπάνω, επιτυγχάνεται η αξονοσυμμετρία των πασσάλων, συνθήκη που απλοποιεί την επίλυση του προβλήματος, αφού η εικόνα των μετακινήσεων αποκτά συμμετρική μορφή.

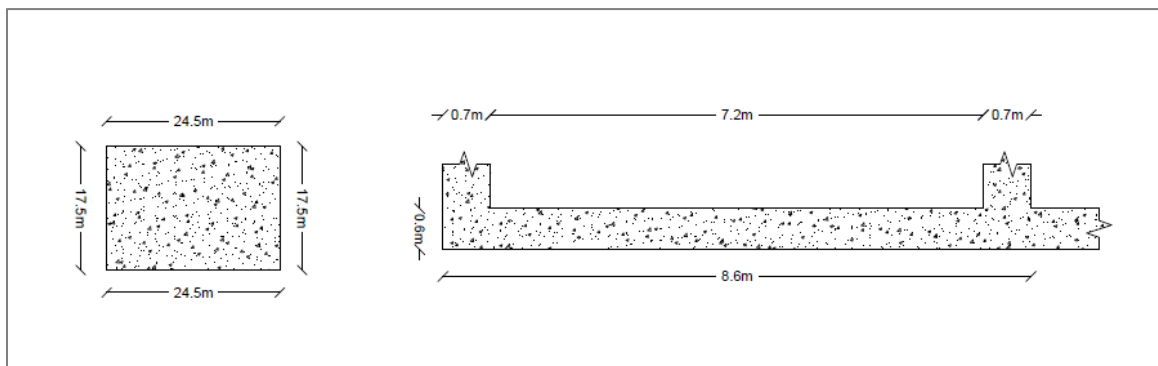
Όλα τα δομικά στοιχεία (ανωδομής και θεμελίωσης) κατασκευάζονται από σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 με μέτρο ελαστικότητας  $E = 30000 \text{ MPa}$  και λόγο Poisson  $\nu = 0.2$  και οπλίζονται με χάλυβα κατηγορίας B500B, με τις ελαστικές του ιδιότητες να είναι  $E = 200000 \text{ MPa}$  και  $\nu = 0.3$ . Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης του σκυρόδεματος C20/25 (Σχήματα 4.13, 4.14) και του χάλυβα ενίσχυσης B500B (Σχήμα 4.15, 4.16). Προβλέπεται μια ορισμένη ελάχιστη επικάλυψη του οπλισμού για λόγους ανθεκτικότητας, συνάφειας και πυρασφάλειας. Για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 επιλέγεται πάχος επικάλυψης στους πασσάλους 80mm (EC2). Στο Σχήμα 4.17, δίνεται η διατομή τυχαίου πασσάλου εκ των 42.



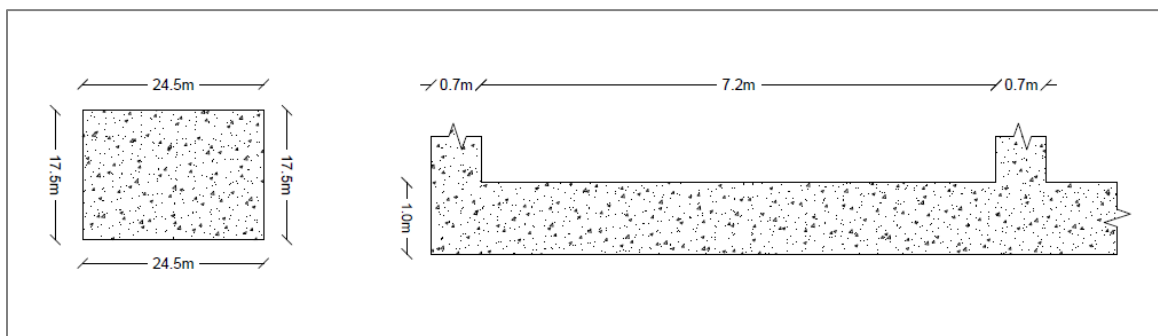
Σχήμα 4.8 Διατομή δοκών φέροντα οργανισμού.



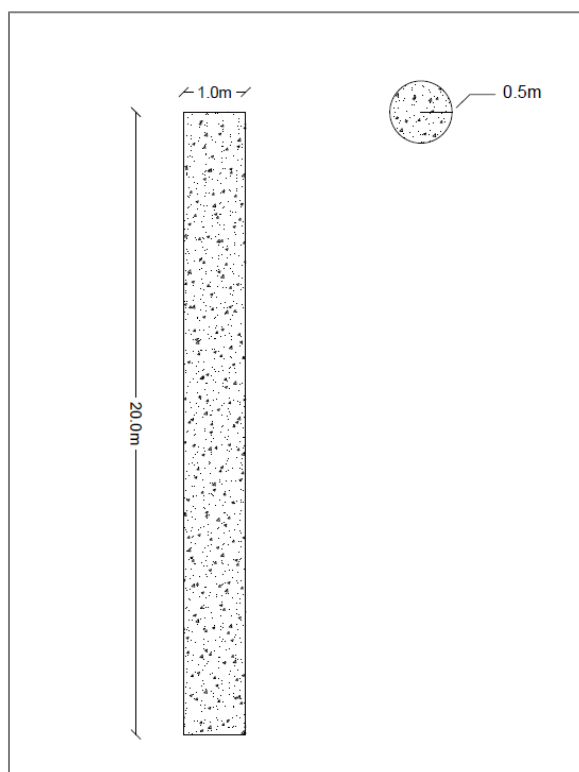
Σχήμα 4.9 Διατομή υποστυλωμάτων φέροντα οργανισμού.



Σχήμα 4.10 Διατομή πλάκας ορόφου από υποστύλωμα σε υποστύλωμα (τρεις υποπλάκες ίδιας διατομής).

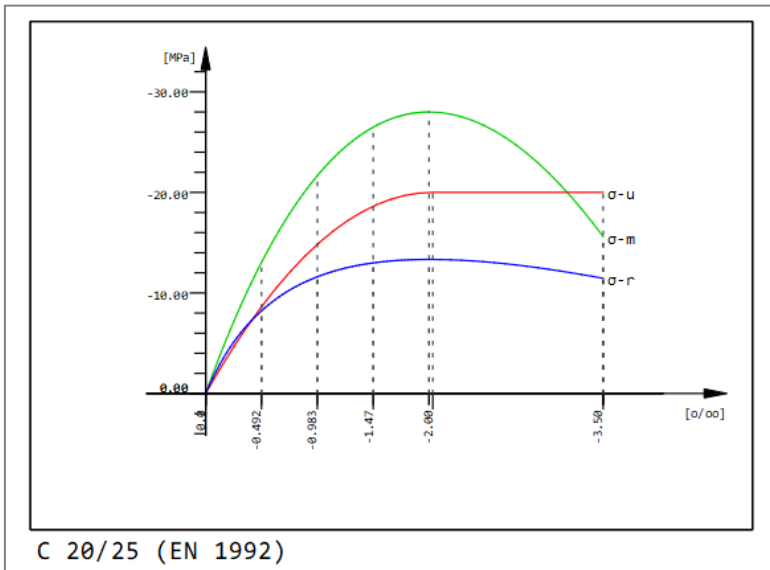


Σχήμα 4.11 Διατομή κοιτόστρωσης από υποστύλωμα σε υποστύλωμα (τρεις υποπλάκες ίδιας διατομής).



Σχήμα 4.12 Διατομή πασσάλων θεμελίωσης.

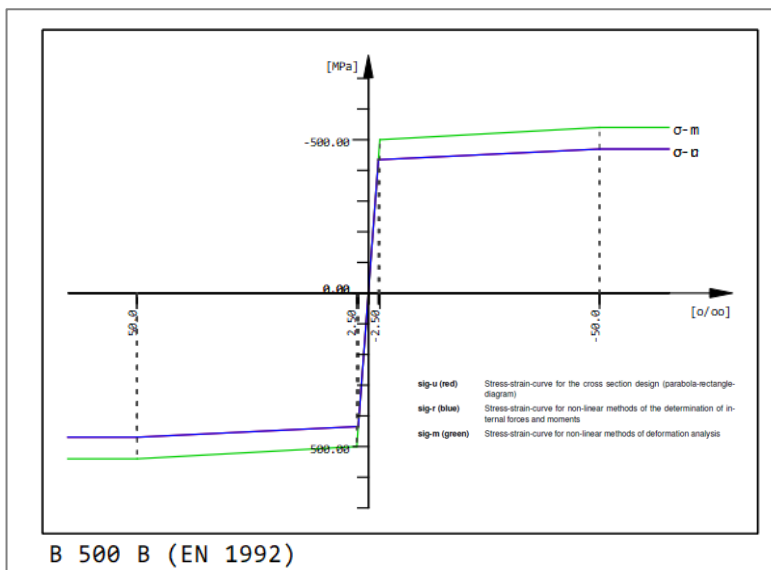




Σχήμα 4.13 Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης του σκυροδέματος κατηγορίας C20/25. (Sofistik)

Σκυρόδεμα C25/30	
f <sub>c</sub> (MPa)	20.00
f <sub>ck</sub> (MPa)	20.00
f <sub>ctm</sub> (MPa)	2.21
f <sub>ctk,05</sub> (MPa)	1.55
f <sub>ctk,95</sub> (MPa)	2.87
f <sub>bd</sub> (MPa)	2.32
f <sub>cm</sub> (MPa)	28.00

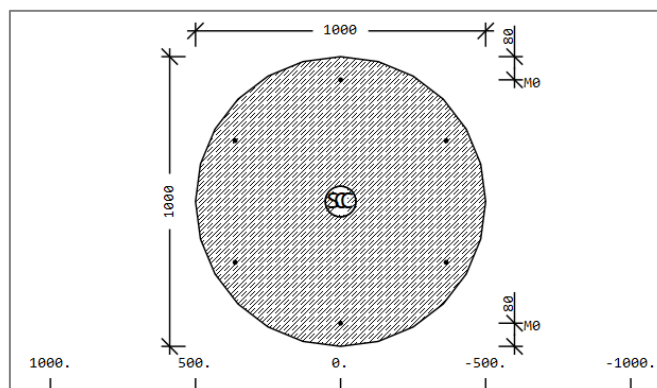
Σχήμα 4.14 Πίνακας χαρακτηριστικών σκυροδέματος C20/25.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του χάλυβα B500B. (Sofistik)

Χάλυβας B500B	
f <sub>y</sub> (MPa)	25.00
f <sub>yc</sub> (MPa)	25.00
f <sub>t</sub> (MPa)	2.56
f <sub>c</sub> (MPa)	1.80

Σχήμα 4.16 Πίνακας χαρακτηριστικών χάλυβα B500B.



Σχήμα 4.17 Ενδεικτική διατομή πασσάλου. (Sofistik)

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αποτίμηση των επιπτώσεων στη συνδυασμένη θεμελίωση κατά την εγκατάσταση σωλήνων κυκλοφορίας θερμού ρευστού κάτω από την κοιτόστρωση σε ένα σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Η μελέτη της συνδυασμένης θεμελίωσης επικεντρώνεται στη λειτουργία της κοιτόστρωσης σε συνθήκες ανομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας, προσθέτοντας την επιρροή της λειτουργίας των πασσάλων ως γεωεναλλάκτες. Εξετάζεται έτσι, η μηχανική απόκριση της ενεργειακής πλέον συνδυασμένης θεμελίωσης κατά την επίδραση μηχανικών και θερμικών φορτίων στη διάρκεια του έτους, τα οποία θεμρικά φορτία μεταφράζονται ως μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T$ .

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης και η μέθοδος ανάλυσης και σχεδιασμού.

#### 4.5. Προσομοίωση προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος διεξάγεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SOFiSTiK. Η μεταφορά της θερμότητας, καθώς και η ενεργειακή φύση του προβλήματος δε λαμβάνονται υπόψιν και ως εκούτου, τα βήματα της ανάλυσης ακολουθούν την κλασική μηχανική.

Λόγω της αξονοσυμμετρίας (Παράγραφος 4.3.), τα δομικά στοιχεία των πασσάλων προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία (beam elements), επιτρέποντας τη μετακίνηση κάθε κόμβου σε μία κατεύθυνση (ένας βαθμός ελευθερίας). Γραμμικά στοιχεία χρησιμοποιούνται και για την προσομοίωση των δοκών και υποστυλωμάτων, λόγω της γεωμετρίας τους. Οι πλάκες κάθε ορόφου, καθώς και η κοιτόστρωση έχουν διαστάσεις ανά διεύθυνση εξίσου σημαντικές (δεν υπάρχουν συνθήκες επίπεδης έντασης) και προσομοιώνονται με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (shell elements), δηλώνοντας πέντε βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (τρεις μετατόπισης, δύο στροφής).

Το περιβάλλον έδαφος ορίζεται ως ενιαία στρώση στιφρής αργίλου, υψηλής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u = 100$  kPa. Η αντίσταση της εδαφικής στρώσης κάτω από την κοιτόστρωση προσομοιώνεται με γραμμικά ελατήρια, όπως προκύπτουν στην Παράγραφο 3.2.1., ενώ περιμετρικά των πασσάλων με ειδικά διαμορφωμένα μη γραμμικά ελατήρια, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.2.2.

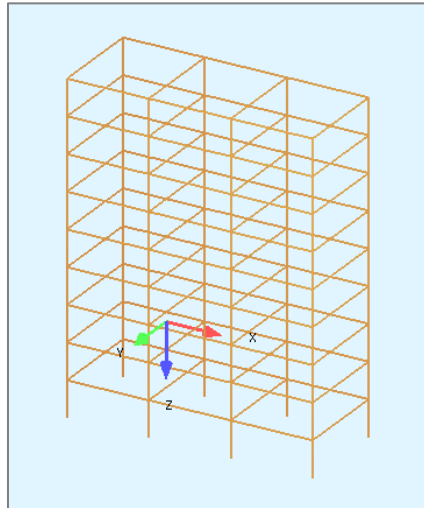
Έχοντας συνθέσει πλέον το μοντέλο, ακολουθεί η διακριτοποίηση των επιμέρους φορέων και η αριθμητική επίλυση της αντίστασης του εδάφους.

##### 4.5.1. Διακριτοποίηση φορέων

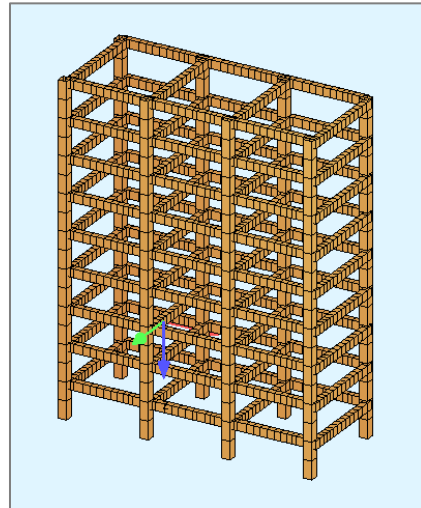
###### Διακριτοποίηση δοκών και υποστυλωμάτων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 τα δομικά στοιχεία των δοκών έχουν διαστάσεις ορθογωνικής διατομής (0.7x1.0)m και είναι μήκους 5m. Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 τα δομικά στοιχεία των υποστυλωμάτων έχουν διαστάσεις τετραγωνικής διατομής (0.7x0.7)m και μήκους 3m, όπως θεωρείται το ύψος κάθε ορόφου. Ο φέρον οργανισμός κάθε ορόφου αποτελείται από

δέκα δοκούς και οκτώ υποστυλώματα, η διακριτοποίηση των οποίων γίνεται με γραμμικά στοιχεία, λόγω της γεωμετρίας τους. Η ελάχιστη διάσταση των στοιχείων με την οποία πρόκειται να γίνει η διακριτοποίηση ορίζεται στα 0.3m, ενώ στην περίπτωση που δύο κόμβοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση μικρότερη των 0.2m ενωπιούνται, δημιουργώντας έναν κόμβο μεγάλης δυσκαμψίας (master/slave elements). (Σχήμα 4.18)



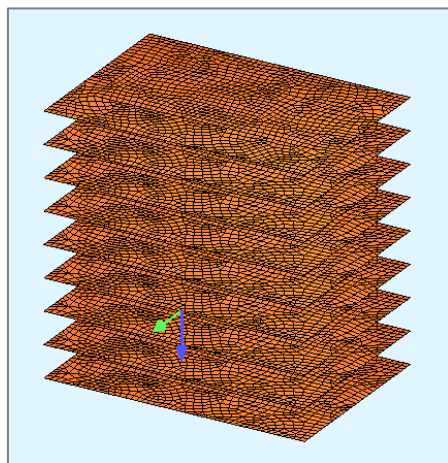
Σχήμα 4.18 Διακριτοποίηση δοκών και υποστυλωμάτων με γραμμικά στοιχεία. (Sofistik)



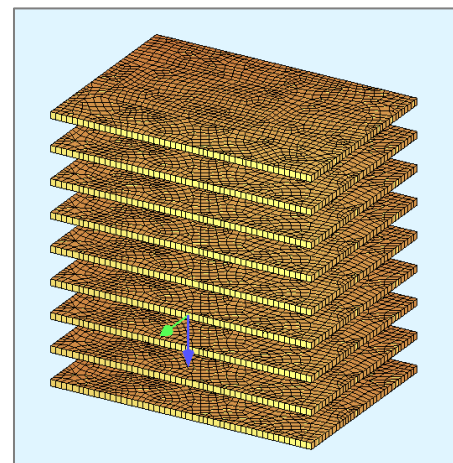
Σχήμα 4.19 Διακριτοποίηση δοκών και υποστυλωμάτων με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik)

#### Διακριτοποίηση πλακών ορόφων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 η πλάκα κάθε ορόφου εκ των εννέα έχει διαστάσεις (24.5x17.5)m και πάχος 0.6m. Η διακριτοποίηση πραγματοποιείται με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, τα οποία συνδυάζουν τις ιδιότητες ενός στοιχείου επίπεδης έντασης και ενός στοιχείου πλάκας. Η ελάχιστη διάσταση των στοιχείων με την οποία πρόκειται να γίνει η διακριτοποίηση ορίζεται στα 0.3m, ενώ στην περίπτωση που δύο κόμβοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση μικρότερη των 0.2m ενωπιούνται, δημιουργώντας έναν κόμβο μεγάλης δυσκαμψίας (master/slave elements).



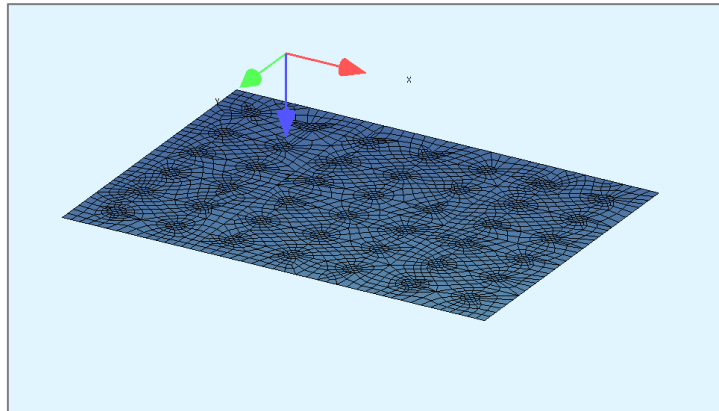
Σχήμα 4.20 Διακριτοποίηση πλακών ορόφων με τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους. (Sofistik)



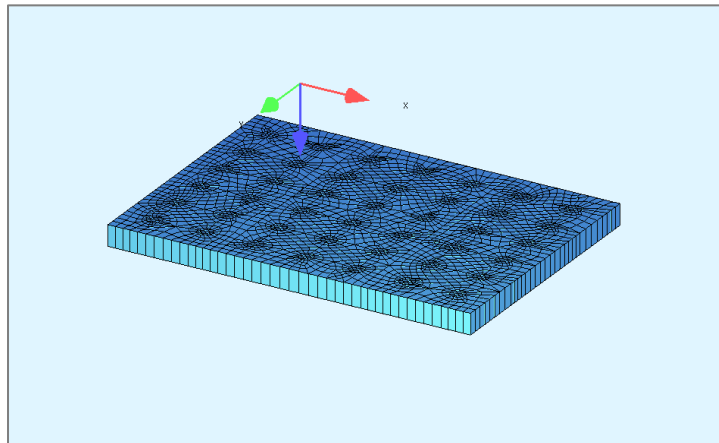
Σχήμα 4.21 Διακριτοποίηση πλακών ορόφων με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik)

### Διακριτοποίηση πλάκας επί εδάφους

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 η κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) έχει διαστάσεις (24.5x17.5)m και πάχος 1m. Η διακριτοποίηση πραγματοποιείται με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, τα οποία συνδυάζουν τις ιδιότητες ενός στοιχείου επίπεδης έντασης και ενός στοιχείου πλάκας. Η ελάχιστη διάσταση των στοιχείων με την οποία πρόκειται να γίνει η διακριτοποίηση ορίζεται στα 0.3m, ενώ στην περίπτωση που δύο κόμβοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση μικρότερη των 0.2m ενωπιούνται, δημιουργώντας έναν κόμβο μεγάλης δυσκαμψίας (master/slave elements).



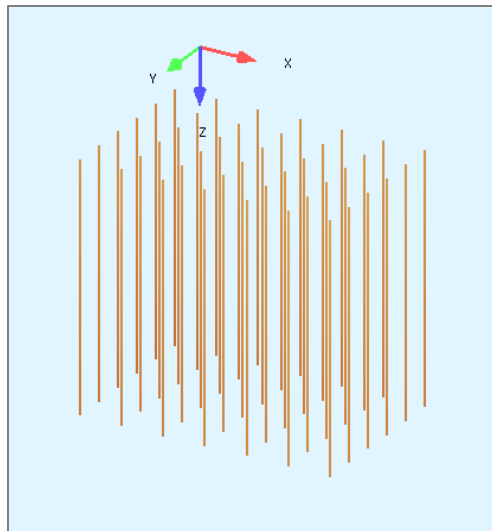
**Σχήμα 4.22** Διακριτοποίηση κοιτόστρωσης με τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους. (Sofistik)



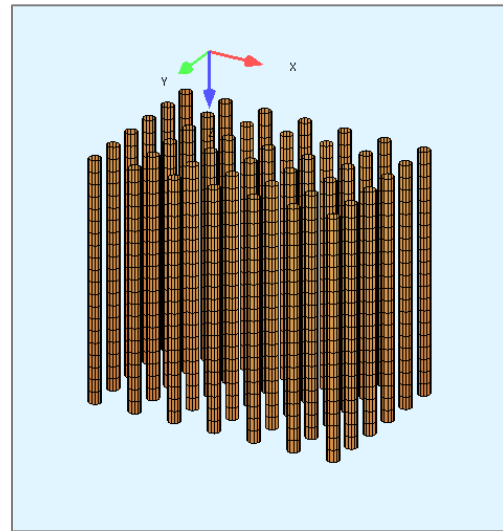
**Σχήμα 4.23** Διακριτοποίηση κοιτόστρωσης με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik)

### Διακριτοποίηση ομάδας πασσάλων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 ο μεμονωμένος πάσσαλος είναι κυλινδρικής διατομής μήκος 20m και ακτίνας 0.5m. Οι διαστάσεις αυτές εφαρμόζονται στην ομάδα πασσάλων συνολικά, αφού δε λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων. Η διακριτοποίηση γίνεται με γραμμικά στοιχεία, λόγω αξονοσυμμετρίας με επιλεγμένο βήμα ενός μέτρου. Η ελάχιστη διάσταση των στοιχείων με την οποία πρόκειται να γίνει η διακριτοποίηση ορίζεται στα 0.3m, ενώ στην περίπτωση που δύο κόμβοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση μικρότερη των 0.2m ενωπιούνται, δημιουργώντας έναν κόμβο μεγάλης δυσκαμψίας (master/slave elements).

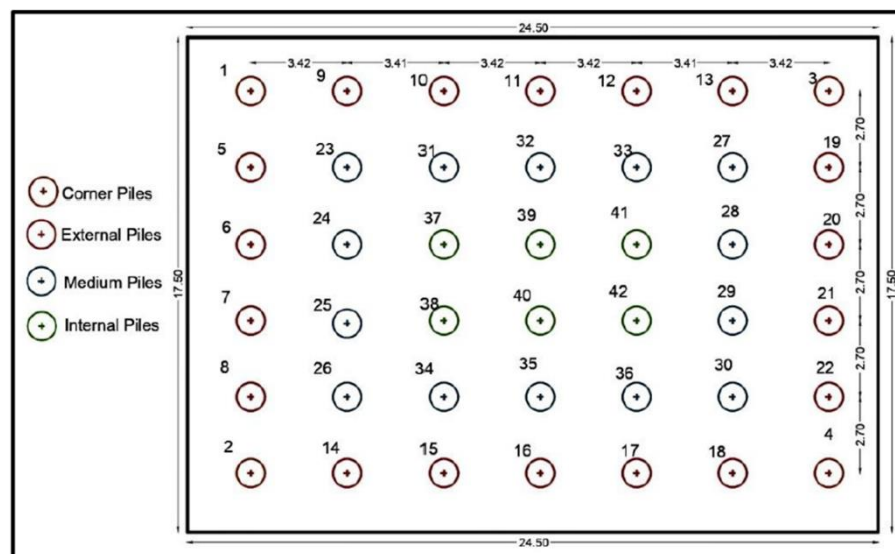


Σχήμα 4.24 Διακριτοποίηση κοιτόστρωσης με τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους. (Sofistik)



Σχήμα 4.25 Διακριτοποίηση ομάδας πασσάλων με γραφική απεικόνιση της διατομής. (Sofistik)

Δίνεται επιπλέον η αρίθμηση της κεφαλής κάθε πασσάλου και οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται βάσει θέσης (γωνιακοί, εξωτερικοί, ενδιάμεσοι και εσωτερικοί).



Σχήμα 4.26 Αρίθμηση κεφαλής πασσάλων

#### 4.5.2. Αριθμητική επίλυση ελατηρίων αντίστασης

Οι αναλύσεις έγιναν για εδαφική στρώση στιφρής αργίλου υψηλής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u = 100$  kPa και ειδικού βάρους  $\gamma = 19.5$  kN/m<sup>3</sup>. Με βάση τον πίνακα εμπειρικών σχέσεων στιφρής αργίλου συγκριτικά με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$  [3] (Σχήμα 4.27), το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως  $E = 500c_u = 50000$  kPa και θεωρείται τυπική τιμή λόγου Poisson αργίλου  $\nu = 0.3$ . Επιπλέον, η χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή ισούται με  $q_{sk} = 0.04$  MPa και η χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής  $q_{bk} = 0.8$  MPa.

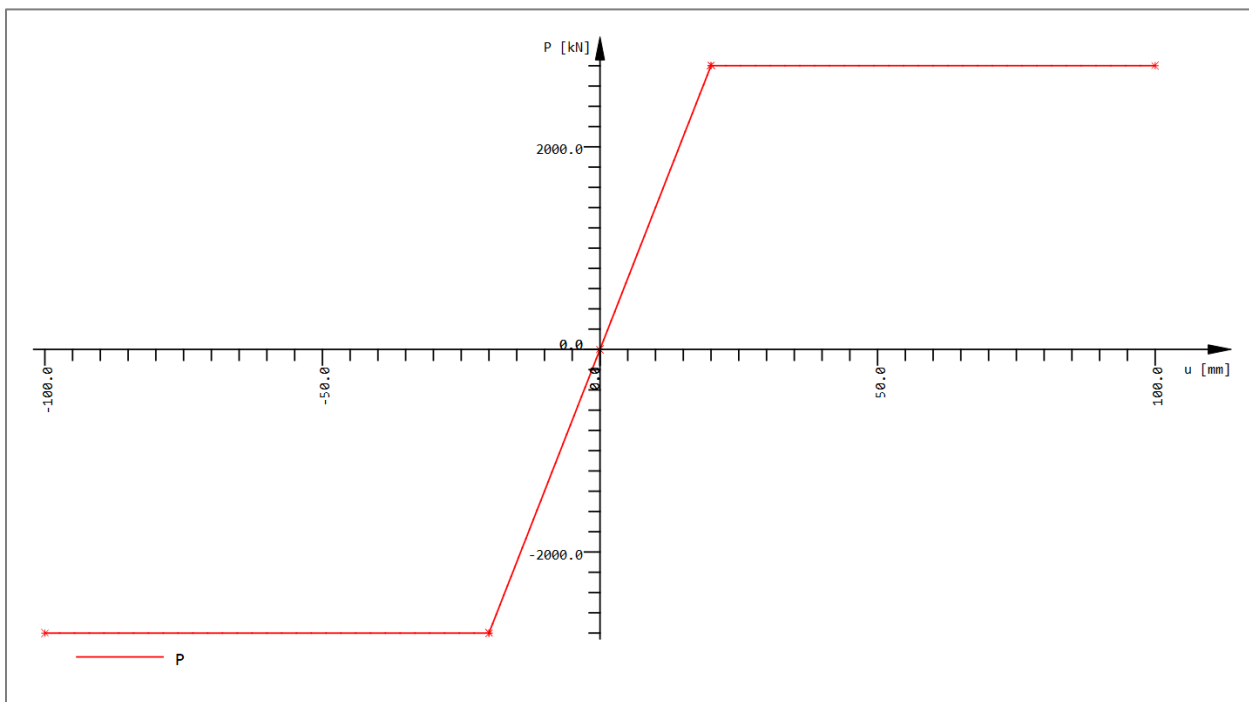
Soil		
Use the undrained shear strength $s_u$ in units of $s_u$		
Clay and silt	$I_p > 30$ or <i>organic</i>	$E_s = (100 \text{ to } 500)s_u$
Silty or sandy clay	$I_p < 30$ or <i>stiff</i>	$E_s = (500 \text{ to } 1500)s_u$ Again, $E_{s,OCR} \approx E_{s,nc} \sqrt{OCR}$ Use smaller $s_u$ -coefficient for highly plastic clay.
Of general application in clays is		
	$E_s = Ks_u$ (units of $s_u$ )	(a)
where $K$ is defined as		
	$K = 4200 - 142.54I_p + 1.73I_p^2 - 0.0071I_p^3$	(b)
and $I_p$ = plasticity index in <b>percent</b> . Use $20\% \leq I_p \leq 100\%$ and round $K$ to the nearest multiple of 10.		
Another equation of general application is		
	$E_s = 9400 - 8900I_p + 11600I_c - 8800S$ (kPa)	(c)
	$I_p, I_c, S$ = previously defined above and/or in Chap. 2	

Σχήμα 4.27 Πίνακας εμπειρικών σχέσεων για το μέτρο ελαστικότητας αργίλου συγκριτικά με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$ . [3]

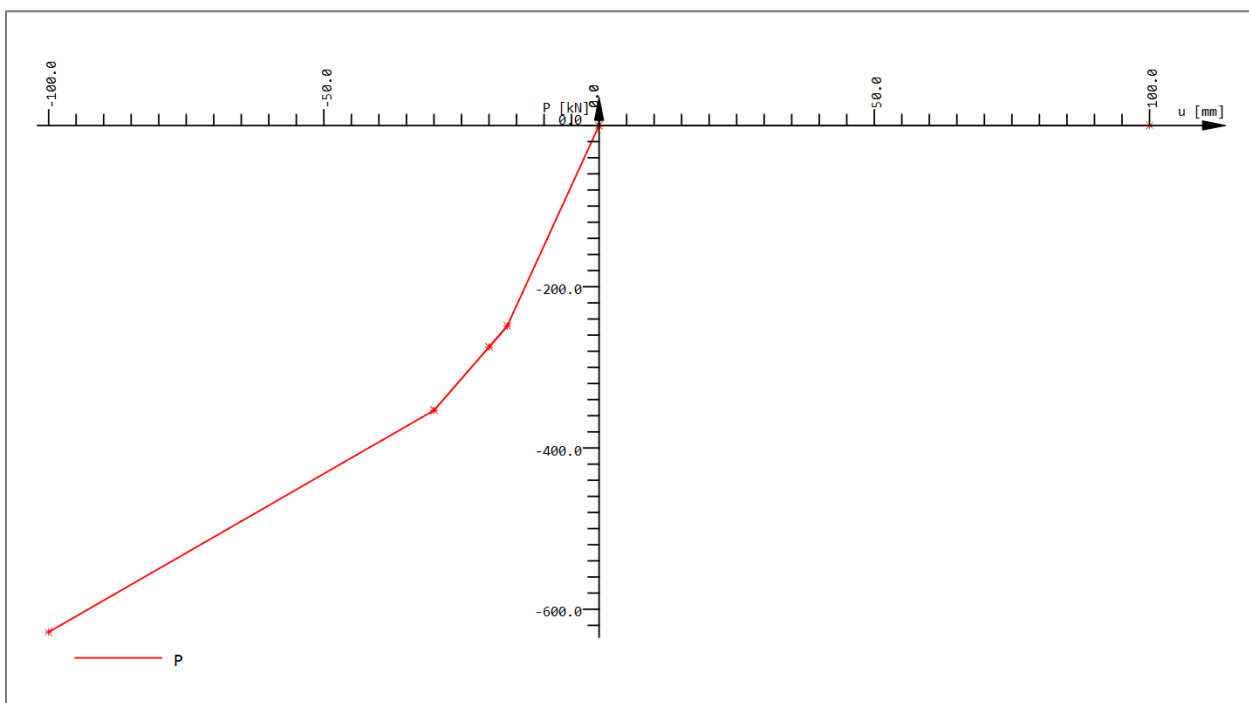
Για την αντίσταση του εδάφους κάτω από την επιφάνεια της κοιτόστρωσης προσομοιώνονται γραμμικά ελατήρια, η αριθμητική επίλυση των οποίων αφορά την άμεση καθίζηση και την καθίζηση στερεοποίησης (μονοδιάστατης συμπίεσης) της αργλικής στρώσης, αγνοώντας την επίδραση δευτερογενών καθιζήσεων και θεωρώντας πως η κοιτόστρωση είναι δύσκαμπτη. Η επίλυση αναλύεται στην Παράγραφο 3.2.1. με την τελική τιμή δυσκαμψίας του ελατηρίου να προκύπτει από το λόγο του καθαρού φορτίου που επιβάλλεται στην επιφάνεια της πλάκας προς τη συνολική καθίζηση της τελευταίας.

Για την αντίσταση του εδάφους περιμετρικά των πασσάλων γίνεται η αριθμητική ανάλυση για μεμονωμένο πάσσαλο, αγνοώντας την επίδραση της ομάδας. Η πλευρική αντίσταση και η αντίσταση αιχμής κατά την επιβολή αξονικού φορτίου επιλύονται με βάση τον DIN4014 και τους μερικούς συντελεστές του Ευρωκώδικα 7. Ακολουθώντας τη λεπτομερή αριθμητική επίλυση της Παραγράφου 3.2.2., προκύπτουν οι καμπύλες απόκρισης για τα κατακόρυφα ελατήρια ανά 1m βάθους του πασσάλου σε αξονική φόρτιση, όπως μεταφράστηκαν στην ανάλυση με βάση τον

καταστατικό νόμο δύναμης (kN) – μετακίνησης (mm) για μη γραμμικό ελατήριο. Η ανάλυση έγινε για αργλική στρώση υψηλής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u = 100$  kPa (Σχήμα 4.28)

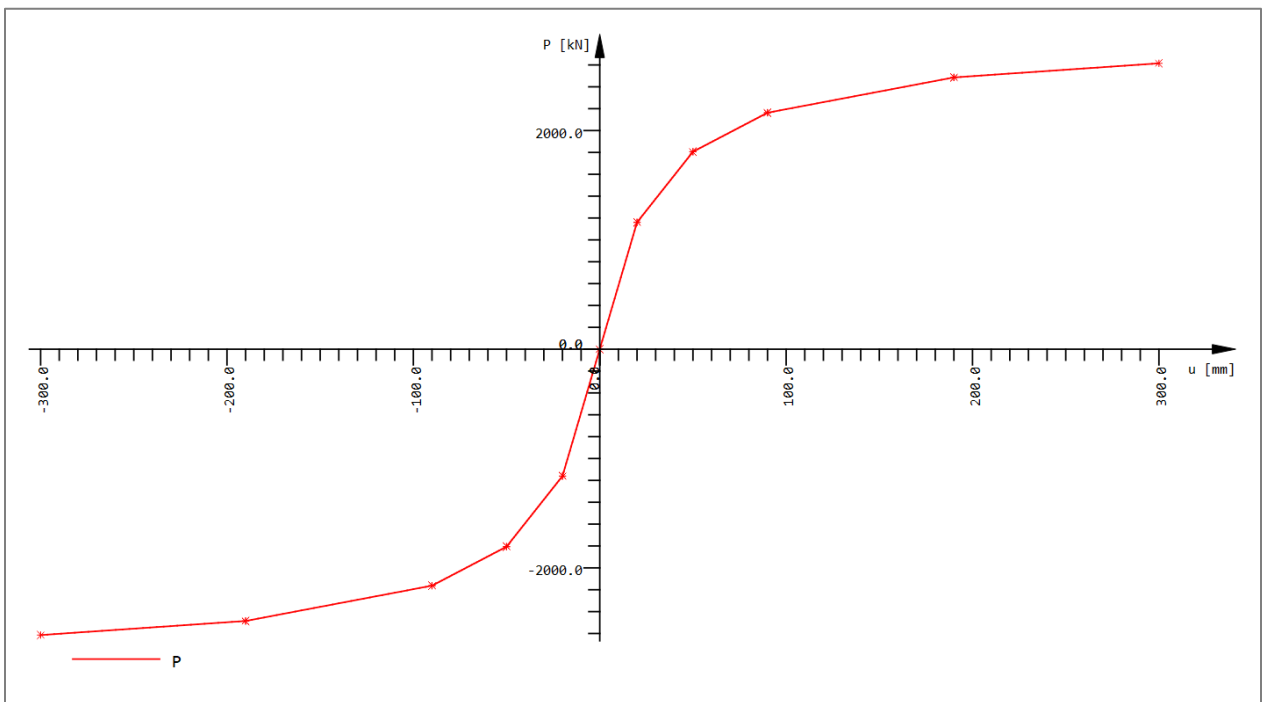


Σχήμα 4.28 Διάγραμμα απόκρισης (διγραμμικό) ελατηρίου αντίστασης τριβής κατά την αξονική φόρτιση. (Sofistik)



Σχήμα 4.29 Διάγραμμα απόκρισης (διγραμμικό) ελατηρίου αντίστασης αιχμής κατά την αξονική φόρτιση. (Sofistik)

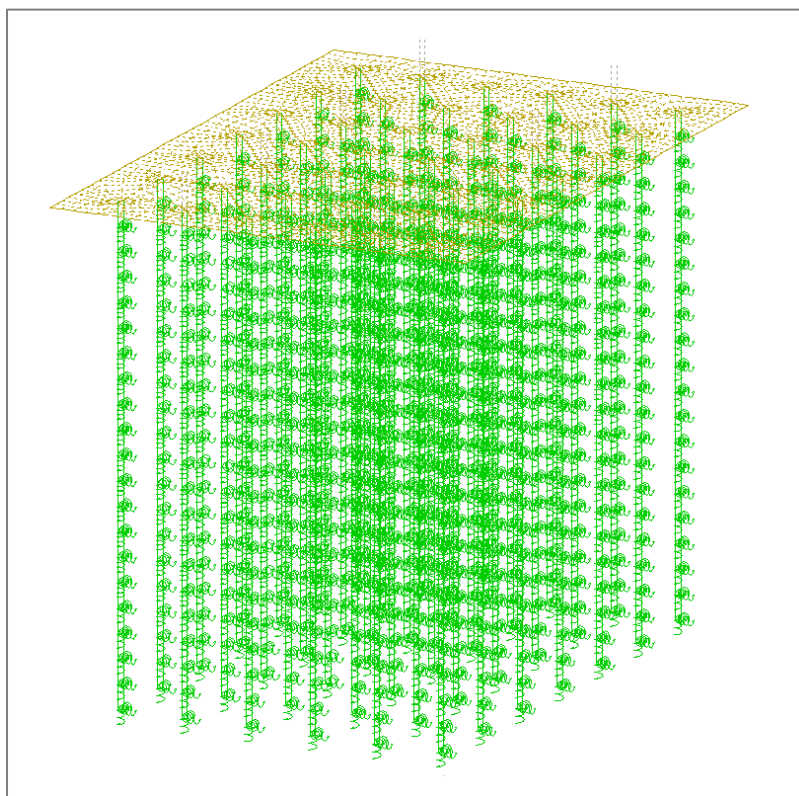
Για την αντίσταση κατά την επιβολή οριζόντιου φορτίου εφαρμόζεται η θεωρία των υπερβολικών καμπυλών  $p - \gamma$  της Παραγράφου 3.3.2. και υπολογίζεται η αρχική δυσκαμψία  $K_i$  και η μέγιστη πλευρική αντίσταση  $p_{ult}$  κάθε εδαφικής στρώσης. Προκύπτουν τα γραφήματα των καμπυλών με βήμα οριζόντιας μετακίνησης 1cm και όπως προαναφέρθηκε, η καμπύλη υποδιαιρείται σε τρεις γραμμικούς κλάδους, καθένας εκ των οποίων έχει διαφορετική δυσκαμψία. Ανάγεται έτσι το πρόβλημα από μη γραμμικό σε γραμμικό. Κατά τον προγραμματισμό στο Sofistik, δηλώνονται οι συντεταγμένες αρχής και τέλους των τριών τμημάτων της καμπύλης και το οριζόντιο ελατήριο εισάγεται αυτόματα (καταστατικός νόμος δύναμης (kN) – μετακίνησης (mm)). Παρακάτω δίνεται η υπολογισμένη καμπύλη απόκρισης των οριζόντιων ελατηρίων για την ενιαία αργιλική στρώση υπεδάφους.



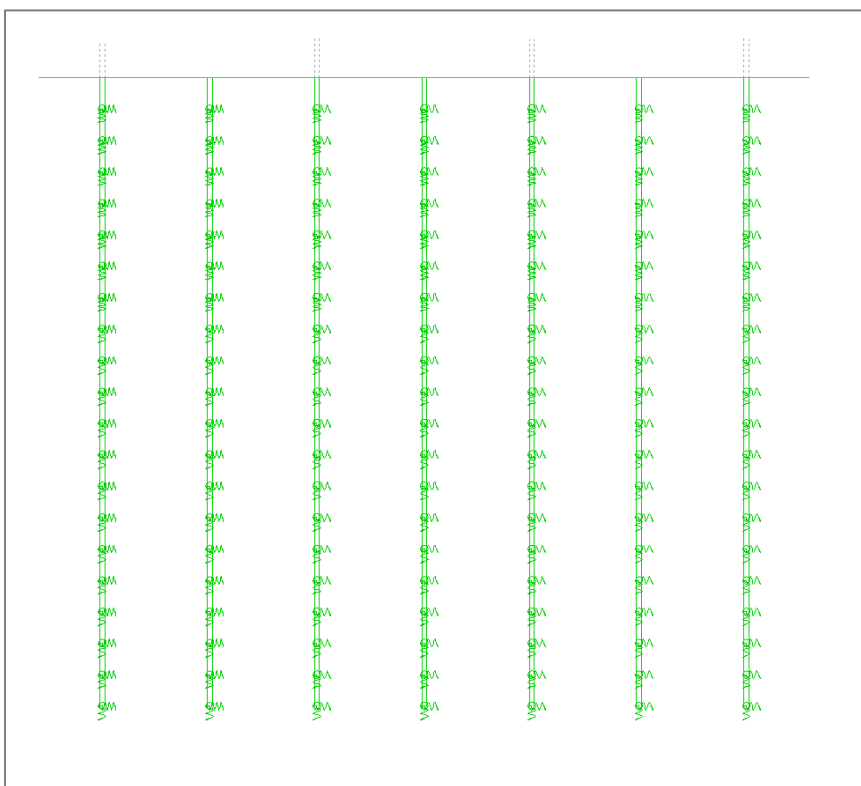
Σχήμα 4.30 Διάγραμμα απόκρισης (πολυγραμμικό) κατά την αξονική φόρτιση. (Sofistik)

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η ανάρτηση των αξονικών και πλευρικών ελατηρίων κατά μήκος των πασσάλων ανά 1 μέτρο.



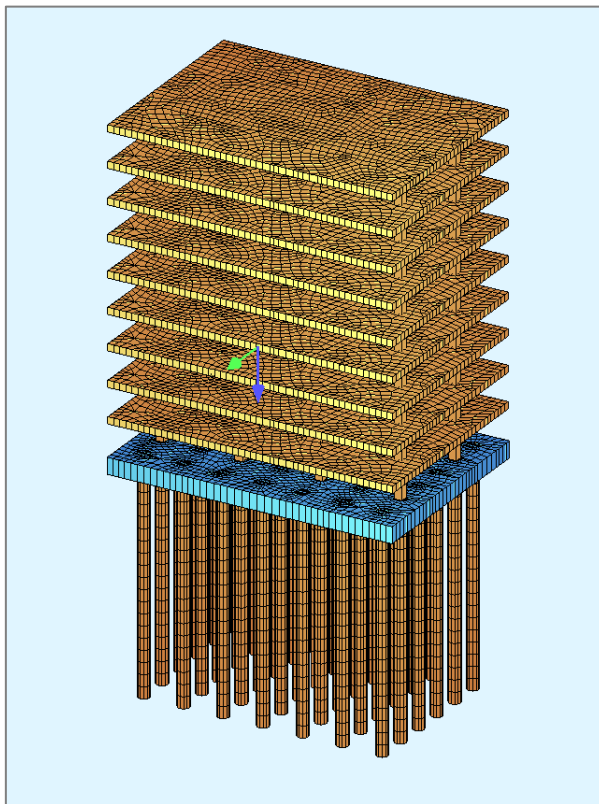


Σχήμα 4.31 Γραφική απεικόνιση αξονικών (τριθής και αιχμής) και πλευρικών ελατηρίων κατά μήκος των πασσάλων. (Sofistik)



Σχήμα 4.32 Γραφική απεικόνιση αξονικών (τριθής και αιχμής) και πλευρικών ελατηρίων κατά μήκος των πασσάλων στο σύστημα xz. (Sofistik)

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η προσομοίωση του τελικού μοντέλου με τις πραγματικές διαστάσεις των δομικών στοιχείων



Σχήμα 4.33 Γραφική απεικόνιση τελικού μοντέλου προσομοίωσης (Sofistik)



Σχήμα 4.34 Γραφική απεικόνιση σε μεγέθυνση τελικού μοντέλου προσομοίωσης (Sofistik)

#### 4.6. Σχεδιασμός μοντέλου

Έχοντας αποσαφηνίσει τη γεωμετρία και τη διακριτοποίηση του φορέα, καθώς και τη λειτουργία των ελατηρίων, η δυσκαμψία των οποίων προσομοιώνει την αντίσταση του εδάφους, στην Παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι συνδυασμοί φορτίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και το σχεδιασμό της κατασκευής.

Με βάση τις αναφορές της Παραγράφου 3.3.1. ο σχεδιασμός προβλέπει την εξέταση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) και κατά την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS). Θεωρείται ως μόνιμο μηχανικό φορτίο το ίδιο βάρος της ανωδομής και ορίζεται ένα κινητό φορτίο  $Q$ .

Για οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) επιλέγεται ως συνδυασμός φορτίσεων ο γενικός τύπος (EQU) του Ευρωκώδικα 0:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,l} Q_{k,l} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

όπου για δυσμενή επιρροή, οι συντελεστές ασφαλείας παίρνουν τις τιμές  $\gamma_{G,j} = 1.35$  και  $\gamma_{Q,l} = 1.50$  και η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$E_d = 1.35G_k + 1.50Q_k$$

Για οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS) επιλέγεται ως συνδυασμός φορτίσεων ο μόνιμος (Quasi – permanent combination) του Ευρωκώδικα 0:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Για κατηγορία κτιρίου Α ή Β του Πίνακα Α1.1. του ΕC0 (Σχήμα 3.19) (κατοικία ή γραφεία αντίστοιχα) προτείνονται οι παρακάτω συντελεστές  $\psi$ :

$$\psi_0 = 0.70$$

$$\psi_1 = 0.50$$

$$\psi_2 = 0.30$$

και η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$E_d = G_k + 0.30Q_k$$

Η φύση των θεμελίων ως γεωεναλλάκτες προσεγγίζεται με την εφαρμογή μεταβολής θερμοκρασίας  $\Delta T$  στο εσωτερικό τους. Αναλυτικότερα, εξετάζεται η περίπτωση ομοιόμορφης αυξομείωσης της θερμοκρασίας εσωτερικά του δομικού στοιχείου της κοιτόστρωσης, ως αποτέλεσμα της τοποθέτησης των σωλήνων του πρωτεύοντος δικτύου του συστήματος

γεωθερμικής αντλίας θερμότητας εσωτερικά του στοιχείου. Επειδή η κοιτόστρωση εδράζεται στο έδαφος η μεταβολή της θερμοκρασίας κυμαίνεται στους 10°C. Ωστόσο, κύριο αντικείμενο της διπλωματικής είναι η εξέταση της ανομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ενιαίου κεφαλόδεσμου, ως αποτέλεσμα της εγκατάστασης των σωλήνων στην κάτω παρειά του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση αυτή, η θερμοκρασία της πλάκας αυξομειώνεται αναλόγως τη θερμοκρασία του εδάφους. Θεωρώντας πως η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους είναι σταθερή και ίση με 20°C, η μεταβολή της θερμοκρασίας στην πλάκα κυμαίνεται στους 20°C.

Επιπλέον, εξετάζεται η ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των ενεργειακών πασσάλων, θεωρώντας πως το χειμώνα η θερμοκρασία του πασσάλου κυμαίνεται στους 0°C, ενώ το καλοκαίρι περίπου στους 40°C.

Παρατίθενται οι μηχανικές φορτίσεις (Mechanical Loads) και οι θερμικές φορτίσεις (Thermal Loads) που αναλύθηκαν με βάση τα παραπάνω.

- Φόρτιση για οριακή κατάσταση αστοχίας – ULS  
LC17:  $1.35G_k + 1.50Q_k$
- Φόρτιση για οριακή κατάσταση λειτουργίας – SLS  
LC18:  $G_k + 0.30Q_k$
- Λειτουργία πλάκας τον χειμώνα – απαγωγή μεγαλύτερου ποσοστού θερμότητας από το κεντρικό τμήμα της πλάκας.  
LC7: κεντρική περιοχή  $\Delta T = -25$  και πλευρικές  $\Delta T = -20$
- Λειτουργία πλάκας το καλοκαίρι – εισαγωγή μεγαλύτερου ποσοστού θερμότητας στο κεντρικό τμήμα της πλάκας.  
LC8: κεντρική περιοχή  $\Delta T = +25$  και πλευρικές  $\Delta T = +20$
- Λειτουργία πλάκας τον χειμώνα – απαγωγή θερμότητας από το σύστημα – ψύξη πλάκας (μεταφέρεται υγρό μικρότερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στην πλάκα, ώστε να θερμανθεί ο χώρος).  
LC9:  $\Delta T = -10$
- Λειτουργία πλάκας το καλοκαίρι – εισαγωγή θερμότητας στο το σύστημα – θέρμανση πλάκας (μεταφέρεται υγρό μεγαλύτερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στην πλάκα, ώστε να ψυχθεί ο χώρος).  
LC10:  $\Delta T = +10$
- Λειτουργία πασσάλων τον χειμώνα – απαγωγή θερμότητας από το σύστημα – ψύξη πασσάλων (μεταφέρεται υγρό μικρότερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στον πάσσαλο, ώστε να θερμανθεί ο χώρος).

LC11:  $\Delta T = -20$

- Λειτουργία πασσάλων το καλοκαίρι – εισαγωγή θερμότητας στο σύστημα – θέρμανση πασσάλων (μεταφέρεται υγρό μεγαλύτερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στον πάσσαλο, ώστε να ψυχθεί ο χώρος).

LC12:  $\Delta T = +25$

- Λειτουργία πασσάλων τον χειμώνα – απαγωγή θερμότητας από το σύστημα – ψύξη πασσάλων (μεταφέρεται υγρό μικρότερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στον πάσσαλο, ώστε να θερμανθεί ο χώρος).

LC13: εσωτερικοί και ενδιάμεσοι  $\Delta T = -20$ , γωνιακοί και εξωτερικοί  $\Delta T = -10$

- Λειτουργία πασσάλων το καλοκαίρι – εισαγωγή θερμότητας στο σύστημα – θέρμανση πασσάλων (μεταφέρεται υγρό μεγαλύτερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στον πάσσαλο, ώστε να ψυχθεί ο χώρος).

LC14: εσωτερικοί και ενδιάμεσοι  $\Delta T = +25$ , γωνιακοί και εξωτερικοί  $\Delta T = +15$

- Λειτουργία πασσάλων τον χειμώνα – απαγωγή θερμότητας από το σύστημα – ψύξη πασσάλων (μεταφέρεται υγρό μικρότερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στον πάσσαλο, ώστε να θερμανθεί ο χώρος).

LC15: όλοι οι πάσσαλοι πλην των γωνιακών  $\Delta T = -20$

- Λειτουργία πασσάλων το καλοκαίρι – εισαγωγή θερμότητας στο σύστημα – θέρμανση πασσάλων (μεταφέρεται υγρό μεγαλύτερης θερμοκρασίας από το εσωτερικό του κτιρίου στον πάσσαλο, ώστε να ψυχθεί ο χώρος).

LC16: όλοι οι πάσσαλοι πλην των γωνιακών  $\Delta T = +25$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνδυασμοί φορτίσεων που επιλέχθηκαν προς ανάλυση και σύγκριση. Κατά τη μελέτη των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η συνεχής αναδρομή στις παρακάτω φορτίσεις και τις αντίστοιχες αριθμήσεις.

- Συνδυασμός ULS (LC 17)
- Συνδυασμός SLS (LC 18)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας χειμώνα + ULS) (LC 19)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας καλοκαίρι + ULS) (LC 20)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας χειμώνα + ULS) (LC 21)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας καλοκαίρι + ULS) (LC 22)
- Συνδυασμός LCC 11 και LCC 17 (λειτουργία πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 23)
- Συνδυασμός LCC 12 και LCC 17 (λειτουργία πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 24)
- Συνδυασμός LCC 13 και LCC 17 (λειτουργία πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 25)
- Συνδυασμός LCC 14 και LCC 17 (λειτουργία πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 26)
- Συνδυασμός LCC 15 και LCC 17 (λειτουργία πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 27)
- Συνδυασμός LCC 16 και LCC 17 (λειτουργία πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 28)

- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας χειμώνα + SLS) (LC 29)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας καλοκαίρι + SLS) (LC 30)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας χειμώνα + SLS) (LC 31)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας καλοκαίρι + SLS) (LC 32)
- Συνδυασμός LCC 11 και LCC 18 (λειτουργία πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 33)
- Συνδυασμός LCC 12 και LCC 18 (λειτουργία πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 34)
- Συνδυασμός LCC 13 και LCC 18 (λειτουργία πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 35)
- Συνδυασμός LCC 14 και LCC 18 (λειτουργία πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 36)
- Συνδυασμός LCC 15 και LCC 18 (λειτουργία πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 37)
- Συνδυασμός LCC 16 και LCC 18 (λειτουργία πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 38)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 11 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 39)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 13 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 40)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 15 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 41)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 12 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 42)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 14 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 43)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 16 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 44)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 11 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 45)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 13 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 46)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 15 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 47)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 12 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 48)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 14 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 49)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 16 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 50)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 11 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 51)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 13 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 52)

- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 15 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 53)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 12 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 54)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 14 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 55)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 16 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 56)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 11 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 57)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 13 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 58)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 15 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 59)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 12 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 60)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 14 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 61)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 16 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 62)

Η τιμή της θερμοκρασιακής μεταβολής των 20 βαθμών Κελσίου το χειμώνα είναι οριακή, καθώς στους 0 βαθμούς απόλυτης θερμοκρασίας (παραδοχή σταθερής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ίσης με 20 βαθμούς Κελσίου) το ρευστό που κυκλοφορεί στους σωλήνες του πρωτεύοντος κυκλώματος του συστήματος (είτε νερό, είτε μείγμα με νερό) τείνει να παγώσει με αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία του γεωθερμικού συστήματος. Ως εκτούτου, γίνεται η παραδοχή πως η εφαρμογή του μοντέλου αφορά περιοχές με υψηλή μέση θερμοκρασία (περίπου 22 βαθμούς Κελσίου) και στην περίπτωση που πέσει κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου ενεργοποιείται το σύστημα αυτοματισμού.

Κατά τη μη γραμμική ανάλυση, το Sofistik πρόκειται να σχηματίσει την περιβάλλουσα των παραπάνω λύσεων και να γίνει η διαστασιολόγηση με βάση τη δυσμενέστερη περίπτωση, η οποία για κάθε κόμβο δεν είναι ταυτόχρονη. Αν και φορτίζονται διαφορετικά οι κόμβοι, επιλέγεται κοινή δυσμενέστερη φόρτιση, ώστε ο σχεδιασμός να είναι κοινός για τους πασσάλους και πρακτικά η όπλιση να γίνει με ίδιες διατομές χάλυβα.

Σημειώνεται πως παράλληλα με την ανάλυση πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας και λειτουργικότητας των δομικών στοιχείων των πασσάλων κατά την επιβολή μηχανικών, όσο και θερμικών φορτίσεων, ώστε να λειτουργούν ομοιόμορφα κατά προσέγγιση και να μην ξεπερνάται η τιμή της φέρουσας ικανότητάς τους. Κατά τη διαδικασία ελέγχου, διαπιστώθηκε η διαρροή

πασσάλων κατά την επίδραση των φορτίσεων LC49, LC27, LC41, LC47, LC53 και LC59, γεγονός που αναλύεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

## 5. Αποτελέσματα

Η διαδικασία διερεύνησης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και του σχεδιασμού προσανατολίζεται στις εντατικές και κινηματικές επιπτώσεις στα δομικά στοιχεία θεμελίωσης, λόγω της εγκατάστασης ενός γεωθερμικού συστήματος αντλίας θερμότητας κάτω από την επιφάνεια της κοιτόστρωσης.

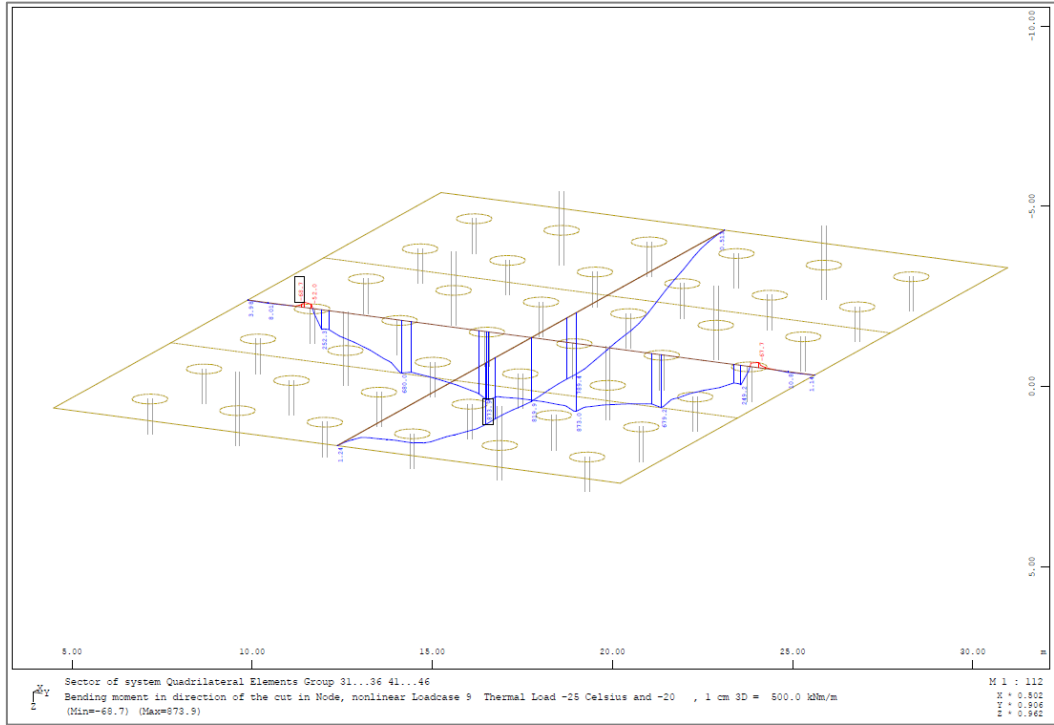
Κύριος στόχος είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων κατά την επιβολή τόσο των μηχανικών, όσο και των θερμικών φορτίων, ώστε εν τέλει να γίνει η σύγκριση των εντατικών και κινηματικών αποτελεσμάτων της επίδρασης συνδυασμού των φορτίων της ανωδομής και των θερμικών φορτίων λόγω της λειτουργίας των γεωεναλλακτών. Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζεται η εντατική και κινηματική εικόνα των στοιχείων θεμελίωσης κατά την επιβολή του θερμικού φορτίου που αντιστοιχεί στην ανομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας στο στοιχείο της κοιτόστρωσης, καθώς και στο συνδυασμό του θερμικού φορτίου αυτού με τα οριακά μηχανικά φορτία. Ακολουθεί η σύγκριση της μηχανικής απόκρισης της πλάκας και των πασσάλων για όλες τις πιθανές φορτίσεις κανονικοποιημένα ως προς τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την επιβολή μόνο του θερμικού φορτίου της ανομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής στο στοιχείο της κοιτόστρωσης που αποτελεί και τη βασική φόρτιση μελέτης. Στην Παράγραφο 5.2. παρουσιάζεται η ίδια διαδικασία διερεύνησης, προσθέτοντας στο ενεργειακό σύστημα τα στοιχεία βαθιάς θεμελίωσης των πασσάλων. Τα αποτελέσματα των φορτίσεων συνολικά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α'.

### 5.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων κατά τη λειτουργία της ενεργειακής πλάκας

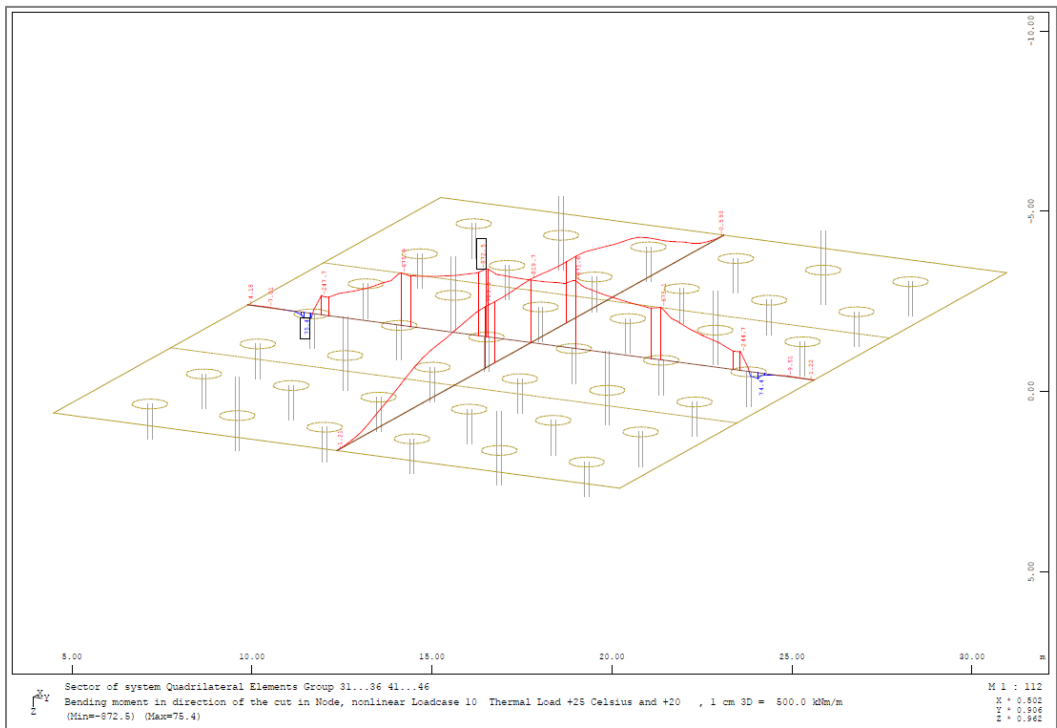
Για την κατανόηση του προβλήματος παρατίθεται η παραμορφωσιακή εικόνα της κοιτόστρωσης και των πασσάλων, καθώς και η εντατική κατάσταση αυτών στις κρίσιμες περιοχές κατά την εγκατάσταση των σωλήνων του συστήματος γεωθερμίας κάτω από την επιφάνεια του στοιχείου της πλάκας. Επιπλέον, παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα για τις φορτίσεις που συνδυάζουν το το θερμικό φορτίο της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας του στοιχείου με το εκάστοτε οριακό μηχανικό φορτίο.

Παρακάτω, δίνεται το διάγραμμα καμπτικής ροπής στην επιφάνεια της ενιαίας πλάκας – κεφαλόδεσμου, θεωρώντας δύο αντιπροσωπευτικές τομές κατά  $x$  και  $y$ . Για τη φόρτιση LC9 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 874 kNm/m κατά τη διεύθυνση  $y$  (Σχήμα 5.1). Αντίστοιχα, για τη φόρτιση LC10 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 873 kNm/m κατά τη διεύθυνση  $y$  (Σχήμα 5.12).



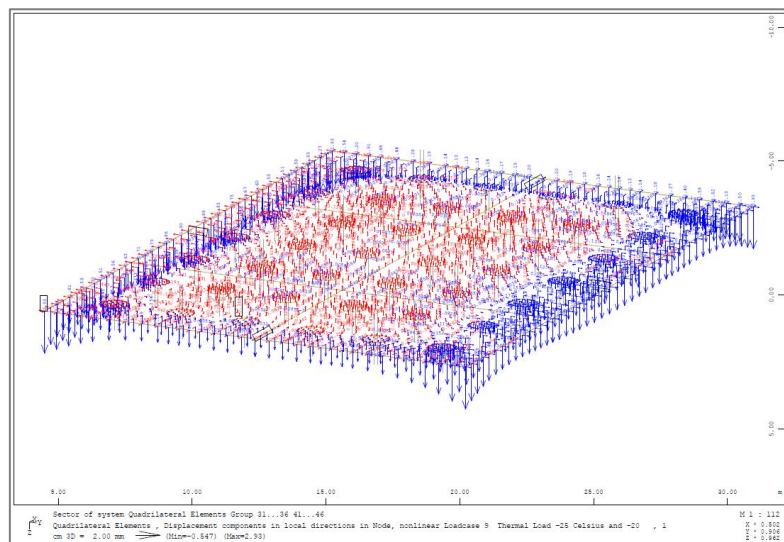


Σχήμα 5.1 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC9. (Sofistik)

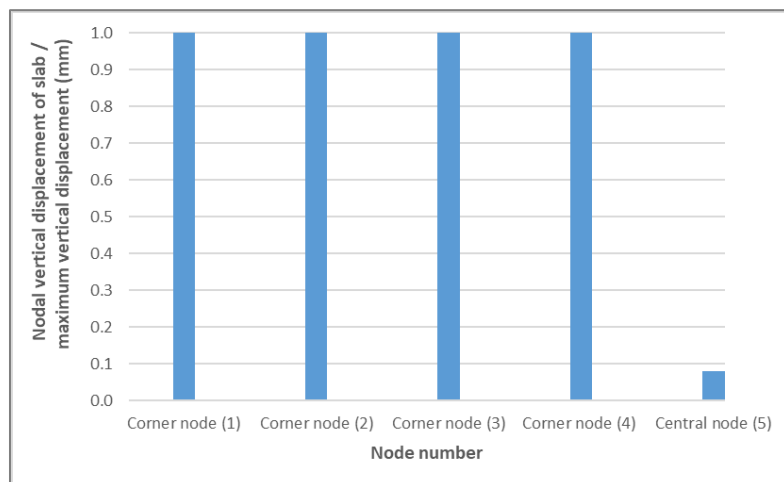


Σχήμα 5.2 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC10. (Sofistik)

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η εικόνα των επικόμβιων μετακινήσεων κατά τον άξονα z (καθιζήσεις) στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης κατά την επιβολή της φόρτισης LC9. Η αρνητική ομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικά του στοιχείου της πλάκας (ψύξη) συρρικνώνει το στοιχείο, προκαλώντας καμπύλωση των διαστάσεων του προς τα κάτω. Μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις εκδηλώνονται στις γωνίες. Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους της καμπυλότητας που προκαλούν οι προκύπτουσες καθιζήσεις στο επιφανειακό στοιχείο παρουσιάζεται το Σχήμα 5.4, στο οποίο απεικονίζεται το κανονικοποιημένο γραφήμα της επικόμβιας κατακόρυφης μετακίνησης των χαρακτηριστικών κόμβων στις τέσσερις γωνίες και στο κέντρο της πλάκας προς τη μέγιστη κατακόρυφη επικόμβια μετακίνηση που συμπίπτει με την κατακόρυφη μετακίνηση των γωνιακών κόμβων.

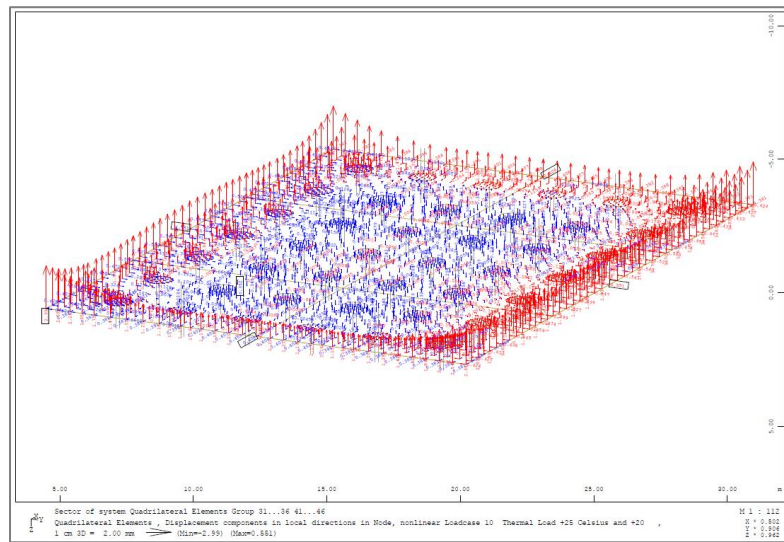


Σχήμα 5.3 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC9. (Sofistik)

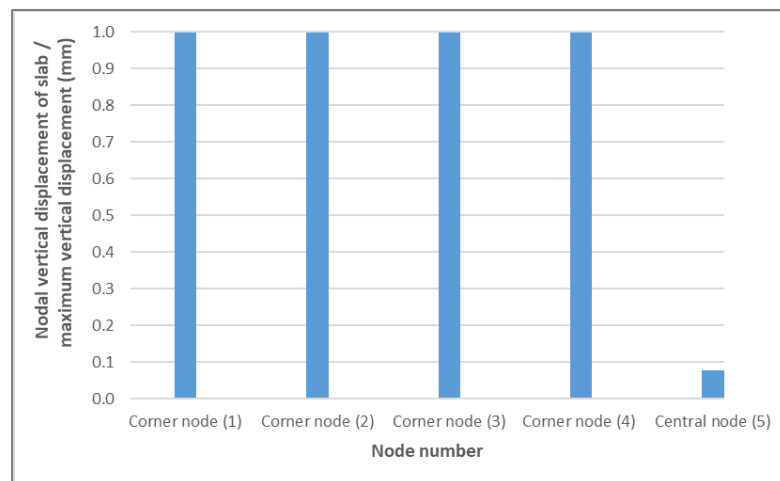


Σχήμα 5.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC9.

Το αντίστροφο φαινόμενο παρατηρείται κατά την επίδραση της φόρτισης LC10 (Σχήμα 5.5). Η θετική μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικά της πλάκας (θέρμανση) διογκώνει το στοιχείο, προκαλώντας καμπύλωση των διαστάσεών του προς τα άνω. Ως εκτούτου, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή περιμετρικά της κοιτόστρωσης έχουν διεύθυνση κατά τον αρνητικό άξονα  $z$ , ενώ εσωτερικά του στοιχείου οι μετακινήσεις είναι αντίρροπες. Μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις εκδηλώνονται στις γωνίες. Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους της καμπυλότητας που προκαλούν οι προκύπτουσες καθιζήσεις στο επιφανειακό στοιχείο παρουσιάζεται το Σχήμα 5.6, στο οποίο απεικονίζεται το κανονικοποιημένο γραφήμα της επικόμβιας κατακόρυφης μετακίνησης των χαρακτηριστικών κόμβων στις τέσσερις γωνίες και στο κέντρο της πλάκας προς τη μέγιστη κατακόρυφη επικόμβια μετακίνηση που συμπίπτει με την κατακόρυφη μετακίνηση των γωνιακών κόμβων.

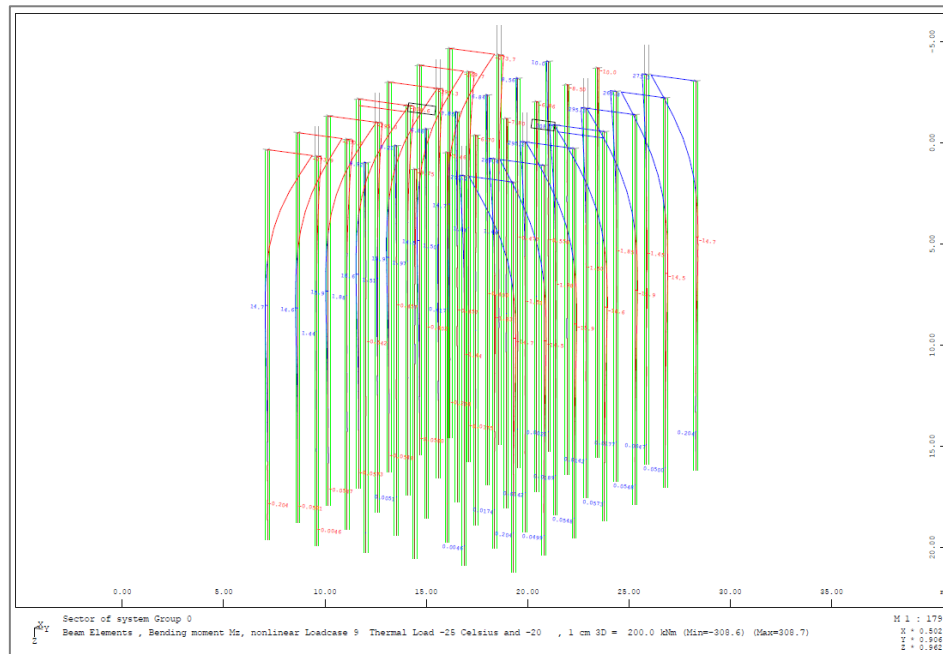


Σχήμα 5.5 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα  $z$  για φόρτιση LC10. (Sofistik)

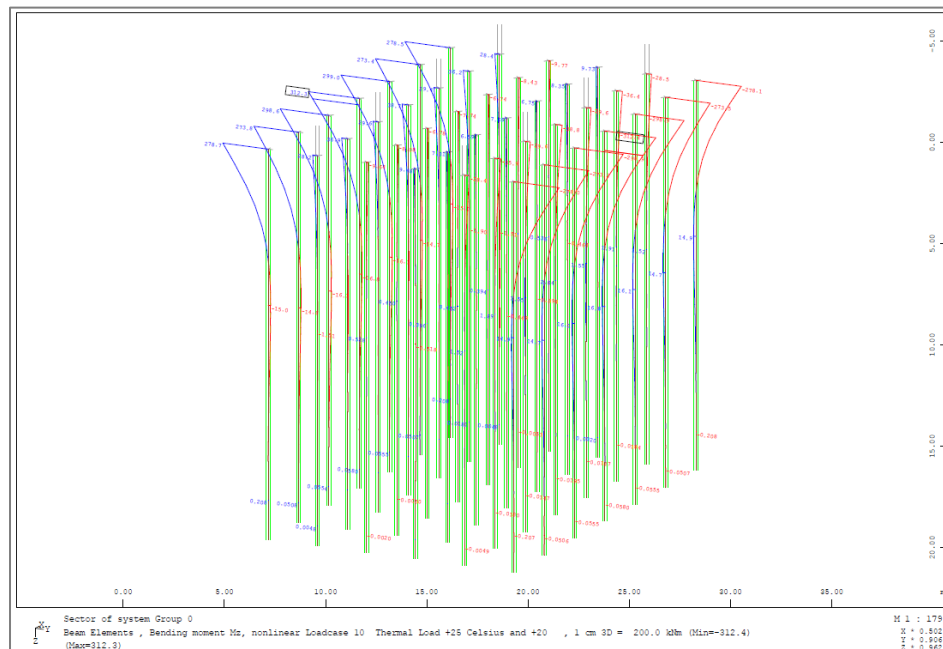


Σχήμα 5.6 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC10.

Επιπλέον παρουσιάζεται το διάγραμμα της μέγιστης καμπτικής ροπής των γραμμικών στοιχείων της ομάδας πασσάλων. Και για τις δύο μηχανικές φορτίσεις φαίνεται πως μεγαλύτερη καμπτική ροπή παραλαμβάνουν οι κεφαλές των εξωτερικών πασσάλων. Για τη φόρτιση LC9 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 309 kNm (Σχήμα 5.7), ενώ για τη φόρτιση LC10 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 313 kNm και αντιστοιχεί στους ίδιους πασσάλους με αριθμό κόμβου κεφαλής 11 και 16 (Σχήμα 5.8).

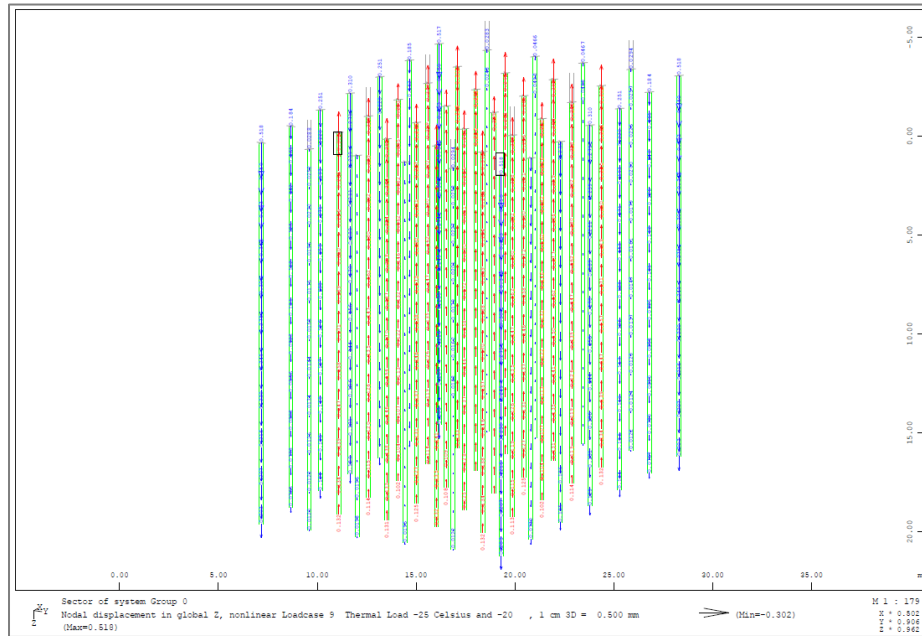


Σχήμα 5.7 Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC9. (Sofistik)

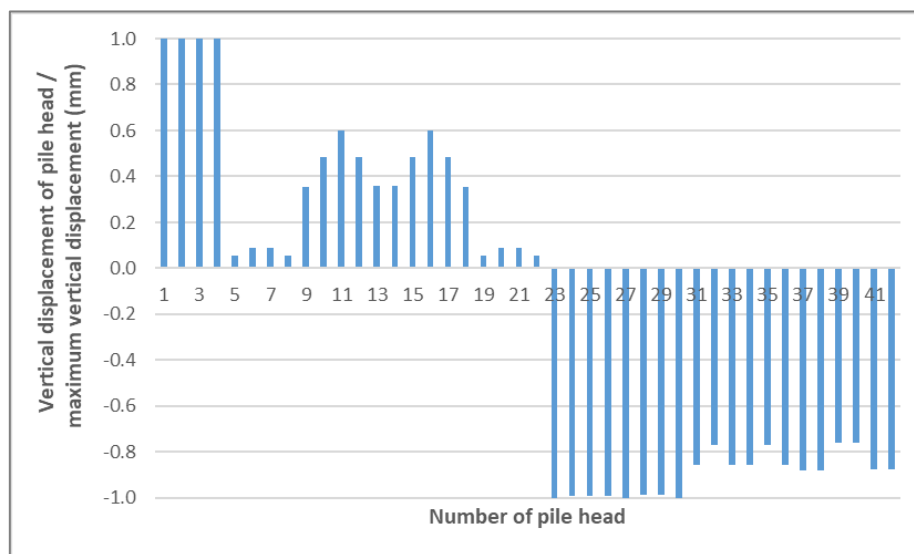


Σχήμα 5.8 Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC10. (Sofistik)

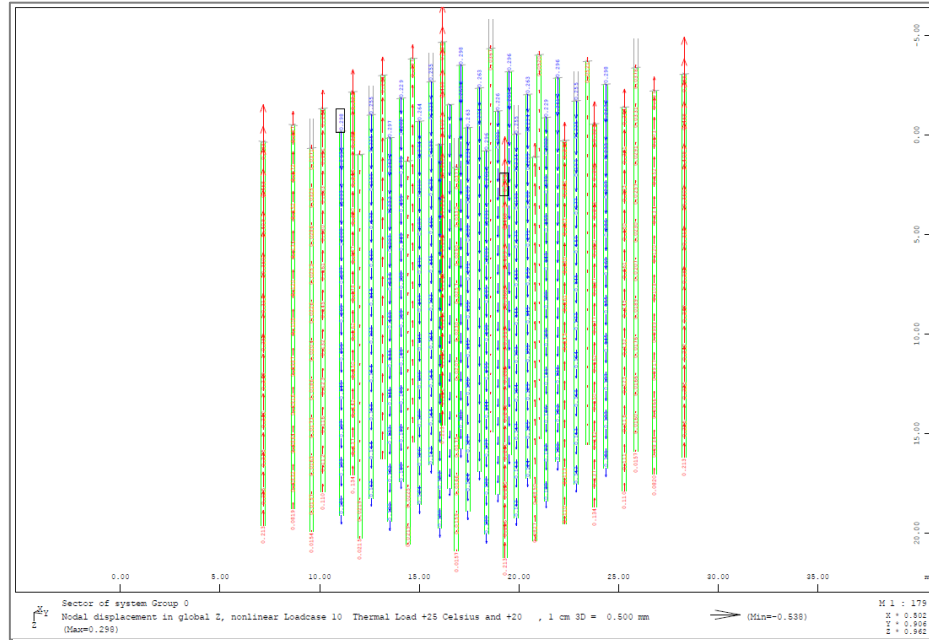
Οι επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις των πασσάλων ακολουθούν κάθε φορά την κύρτωση της γεωμετρίας του ενιαίου κεφαλόδεσμου, αφού είναι πακτωμένοι σε αυτόν. Κατ'αυτόν τον τρόπο προκύπτει πως κατά την ψύξη του κεφαλόδεσμου οι εξωτερικοί πάσσαλοι καθιζάνουν, ενώ οι ενδιάμεσοι και οι εσωτερικοί τείνουν να μετακινούνται προς τα πάνω (Σχήμα 5.9). Το αντίστροφο ισχύει στην περίπτωση θέρμανσης της πλάκας (Σχήμα 5.11). Ακολουθούν τα αντίστοιχα κάθε φορά διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων των πασσάλων, με τις αρνητικές τιμές να δηλώνουν αρνητική φορά (προς τα άνω) (Σχήματα 5.10, 5.12).



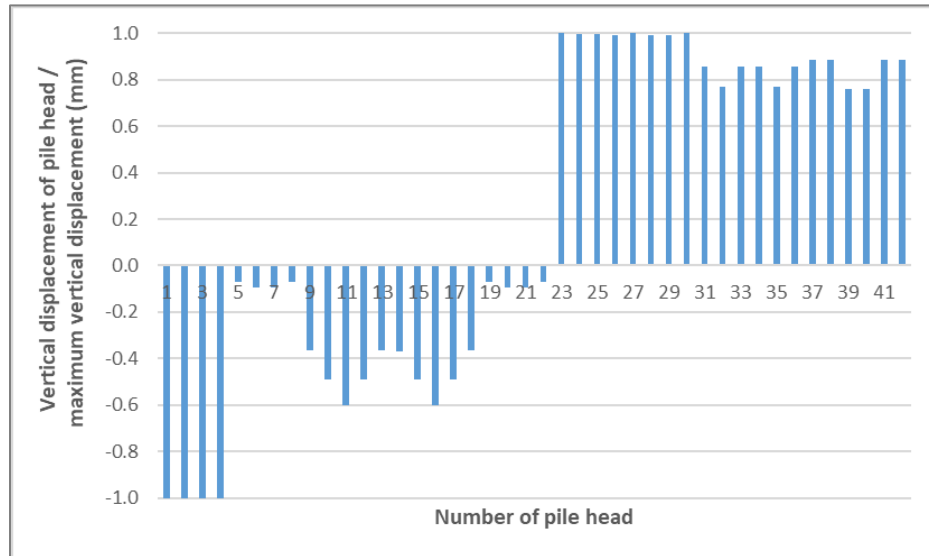
Σχήμα 5.9 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC9. (Sofistik)



Σχήμα 5.10 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC9.

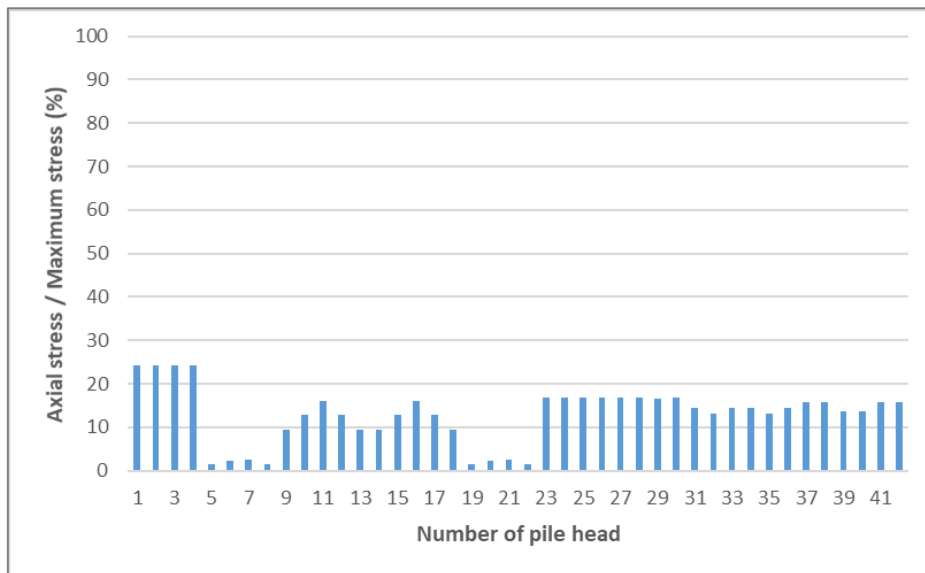


Σχήμα 5.11 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC10. (Sofistik)

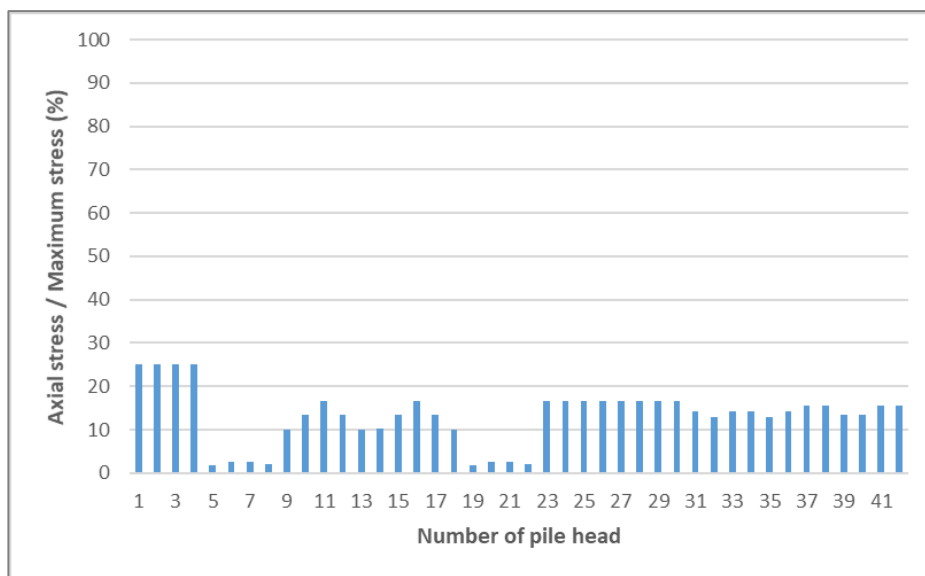


Σχήμα 5.12 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC10.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του βαθμού λειτουργίας των πασσάλων για κάθε μια από τις θερμικές φορτίσεις, εφαρμόζοντας το γερμανικό κανονισμό DIN4014 για την εύρεση της φέρουσας ικανότητας.



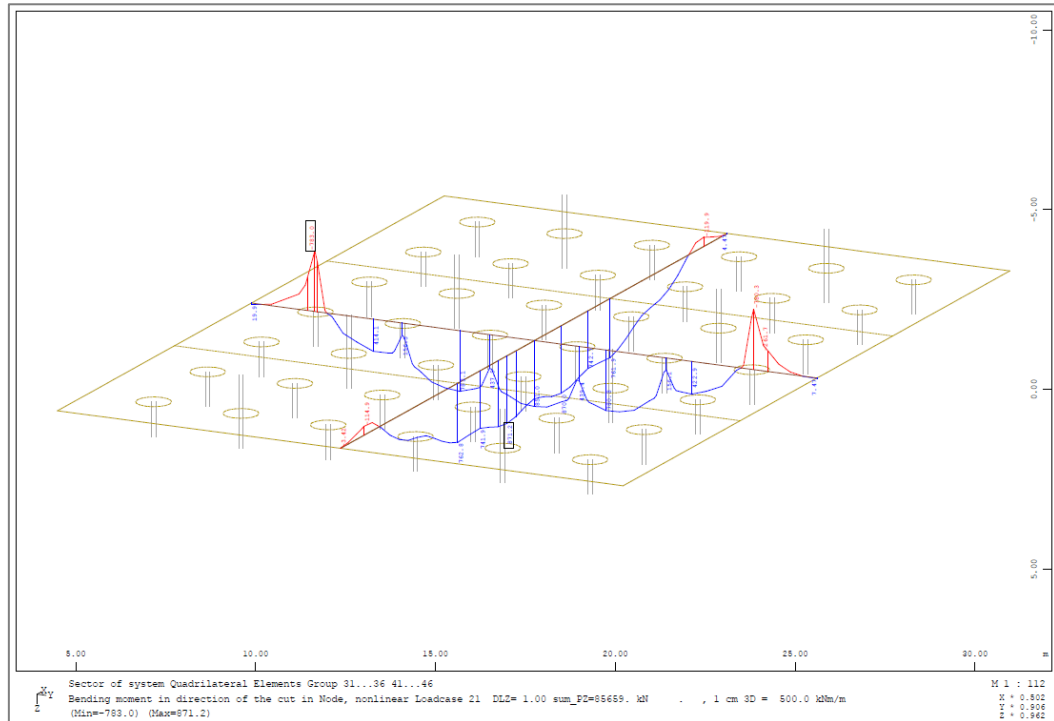
Σχήμα 5.13 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC9.



Σχήμα 5.14 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC10.

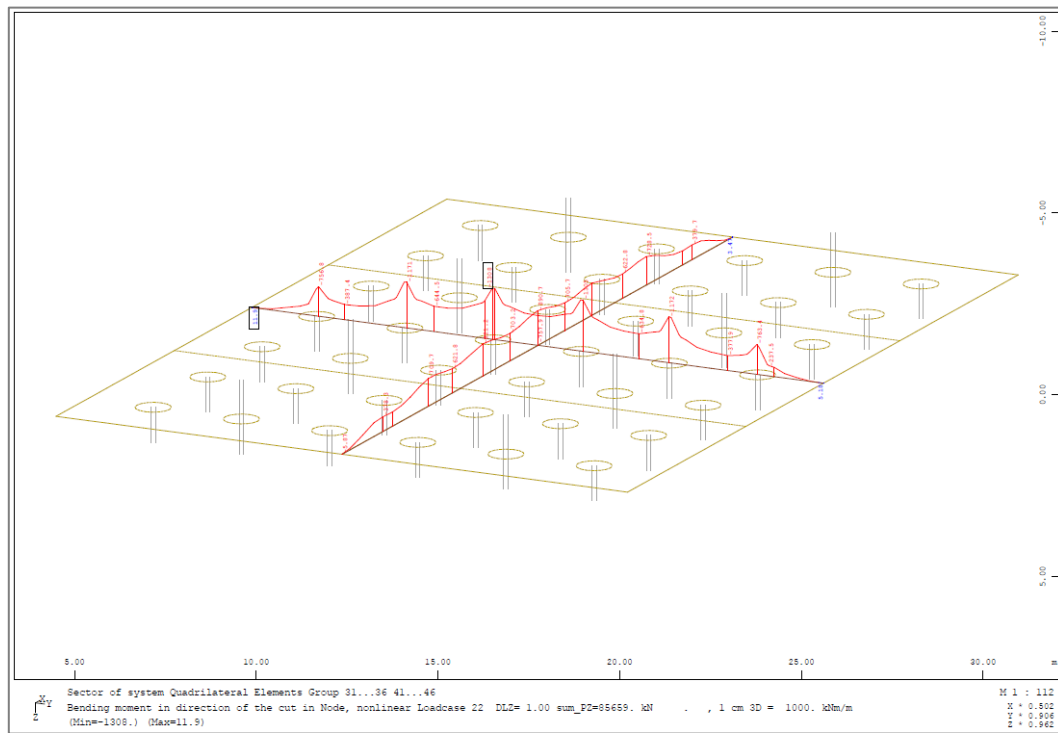
Έχοντας αναλύσει την απόκριση της συνδυασμένης θεμελίωσης κατά την θερμική λειτουργία του ενιαίου κεφαλόδεσμου – γεωεναλλάκτη κατά το έτος, πρόκειται να διερευνηθεί η συμπεριφορά της θεμελίωσης υπό την επίδραση των πιθανών συνδυασμών μηχανικών και θερμικής ανομοιόμορφης φόρτισης, σε συνθήκες δηλαδή που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Υπενθυμίζεται πως οι συνδυασμοί που εξετάζονται συμβολίζονται με LC21, LC22 για θερμική φόρτιση πλάκας σε συνδυασμό με μηχανικό φορτίο ULS και LC31, LC32 για θερμική φόρτιση πλάκας σε συνδυασμό με μηχανικό φορτίο SLS.

Παρακάτω, δίνεται το διάγραμμα καμπτικής ροπής στην επιφάνεια της ενιαίας πλάκας – κεφαλόδεσμου, θεωρώντας δύο αντιπροσωπευτικές τομές κατά x και y. Η μέγιστη τιμή της ροπής για τις φορτίσεις LC21 και LC22 είναι 872 kNm/m κατά τη διεύθυνση y και 1308 kNm/m αντίστοιχα (Σχήματα 5.15, 5.16).



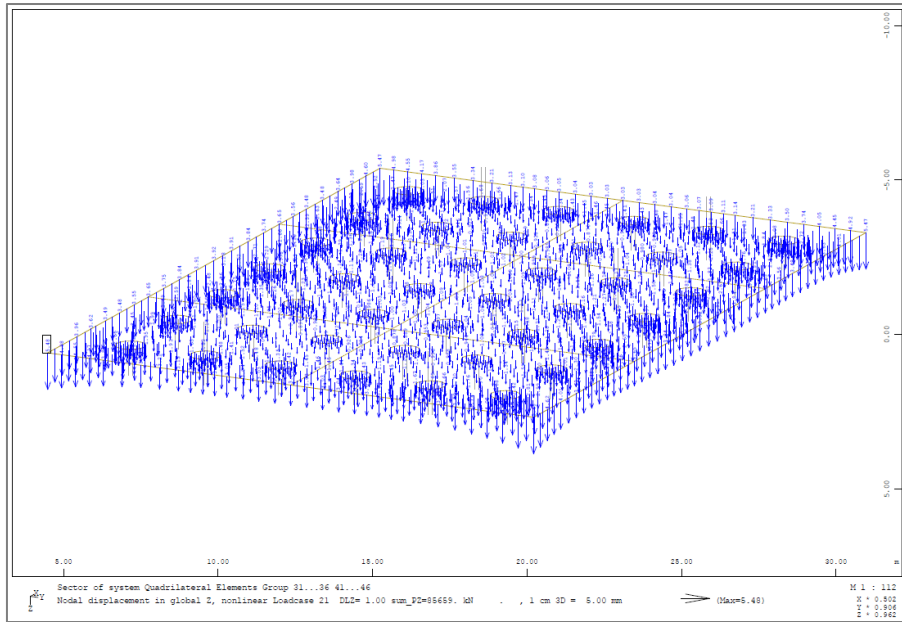
**Σχήμα 5.15** Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik)



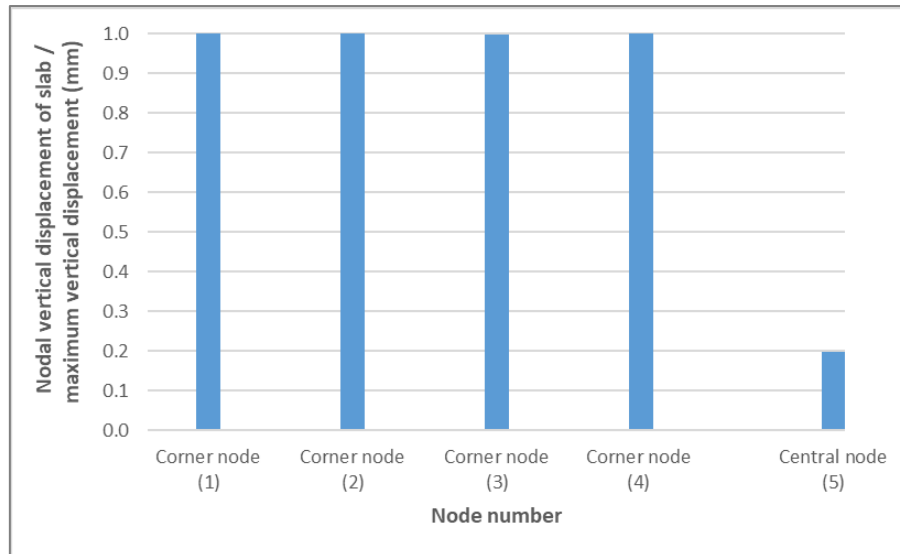


Σχήμα 5.16 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik)

Στο **Σχήμα 5.17** φαίνεται η εικόνα των επικόμβιων μετακινήσεων κατά τον άξονα z (καθιζήσεις) στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης κατά την επιβολή της φόρτισης LC21. Όπως έχει ήδη περιγραφτεί, η αρνητική μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικά του στοιχείου της πλάκας (ψύξη) συρρικνώνει το στοιχείο, προκαλώντας καμπύλωση των διαστάσεών του προς τα κάτω. Η ίδια παραμόρφωση παρατηρείται και κατά την επιβολή του μηχανικού φορτίου. Ως εκτούτου, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή περιμετρικά της κοιτόστρωσης έχουν διεύθυνση κατά το θετικό άξονα z με τις μεγαλύτερες τιμές να εκδηλώνονται στις γωνίες. Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους της καμπυλότητας που προκαλούν οι προκύπτουσες καθιζήσεις στο επιφανειακό στοιχείο παρουσιάζεται το **Σχήμα 5.18**, στο οποίο απεικονίζεται το κανονικοποιημένο γραφήμα της επικόμβιας κατακόρυφης μετακίνησης των χαρακτηριστικών κόμβων στις τέσσερις γωνίες και στο κέντρο της πλάκας προς τη μέγιστη κατακόρυφη επικόμβια μετακίνηση που συμπίπτει με την κατακόρυφη μετακίνηση των γωνιακών κόμβων.



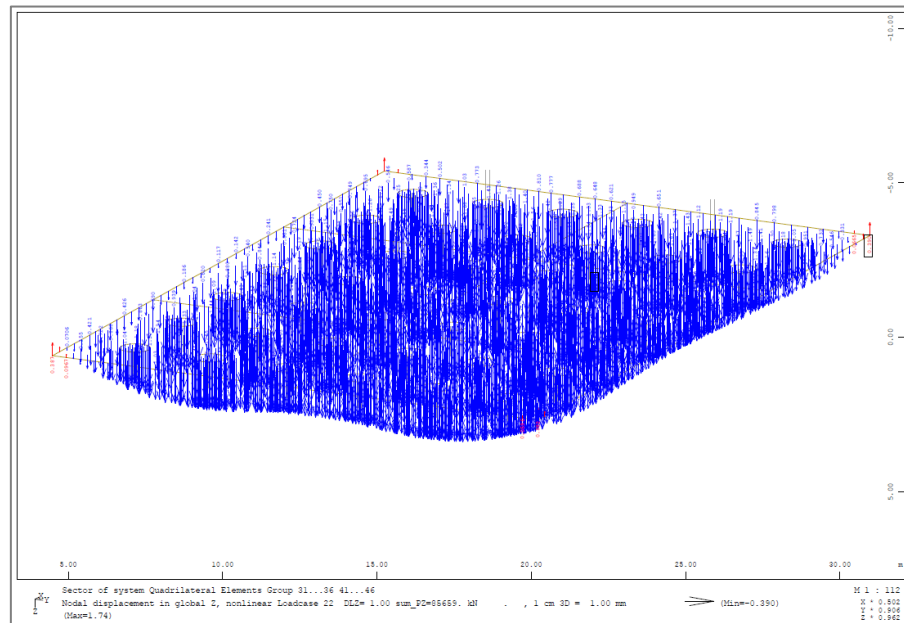
Σχήμα 5.17 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC21. (Sofistik)



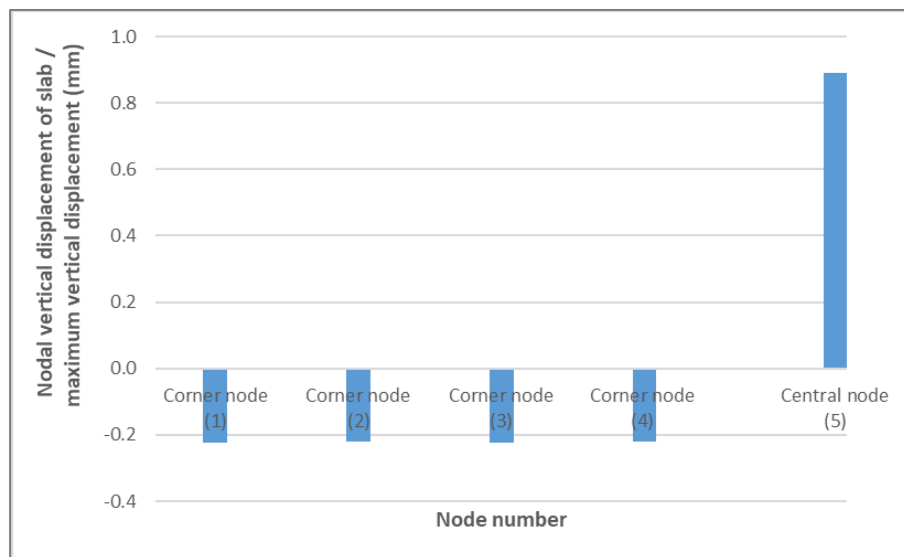
Σχήμα 5.18 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC21.

Το αντίστροφο φαινόμενο παρατηρείται κατά την επίδραση της φόρτισης LC22. Η θετική μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικά της πλάκας (θέρμανση) διογκώνει το στοιχείο, προκαλώντας καμπύλωση των διαστάσεών του προς τα άνω. Ως εκτούτου, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή περιμετρικά της κοιτόστρωσης έχουν διεύθυνση κατά τον αρνητικό άξονα z, ενώ εσωτερικά του στοιχείου οι μετακινήσεις είναι αντίρροπες. Ωστόσο, μεγάλο τμήμα της τάσης προς τα άνω αναιρείται λόγω της παραμόρφωσης που προκύπτει από την επιβολή του

μηχανικού φορτίου και κατά συνέπεια οι μετακινήσεις με διεύθυνση κατά τον αρνητικό άξονα z περιορίζονται στις γωνίες (Σχήμα 5.19). Η μέγιστη καθίζηση συναντάται εκτός των χαρακτηριστικών σημείων, στις κεφαλές 31, 33 και 34, 36. Το ποσοστό της κατακόρυφης μετακίνησης των χαρακτηριστικών σημείων συγκριτικά με τη μέγιστη μετακίνηση απεικονίζεται στο Σχήμα 5.20.

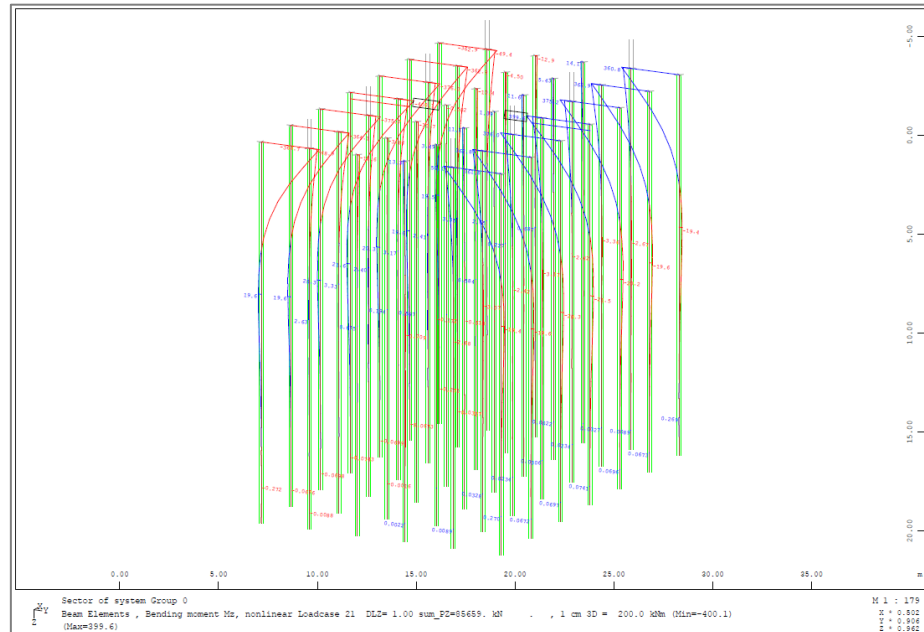


Σχήμα 5.19 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC22. (Sofistik)

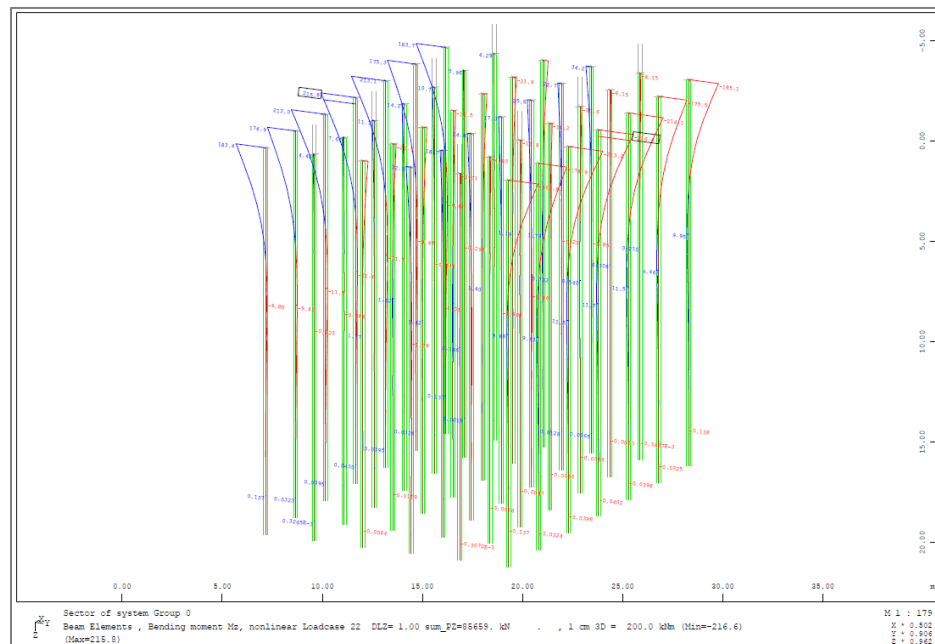


Σχήμα 5.20 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC22.

Επιπλέον παρουσιάζεται το διάγραμμα της μέγιστης καμπτικής ροπής των γραμμικών στοιχείων της ομάδας πασσάλων. Και για τους τέσσερις συνδυασμούς φορτίσεων φαίνεται πως μεγαλύτερη καμπτική ροπή παραλαμβάνουν οι κεφαλές των εξωτερικών πασσάλων κατά τη μεγαλύτερη διεύθυνση  $x$  του ενιαίου κεφαλόδεσμου. Για τη φόρτιση LC21 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 400 kNm και αντιστοιχεί στους εξωτερικούς πασσάλους με αριθμό κόμβου κεφαλής 11 και 16 (Σχήμα 5.21), ενώ για τη φόρτιση LC22 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 216 kNm και αντιστοιχεί στους γωνιακούς πασσάλους με αριθμό κόμβου κεφαλής 11 και 16 (Σχήμα 5.22).

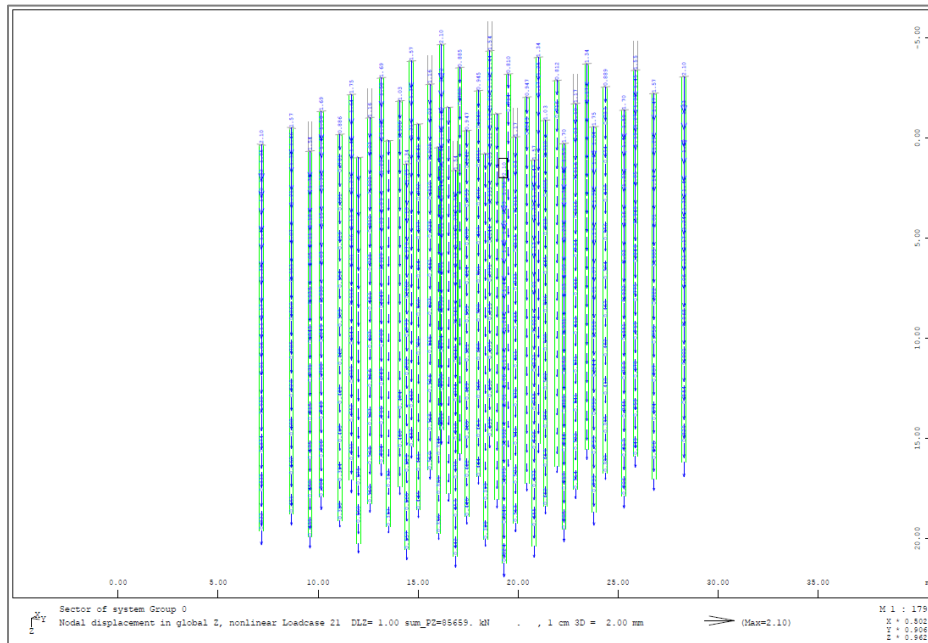


Σχήμα 5.21 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik)

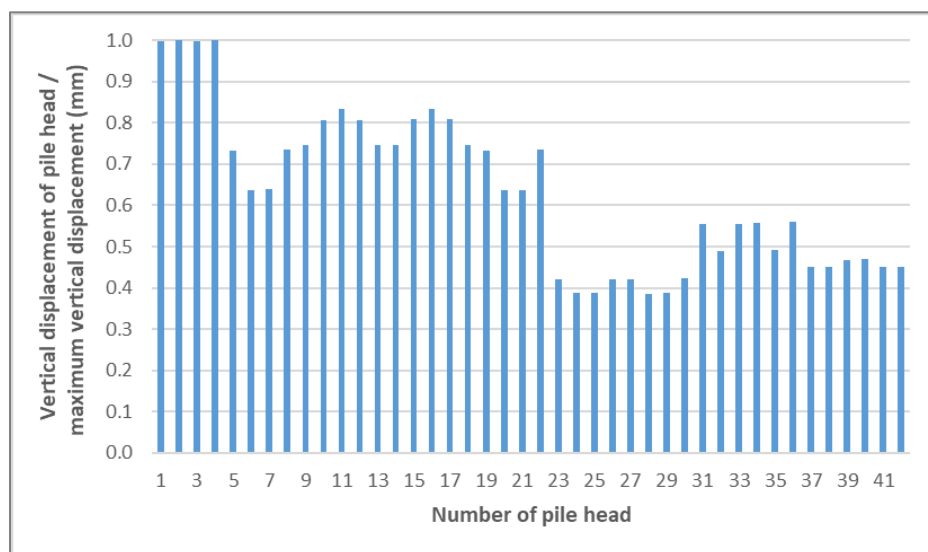


Σχήμα 5.22 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC22. (Sofistik)

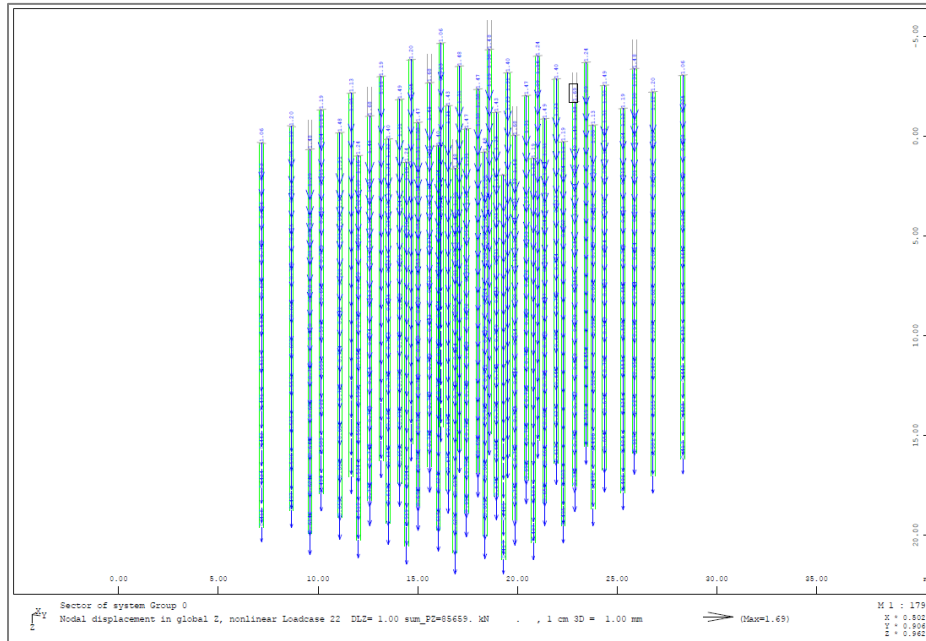
Οι επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις των πασσάλων ακολουθούν κάθε φορά την κύρτωση της γεωμετρίας του ενιαίου κεφαλόδεσμου, αφού είναι πακτωμένοι σε αυτόν. Κατ'αυτόν τον τρόπο προκύπτει πως στην περίπτωση συνδυασμού μηχανικών και θερμικών φορτίσεων οι πάσσαλοι καθιζάνουν στο σύνολό τους κατά το θετικό άξονα z. Στα Σχήματα 5.23, 5.25 φαίνονται οι διευθύνσεις των καθιζήσεων και ακολουθούν τα αντίστοιχα κάθε φορά διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων των πασσάλων (Σχήματα 5.24, 5.26).



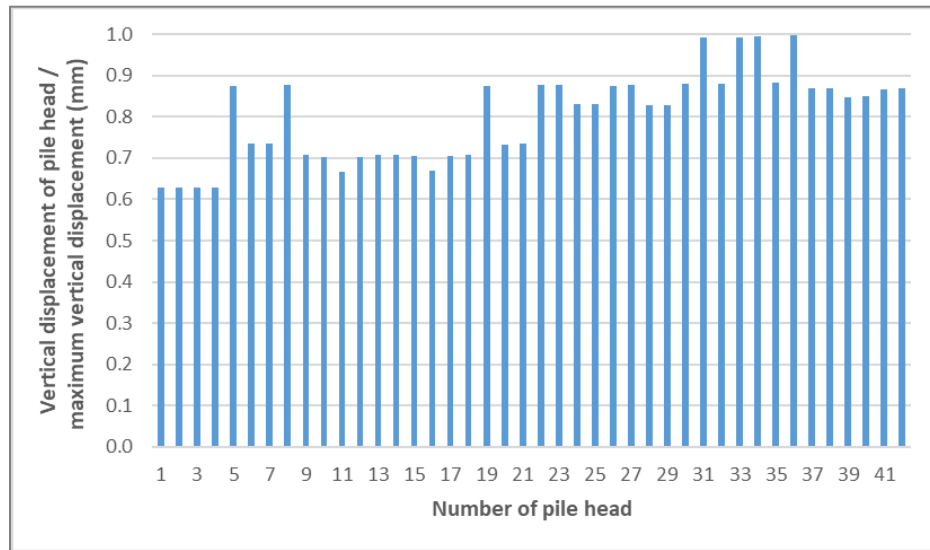
Σχήμα 5.23 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC21. (Sofistik)



Σχήμα 5.24 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC21.

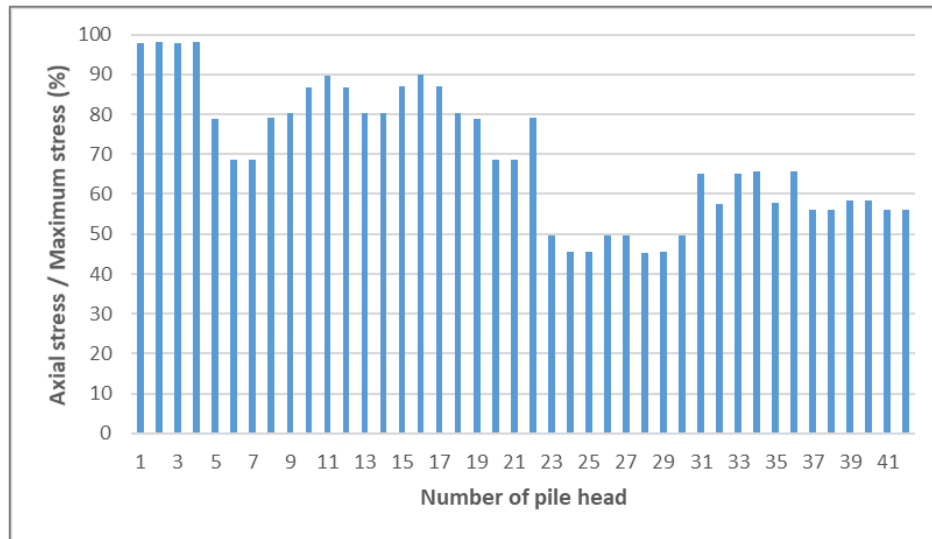


Σχήμα 5.25 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC22. (Sofistik)

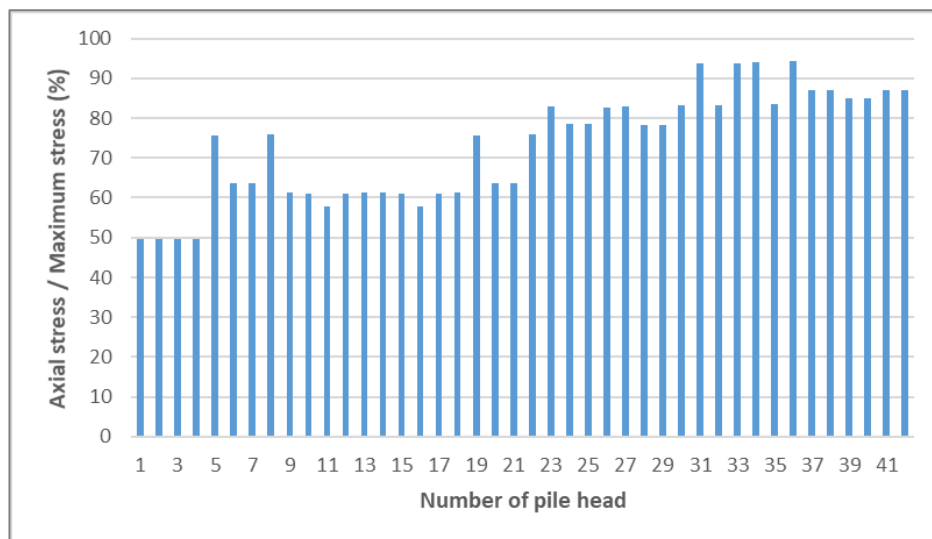


Σχήμα 5.26 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC22.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του βαθμού λειτουργίας των πασσάλων για κάθε μια από τις θερμικές φορτίσεις, εφαρμόζοντας το γερμανικό κανονισμό DIN4014 για την εύρεση της φέρουσας ικανότητας.



Σχήμα 5.27 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC21.

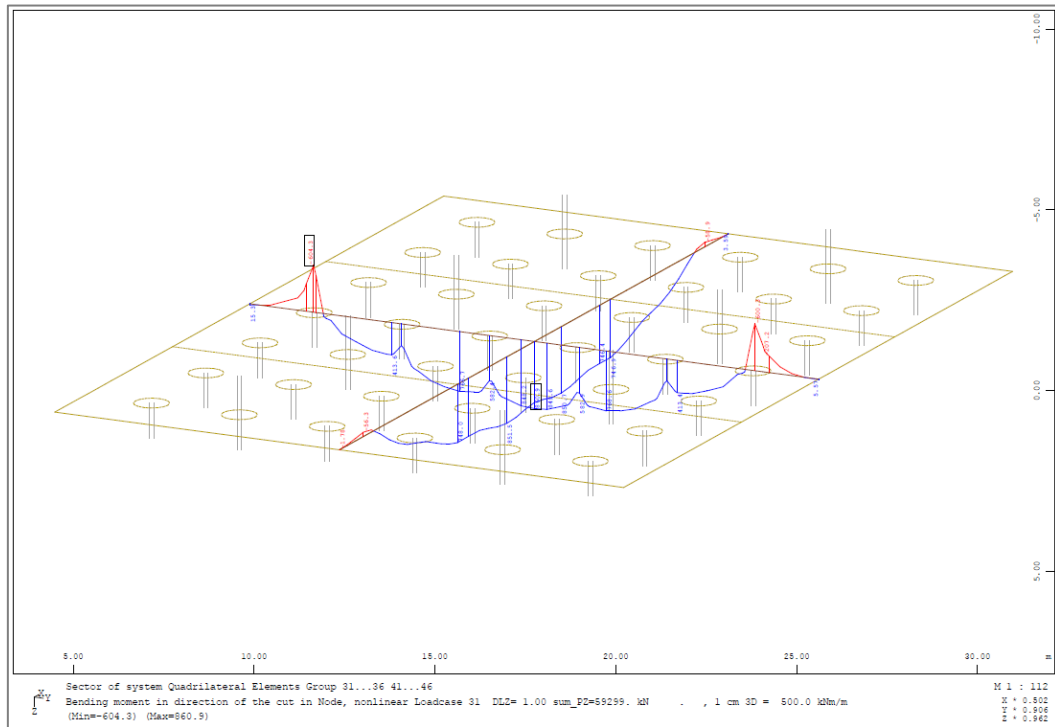


Σχήμα 5.28 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC22.

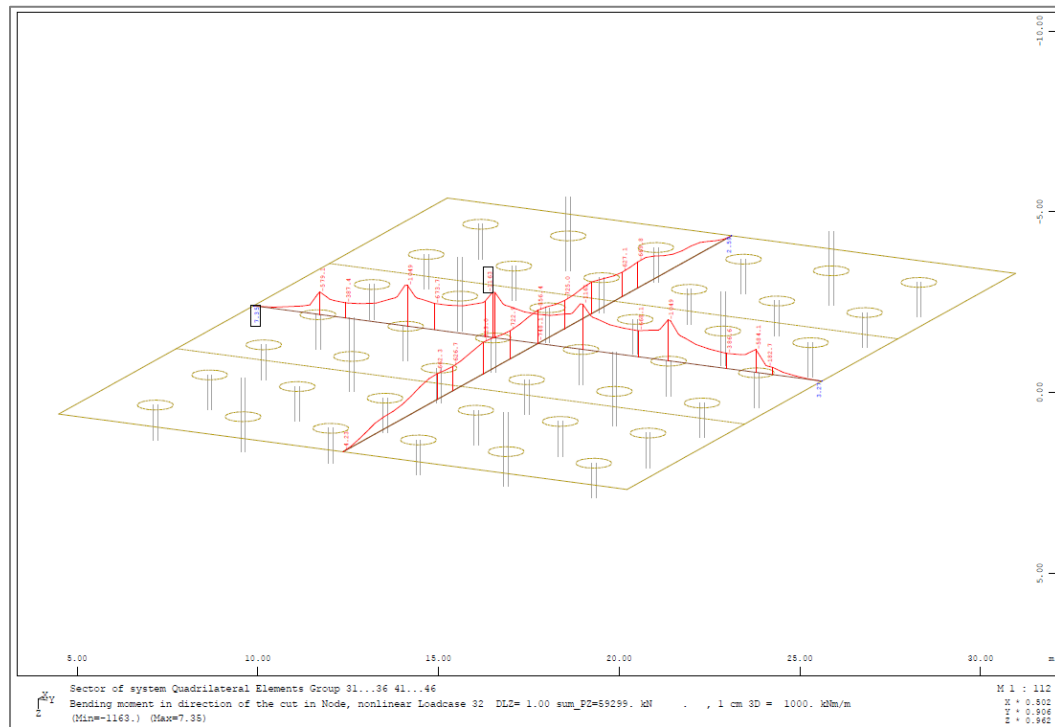
Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια σειρά αποτελεσμάτων για το συνδυασμό των βασικών θερμικών φορτίσεων της κοιτόστρωσης με το μηχανικό φορτίο SLS. Υπενθυμίζεται πως οι φορτίσεις αυτές ορίζονται ως LC31 και LC32.

Παρακάτω, δίνεται το διάγραμμα καμπτικής ροπής στην επιφάνεια της ενιαίας πλάκας – κεφαλόδεσμου, θεωρώντας δύο αντιπροσωπευτικές τομές κατά x και y. Η μέγιστη τιμή της

ροπής για τις φορτίσεις LC31 και LC32 είναι 861 kNm/m κατά τη διεύθυνση  $\gamma$  και 1163 kNm/m αντίστοιχα (Σχήματα 5.29, 5.30).



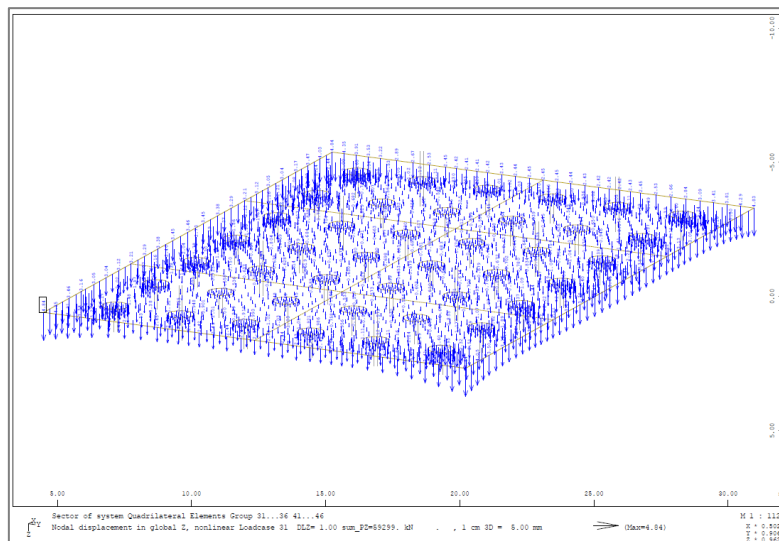
Σχήμα 5.29 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC31. (Sofistik)



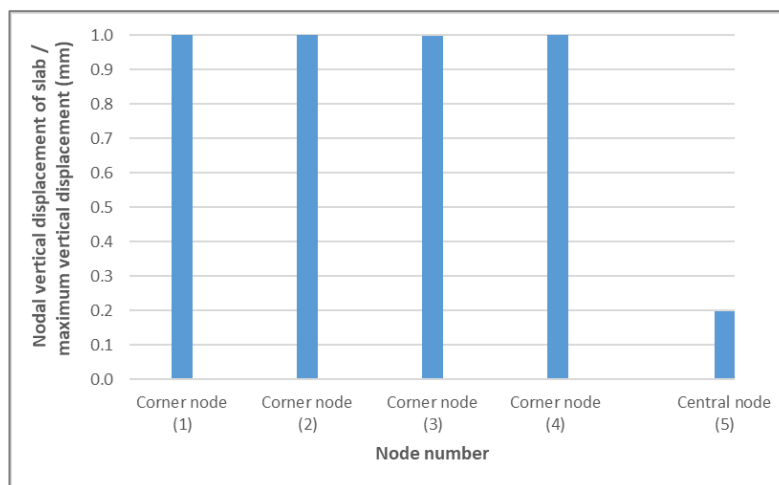
Σχήμα 5.30 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC32. (Sofistik)



Στο Σχήμα 5.31 φαίνεται η εικόνα των επικόμβιων μετακινήσεων κατά τον άξονα z (καθιζήσεις) στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης κατά την επιβολή της φόρτισης LC31. Όπως έχει ήδη περιγραφεί, η αρνητική μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικά του στοιχείου της πλάκας (ψύξη) συρρικνώνει το στοιχείο, προκαλώντας καμπύλωση των διαστάσεων του προς τα κάτω. Η ίδια παραμόρφωση παρατηρείται και κατά την επιβολή του μηχανικού φορτίου. Ως εκτούτου, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή περιμετρικά της κοιτόστρωσης έχουν διεύθυνση κατά το θετικό άξονα z με τις μεγαλύτερες τιμές να εκδηλώνονται στις γωνίες. Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους της καμπυλότητας που προκαλούν οι προκύπτουσες καθιζήσεις στο επιφανειακό στοιχείο παρουσιάζεται το Σχήμα 5.32, στο οποίο απεικονίζεται το κανονικοποιημένο γραφήμα της επικόμβιας κατακόρυφης μετακίνησης των χαρακτηριστικών κόμβων στις τέσσερις γωνίες και στο κέντρο της πλάκας προς τη μέγιστη κατακόρυφη επικόμβια μετακίνηση που συμπίπτει με την κατακόρυφη μετακίνηση των γωνιακών κόμβων.

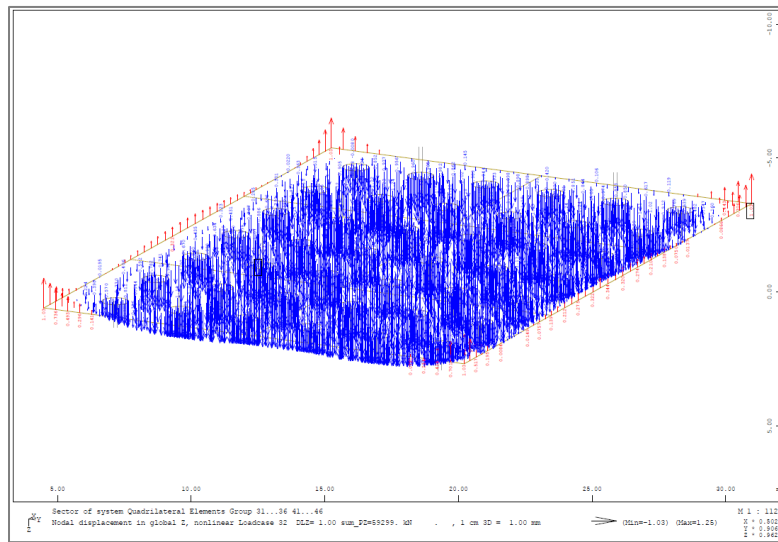


Σχήμα 5.31 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC31. (Sofistik)

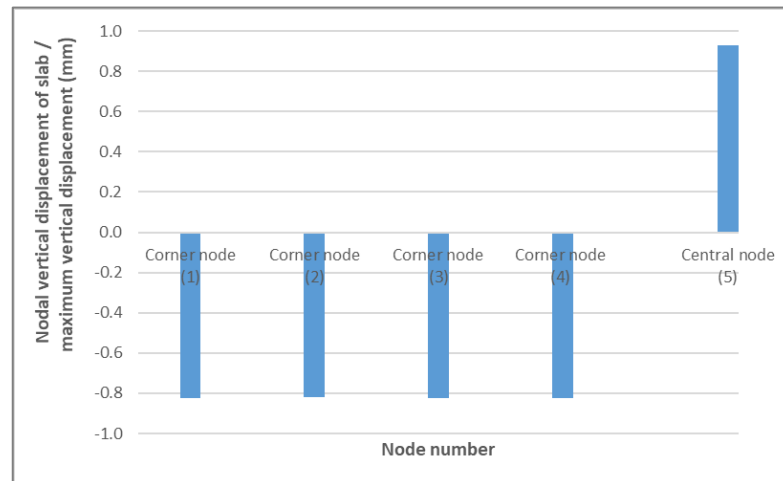


Σχήμα 5.32 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC31.

Το αντίστροφο φαινόμενο παρατηρείται κατά την επίδραση της φόρτισης LC32. Η θετική μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικά της πλάκας (θέρμανση) διογκώνει το στοιχείο, προκαλώντας καμπύλωση των διαστάσεων του προς τα άνω. Ως εκτούτου, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή περιμετρικά της κοιτόστρωσης έχουν διεύθυνση κατά τον αρνητικό άξονα z, ενώ εσωτερικά του στοιχείου οι μετακινήσεις είναι αντίρροπες. Ωστόσο, μεγάλο τμήμα της τάσης προς τα άνω αναιρείται λόγω της παραμόρφωσης που προκύπτει από την επιβολή του μηχανικού φορτίου και κατά συνέπεια οι μετακινήσεις με διεύθυνση κατά τον αρνητικό άξονα z περιορίζονται στις γωνίες (Σχήμα 5.33). Η μέγιστη καθίζηση συναντάται εκτός των χαρακτηριστικών σημείων, στις κεφαλές των ενδιάμεσων πασσάλων 31, 33 και 34, 36. Το ποσοστό της κατακόρυφης μετακίνησης των χαρακτηριστικών σημείων συγκριτικά με τη μέγιστη μετακίνηση απεικονίζεται στο Σχήμα 5.34.

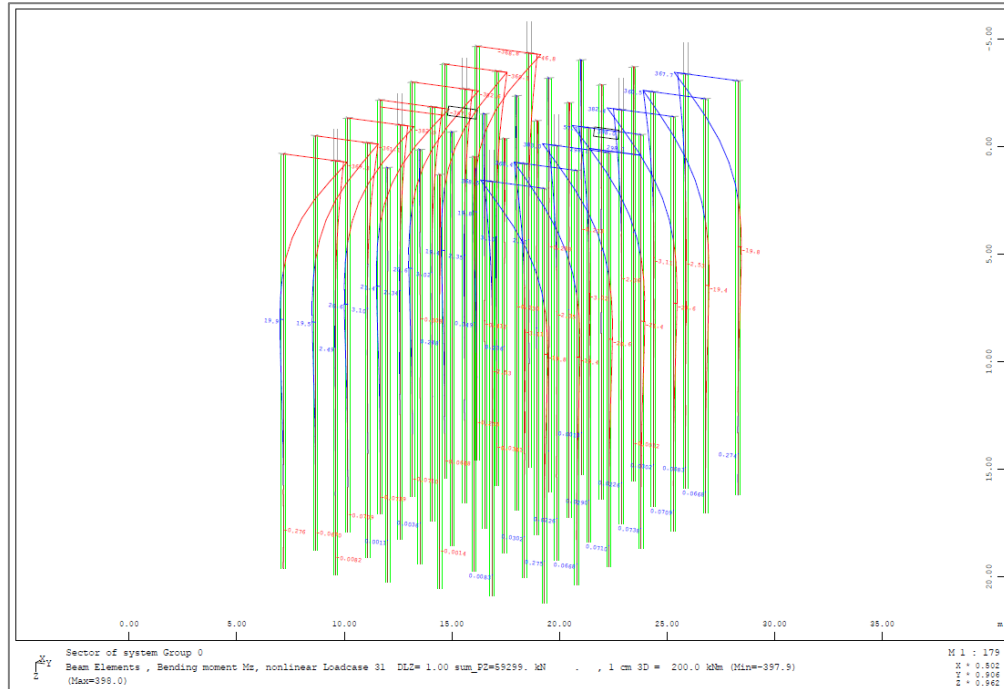


Σχήμα 5.33 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC32. (Sofistik)

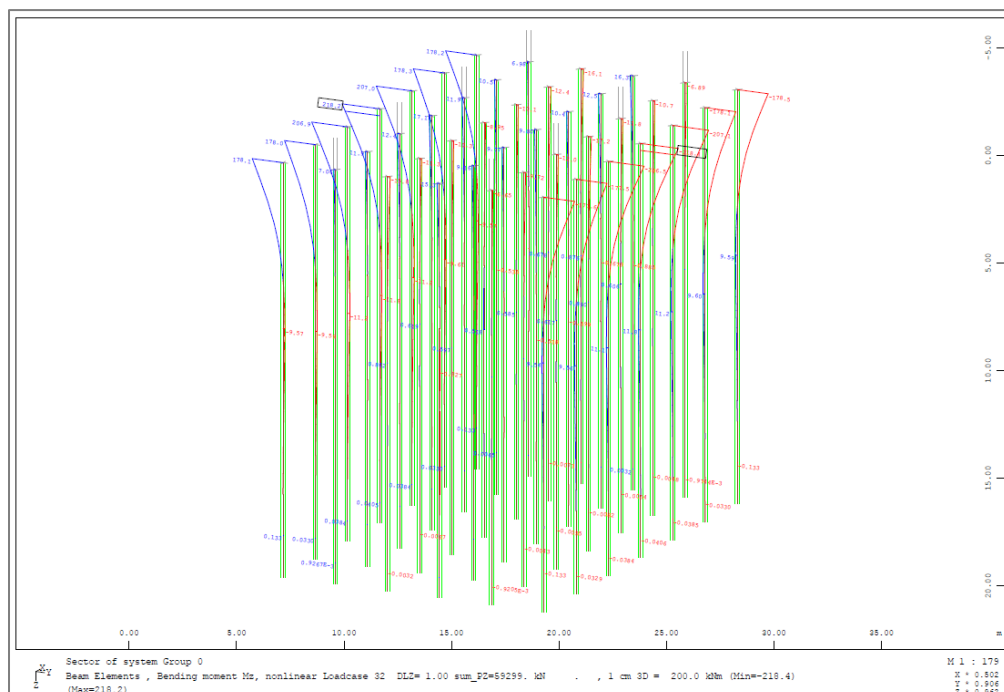


Σχήμα 5.34 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC32.

Επιπλέον παρουσιάζεται το διάγραμμα της μέγιστης καμπτικής ροπής των γραμμικών στοιχείων της ομάδας πασσάλων. Για τη φόρτιση LC31 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 400 kNm και αντιστοιχεί στους εξωτερικούς κεντρικούς πασσάλους με αριθμό κόμβου κεφαλής 11 και 16 (Σχήμα 5.35), ενώ για τη φόρτιση LC32 η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 216 kNm και αντιστοιχεί στις κεφαλές των ίδιων πασσάλων (Σχήμα 5.36).

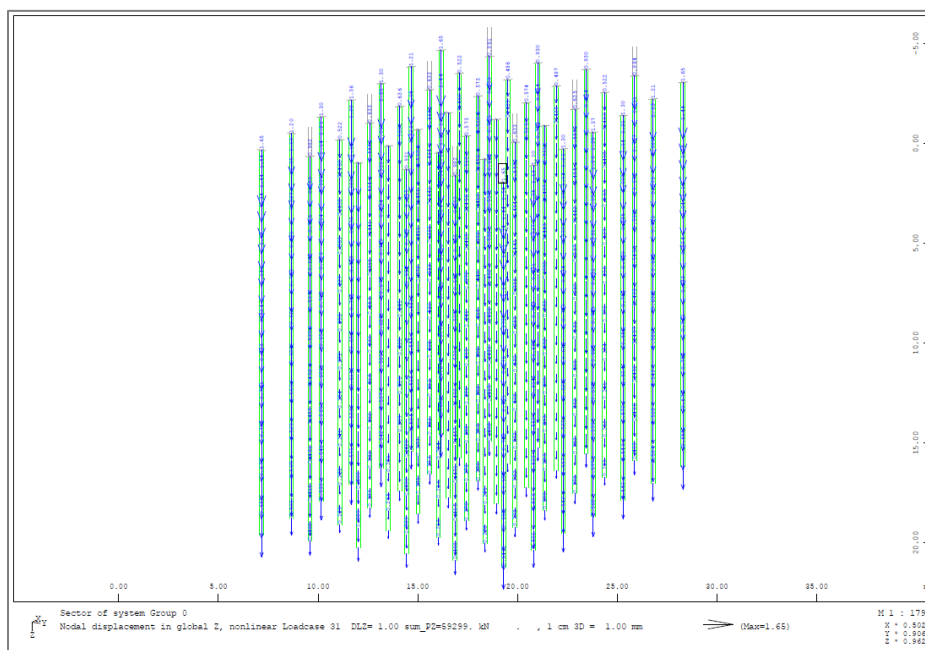


Σχήμα 5.35 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC31. (Sofistik)

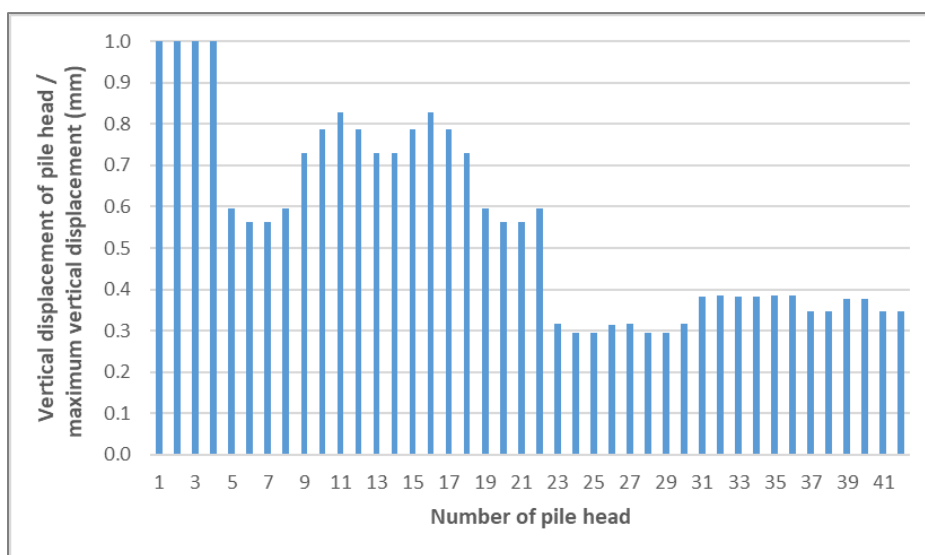


Σχήμα 5.36 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC32. (Sofistik)

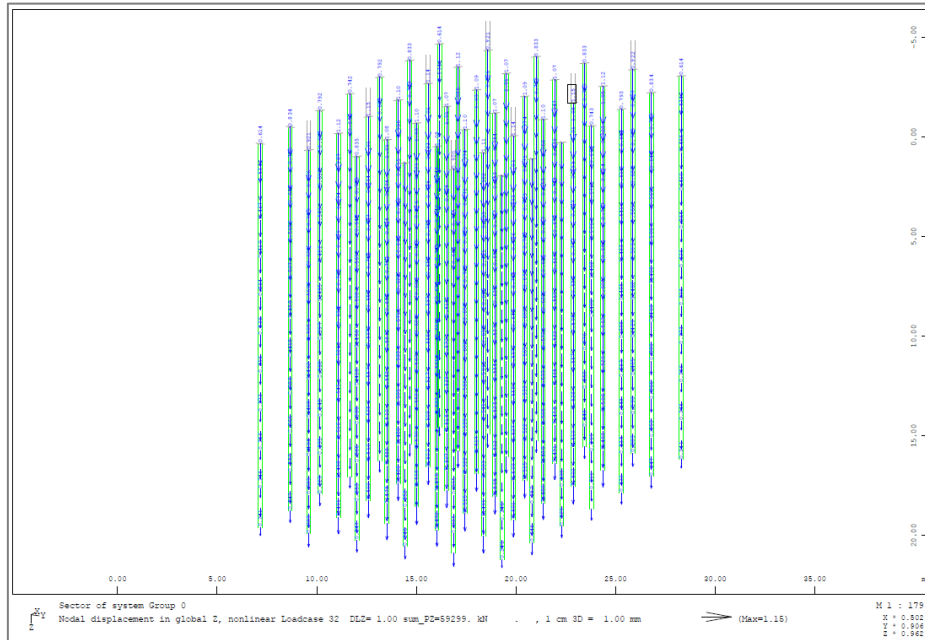
Οι επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις των πασσάλων ακολουθούν κάθε φορά την κύρτωση της γεωμετρίας του ενιαίου κεφαλόδεσμου, αφού είναι πακτωμένοι σε αυτόν. Κατ'αυτόν τον τρόπο προκύπτει πως στην περίπτωση συνδυασμού μηχανικών και θερμικών φορτίσεων οι πάσσαλοι καθιζάνουν στο σύνολό τους κατά το θετικό άξονα z. Στα Σχήματα 5.37, 5.39 φαίνονται οι διευθύνσεις των καθιζήσεων και ακολουθούν τα αντίστοιχα κάθε φορά διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων των πασσάλων (Σχήματα 5.38, 5.40).



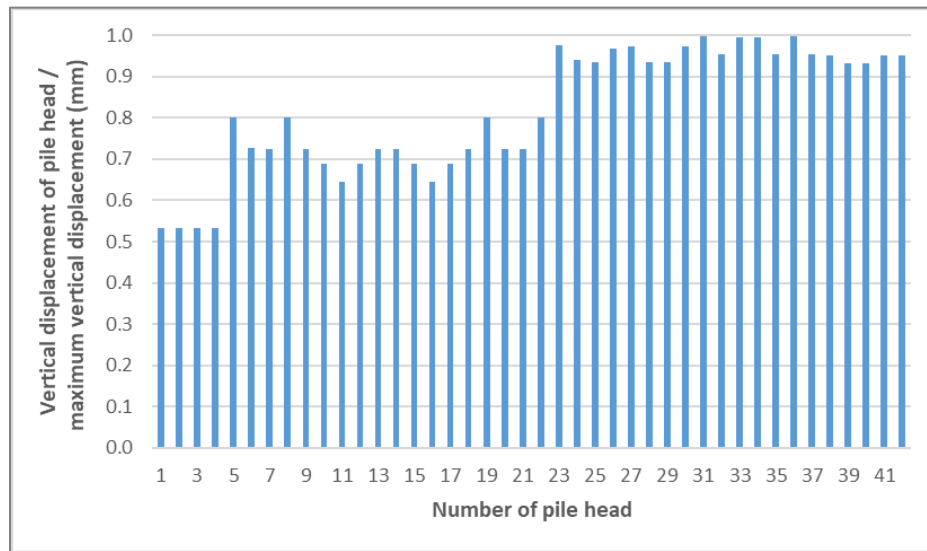
Σχήμα 5.37 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC31. (Sofistik)



Σχήμα 5.38 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC31.

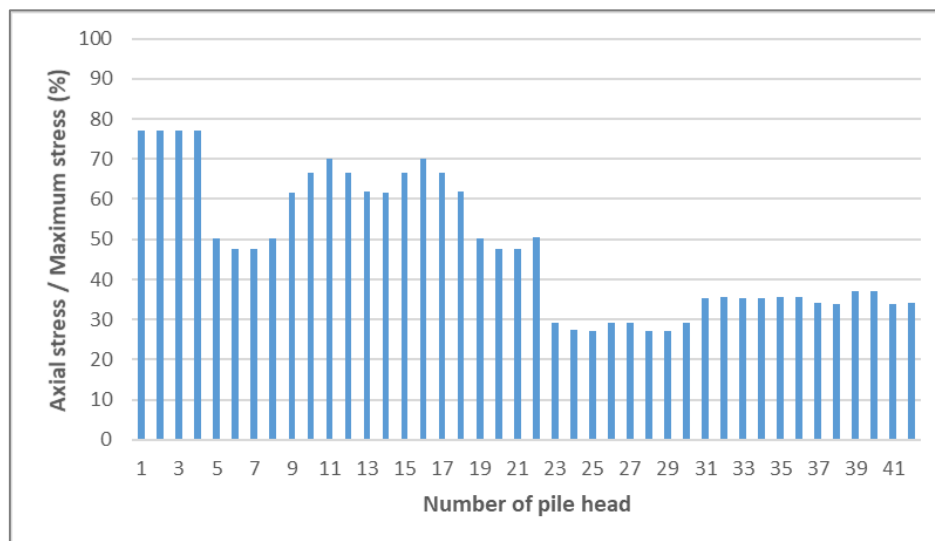


Σχήμα 5.39 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC32. (Sofistik)

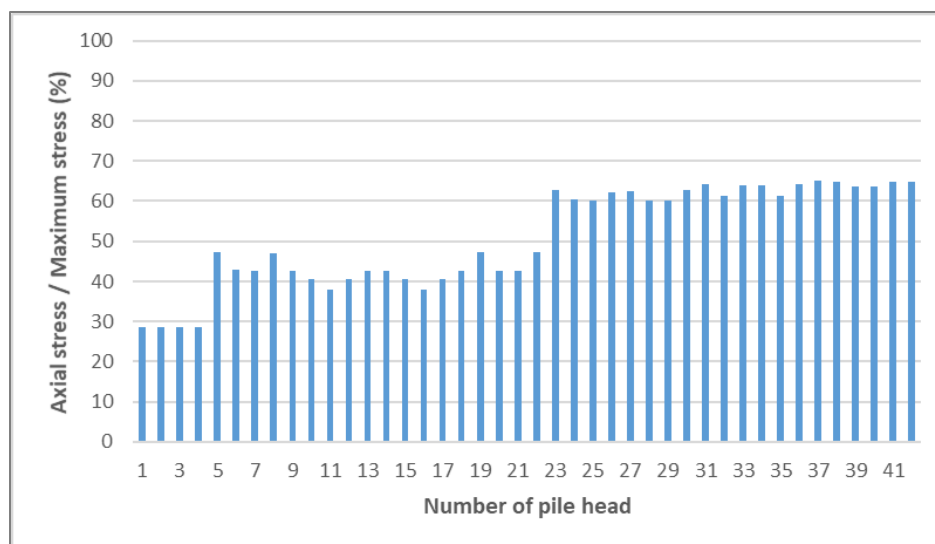


Σχήμα 5.40 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC32.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του βαθμού λειτουργίας των πασσάλων για κάθε μια από τις θερμικές φορτίσεις, εφαρμόζοντας το γερμανικό κανονισμό DIN4014 για την εύρεση της φέρουσας ικανότητας.



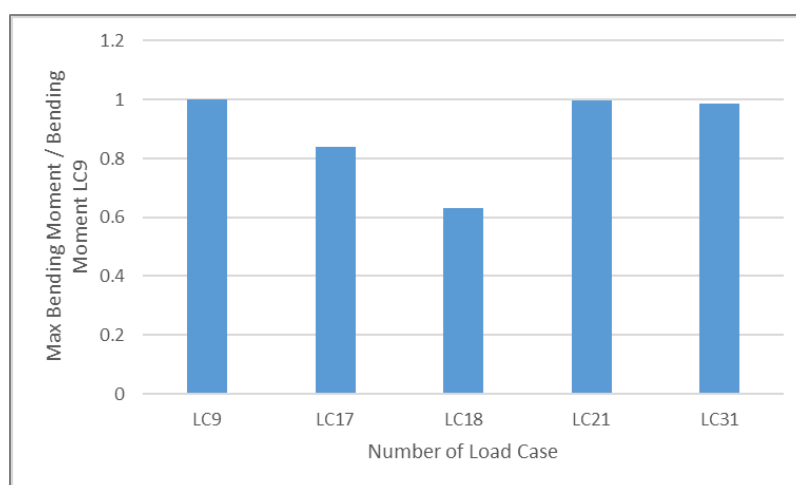
Σχήμα 5.41 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC31.



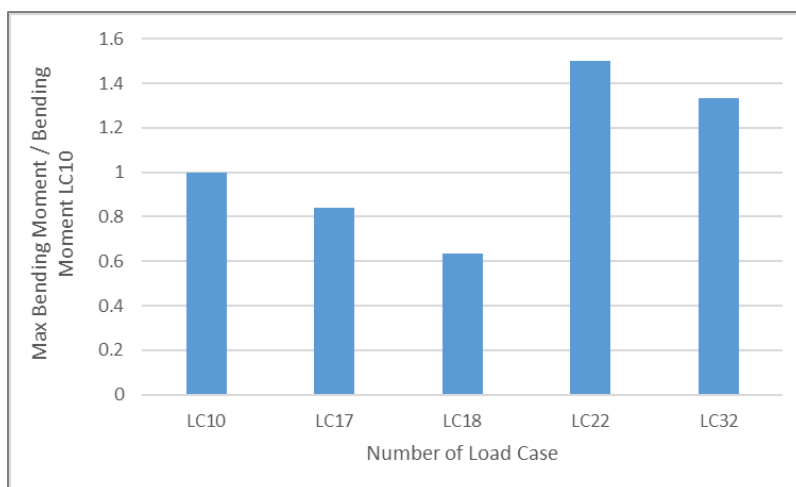
Σχήμα 5.42 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC32.

Έχοντας προσδιορίσει την εντατική και κινηματική κατάσταση της συνδυασμένης θεμελίωσης κατά την επιβολή του ανομοιόμορφου θερμικού φορτίου της ενεργειακής κοιτόστρωσης, λαμβάνοντας υπόψιν και το μηχανικό φορτίο προερχόμενο από την ανωδομή, γίνεται ποιοτική σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων σε συγκεντρωτικά διαγράμματα κανονικοποιημένα ως προς την απλούστερη θερμική φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες και LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα.

Κατά τη διερεύνηση της εντατικής και κινηματικής κατάστασης των δομικών στοιχείων της θεμελίωσης δίνονται αρχικά τα διαγράμματα σύγκρισης της μέγιστης κατά απόλυτη τιμή καμπτικής ροπής της κοιτόστρωσης κατά τους χειμερινούς και τους καλοκαιρινούς μήνες, αντιστοιχίζοντας κάθε φορά την τιμή αυτή με τη μέγιστη των φορτίσεων LC9 και LC10.

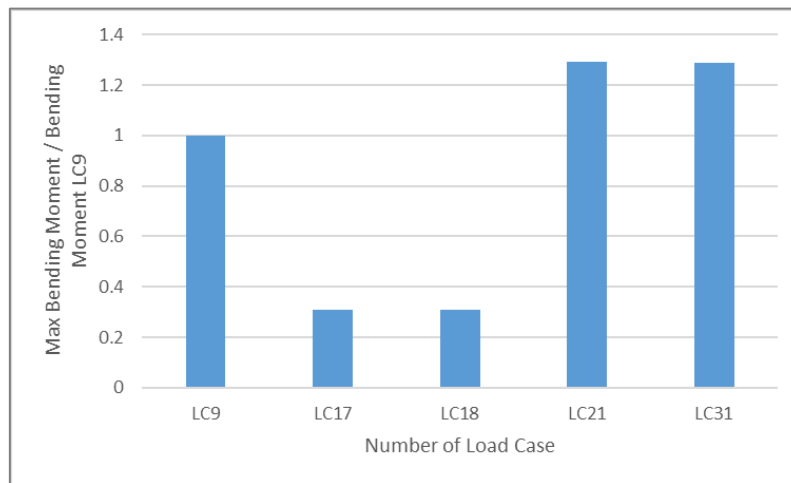


*Σχήμα 5.43* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.

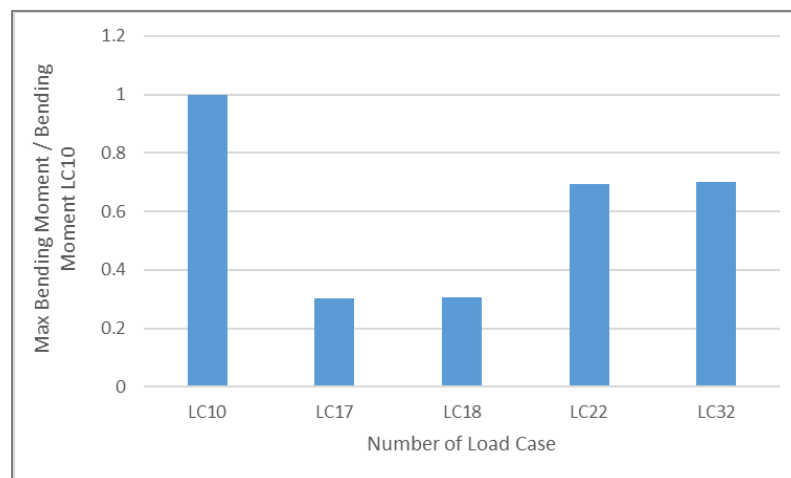


*Σχήμα 5.44* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και τα διαγράμματα σύγκρισης της μέγιστης τιμής ροπής κάμψης του στοιχείου του πασσάλου για κάθεμια από τις φορτίσεις που προαναφέρθηκαν.



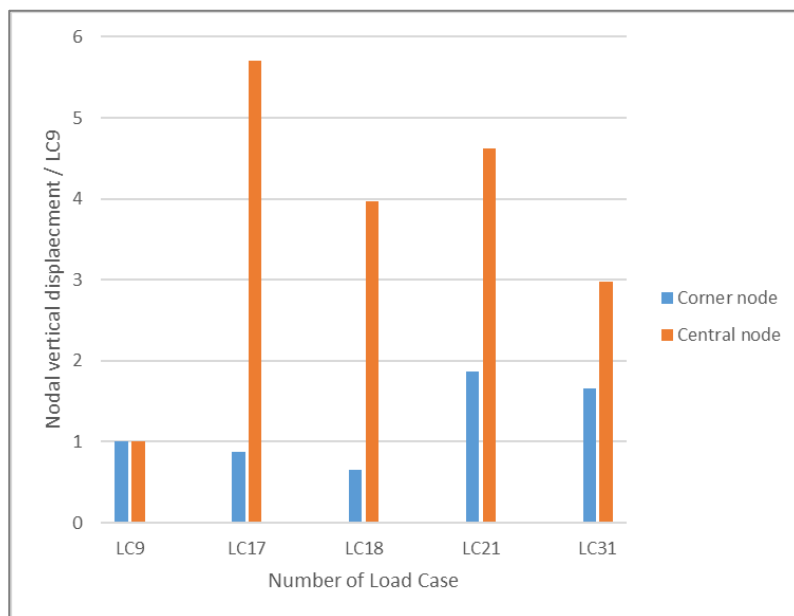
*Σχήμα 5.45* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



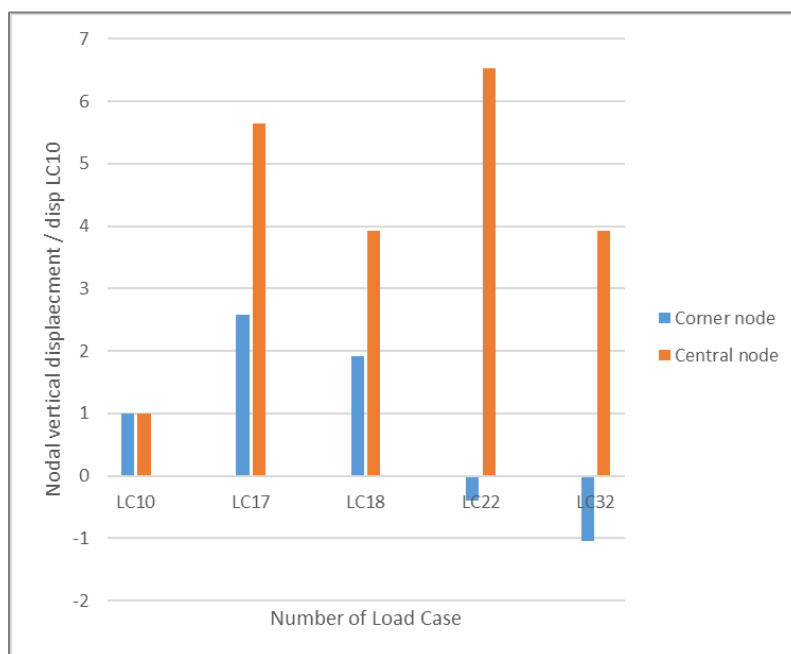
*Σχήμα 5.46* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Επόμενο κριτήριο σύγκρισης είναι η κατακόρυφη μετακίνηση της συνδυασμένης θεμελίωσης για κάθε φόρτιση. Οι τιμές προκύπτουν από τις επικόμβιες μετακινήσεις των γωνιακών και του κεντρικού σημείου όσον αφορά την κοιτόστρωση, ενώ για τους πασσάλους μετράται η επικόμβια κατακόρυφη μετακίνηση της κεφαλής. Η διαδικασία κανονικοποίησης των διαγραμμάτων ακολουθεί την ίδια λογική με τα προηγούμενα.

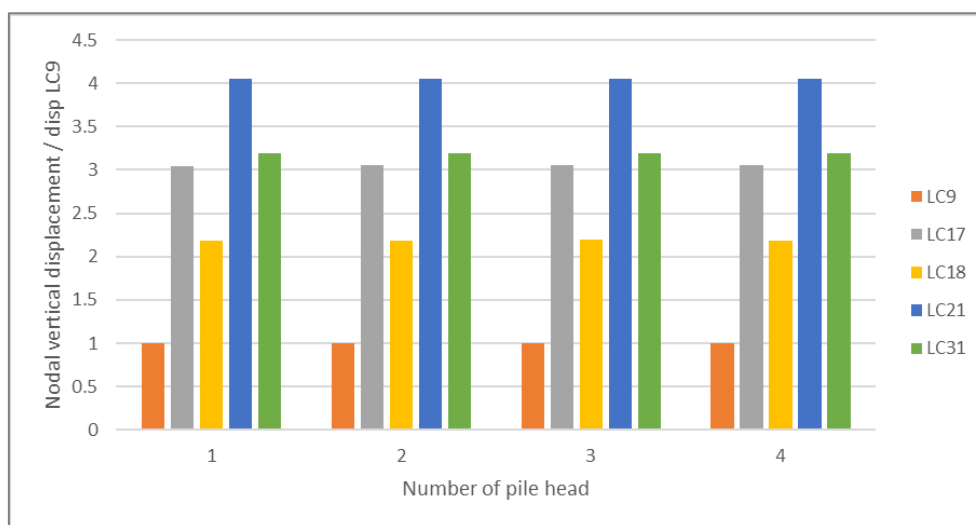


*Σχήμα 5.47* Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.

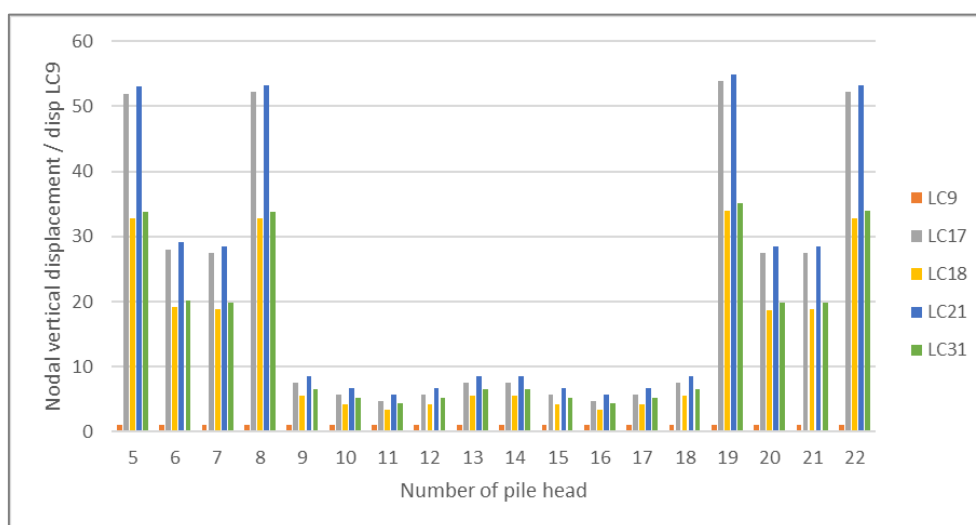


*Σχήμα 5.48* Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

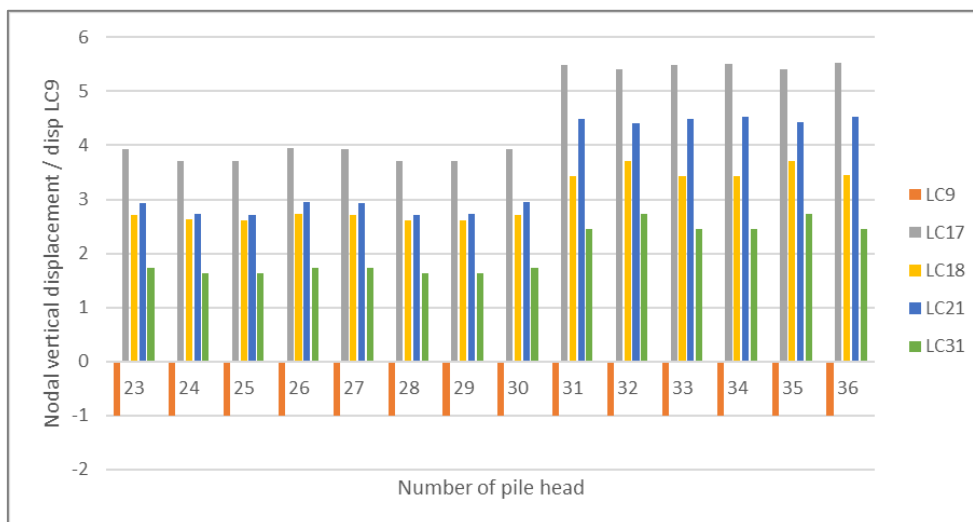
Ακολουθεί η καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων στους κόμβους κεφαλής των πασσάλων και η σύγκριση αυτών. Για κάθε σύγκριση παρατίθενται τέσσερα διαγράμματα, τα οποία αφορούν τις τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες των πασσάλων ανάλογα τη θέση τους. Χάριν ευκολίας υπενθυμίζονται οι κατηγορίες θέσης των πασσάλων και οι αντίστοιχοι αριθμοί κόμβων κεφαλής: γωνιακοί (1-4), εξωτερικοί (5-22), ενδιάμεσοι (23-36) και εσωτερικοί (37-42). Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν την κατακόρυφη μετακίνηση προς τα άνω.



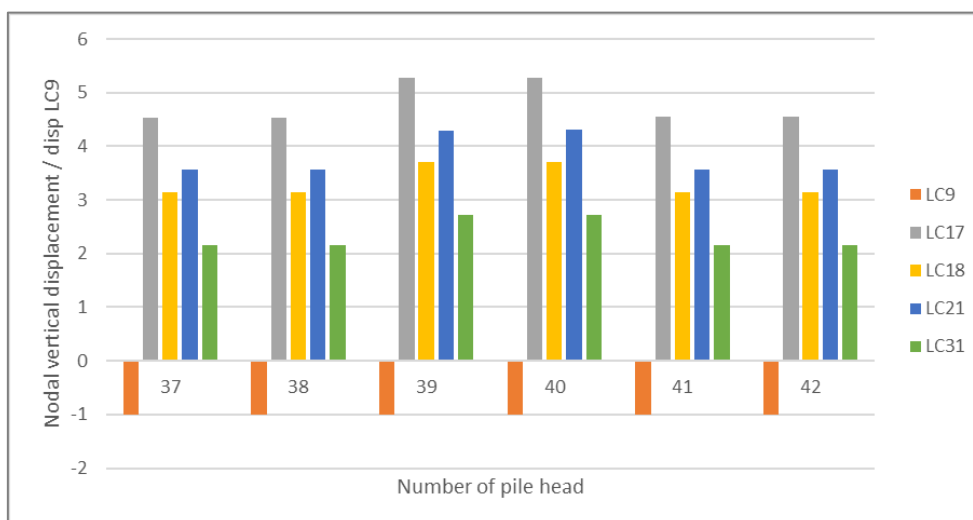
**Σχήμα 5.49** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



**Σχήμα 5.50** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.

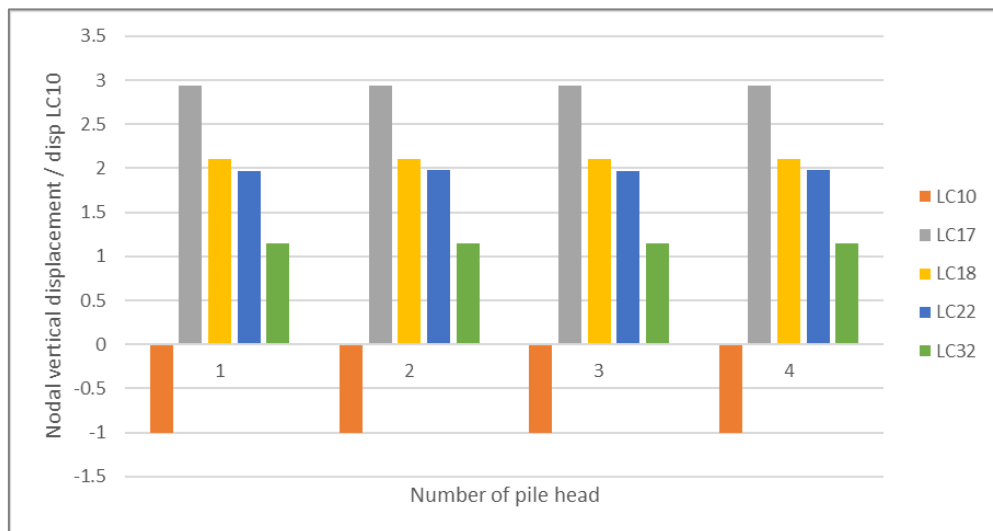


**Σχήμα 5.51** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.

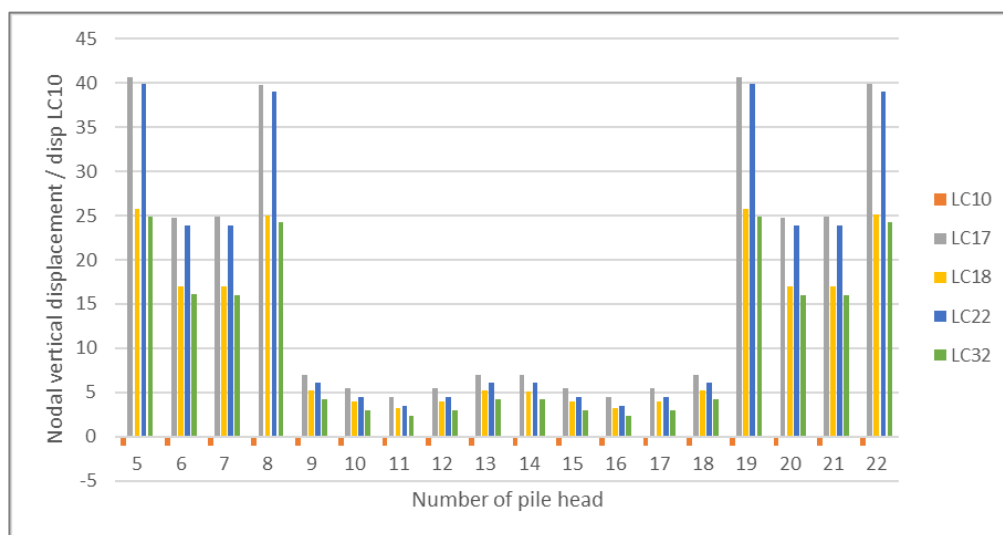


**Σχήμα 5.52** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.

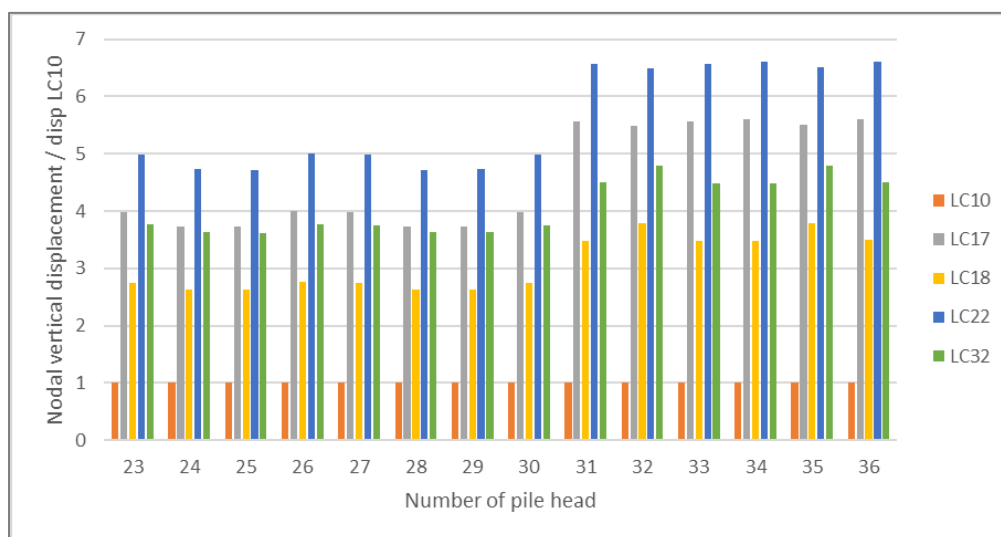
Στα παρακάτω διαγράμματα ακολουθείται η ίδια διαδικασία σύγκρισης των επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων για κάθε κατηγορία πασσάλων κατά την επίδραση φορτίσεων την εαρινή περίοδο.



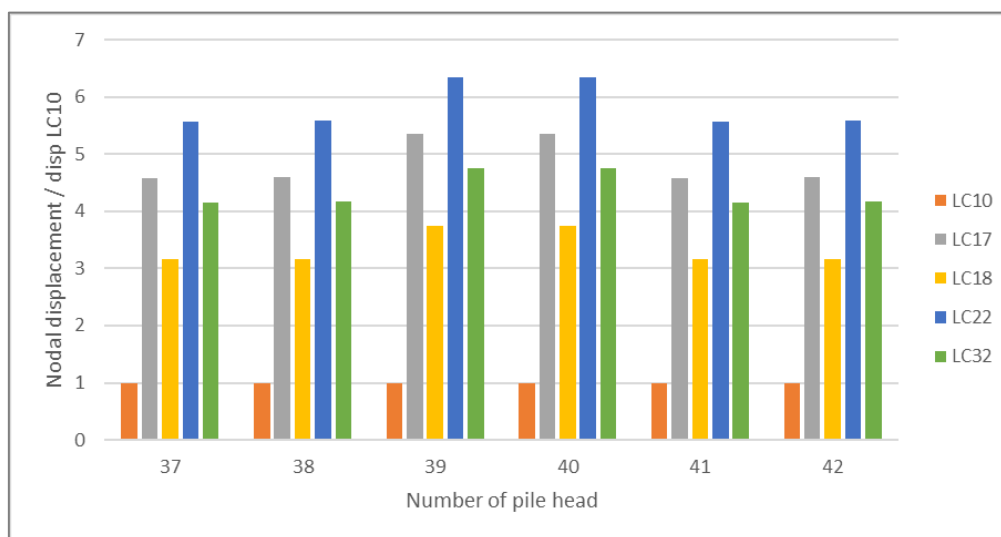
**Σχήμα 5.53** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα 5.54** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



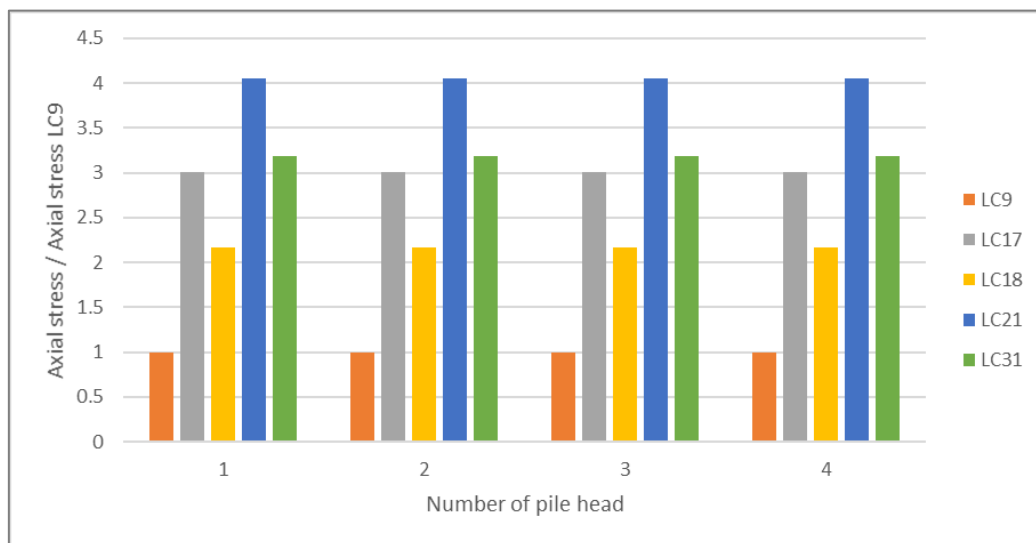
**Σχήμα 5.55** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



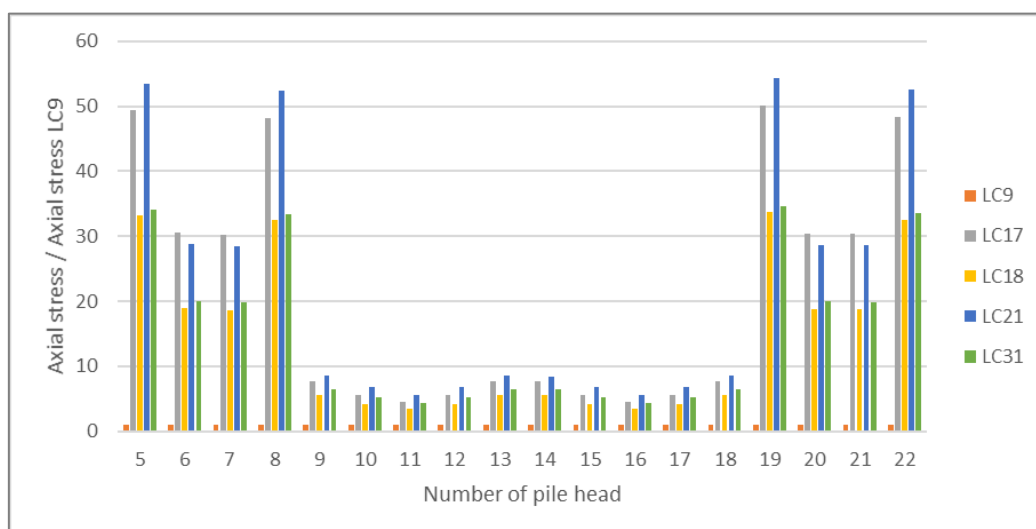
**Σχήμα 5.56** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Παρατηρείται πως για κάθε κατηγορία οι μετακινήσεις των πασσάλων δεν είναι απαραίτητα ίδιες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παραμόρφωση (καμπύλωση) της εύκαμπτης ενιαίας πλάκας – κεφαλόδεσμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

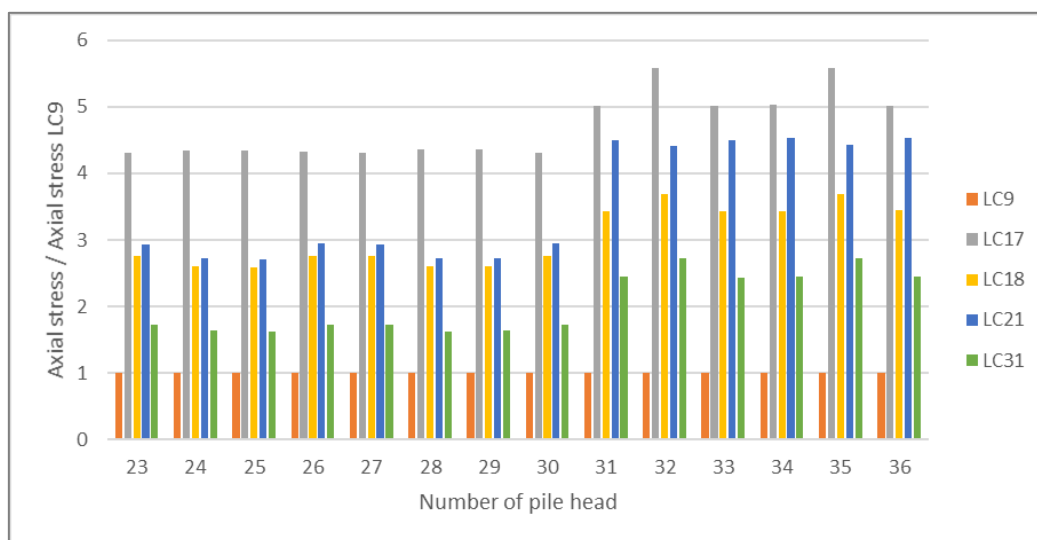
Τέλος γίνεται σύγκριση των επιπτώσεων των φορτίσεων με βάση το βαθμό λειτουργίας κάθε πασσάλου. Για κάθε σύγκριση παρατίθενται τέσσερα διαγράμματα, τα οποία αφορούν τις τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες των πασσάλων ανάλογα τη θέση τους. Χάριν ευκολίας υπενθυμίζονται οι κατηγορίες θέσης των πασσάλων και οι αντίστοιχοι αριθμοί κόμβων κεφαλής: γωνιακοί (1-4), εξωτερικοί (5-22), ενδιάμεσοι (23-36) και εσωτερικοί (37-42).



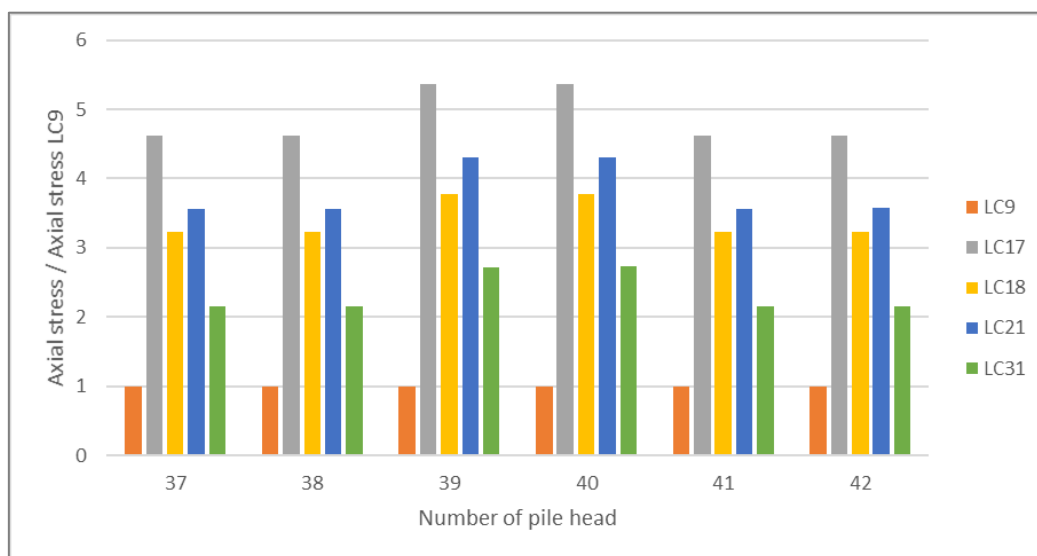
**Σχήμα 5.57** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



**Σχήμα 5.58** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.

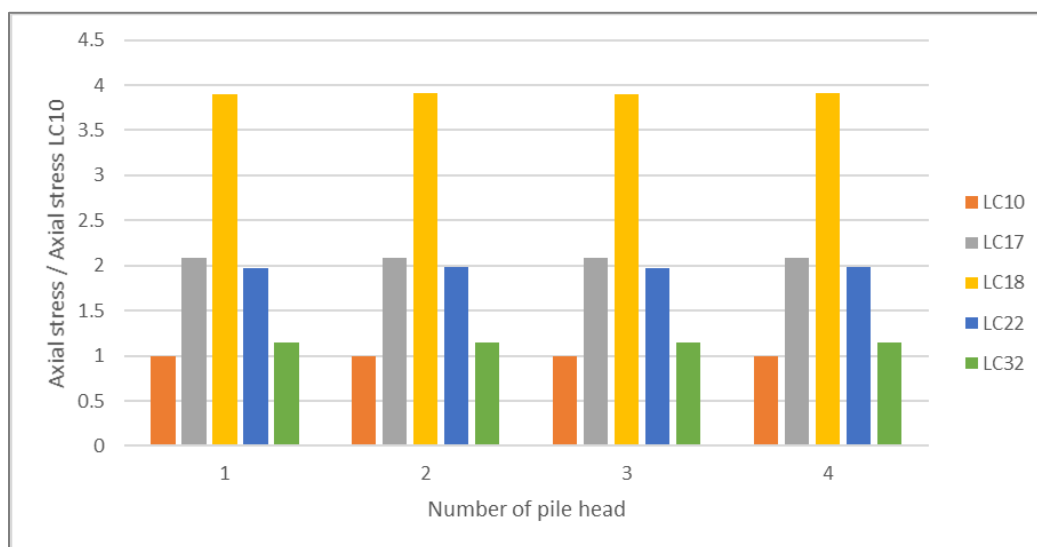


*Σχήμα 5.59* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.

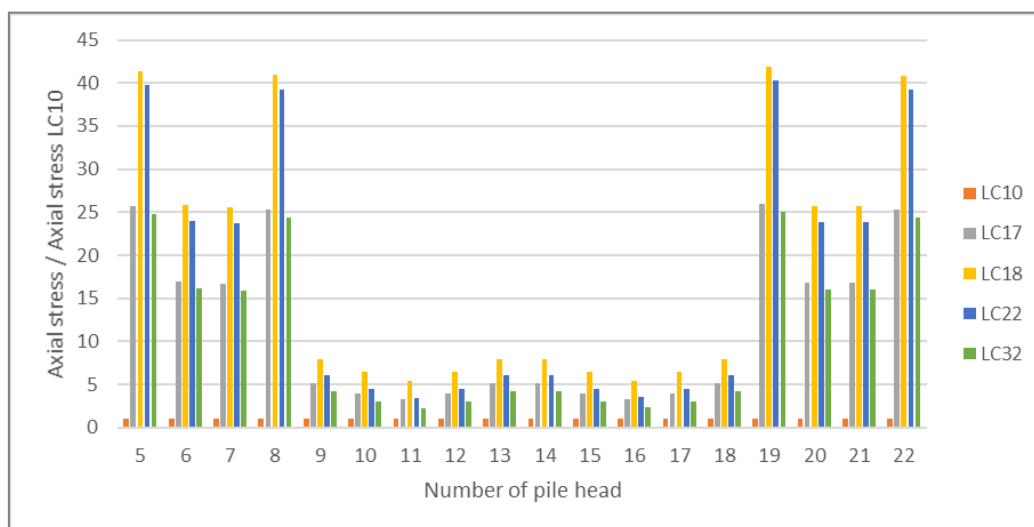


*Σχήμα 5.60* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.

Στα παρακάτω διαγράμματα ακολουθείται η ίδια διαδικασία σύγκρισης του βαθμού λειτουργίας για κάθε κατηγορία πασσάλων κατά την επίδραση φορτίσεων την εαρινή περίοδο.

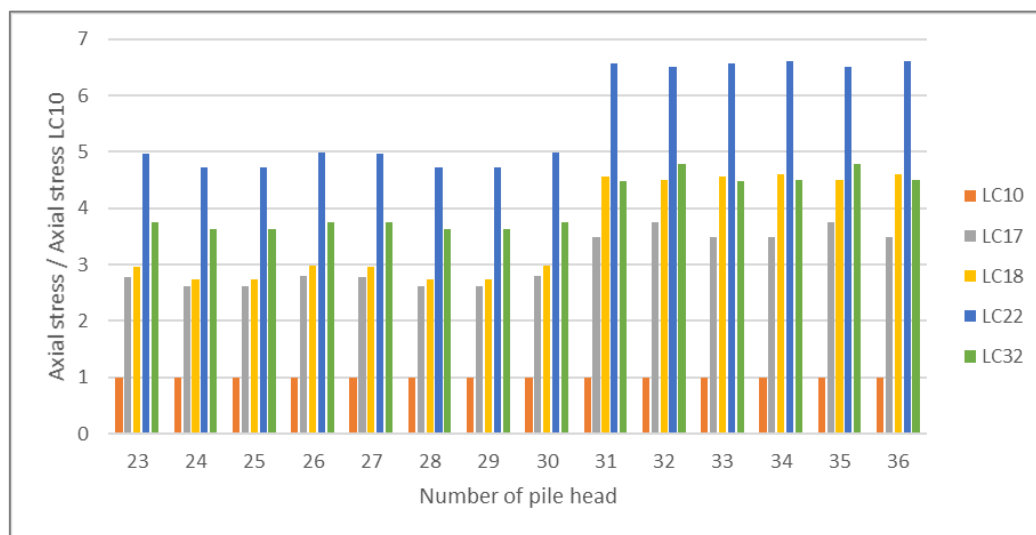


*Σχήμα 5.61* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

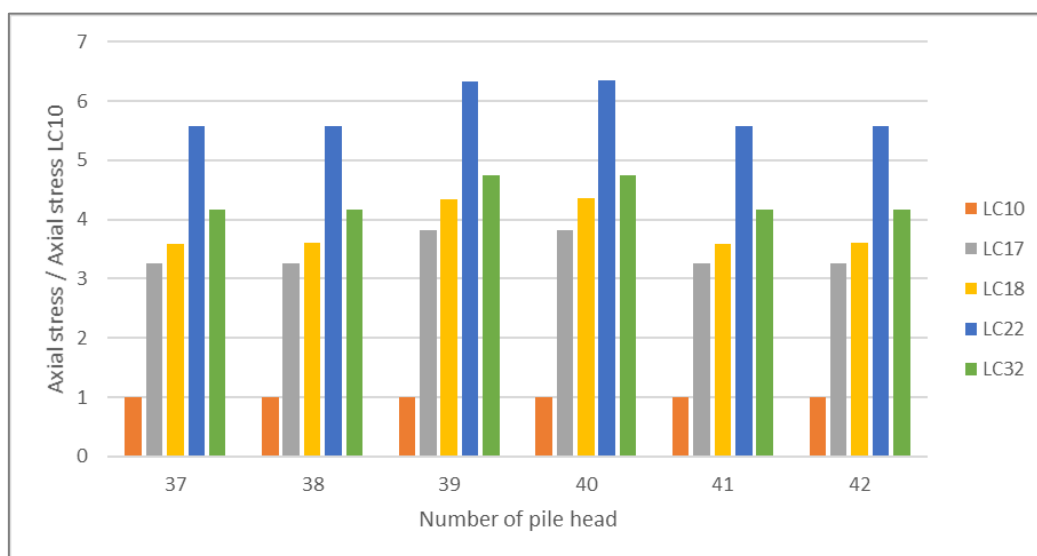


*Σχήμα 5.62* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.





**Σχήμα 5.63** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα 5.64** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Συνοπτικά, λαμβάνοντας υπόψιν ως πιθανές καταπονήσεις του συστήματος τις μηχανικές φορτίσεις προερχόμενες από την οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας της κτιριακής κατασκευής και ορίζοντας τη μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της ενεργειακής κοιτόστρωσης ως θερμική φόρτιση ασκούμενη στο ενεργειακό στοιχείο της θεμελίωσης, συγκεντρώθηκε μια σειρά αποτελεσμάτων που αφορούν την εντατική και κινηματική κατάσταση της συνδυασμένης θεμελίωσης υπό την επίδραση όλων των πιθανών συνδυασμών φορτίσεων εξ'αυτών κατά τη διάρκεια του έτους. Ανακεφαλαιώνοντας, τα μεγέθη που διερευνήθηκαν τόσο για τον ενιαίο κεφαλόδεσμο, όσο και για την ομάδα πασσάλων αφορούν την καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στα δομικά στοιχεία, καθώς και την εικόνα και τις τιμές των επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων. Επιπλέον, παρουσιάστηκε ο βαθμός λειτουργίας κάθε πασσάλου κατά τη φόρτίσή του. Τα παραπάνω αποτελέσματα δόθηκαν σε διαγράμματα κανονικοποιημένης μορφής, ορίζοντας ως αφετηρία τη μέγιστη τιμή του εκάστοτε μεγέθους. Σε επόμενο βήμα, κρίθηκε απαραίτητη η σύγκριση των ευρημάτων βάσει τις ανάλογες τιμές που προκύπτουν κατά την επίδραση όλων των πιθανών φορτίσεων που αφορούν τη λειτουργία της κοιτόστρωσης ως γεωαναλλάκτη, τοποθετώντας τους σωλήνες του θερμού ρευστού κάτω από την επιφάνεια του θεμελίου (βλ και Παράρτημα Α'). Οι φορτίσεις αυτές αντιστοιχούν στους συνδυασμούς δυνάμεων που περιλαμβάνουν την ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κοιτόστρωσης κατά τη διάρκεια του έτους (LC9, LC10, LC21, LC22, LC31, LC32). Ως εκτούτου, προέκυψαν κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν τα εντατικά και κινηματικά μεγέθη των υπόλοιπων φορτίσεων ως προς καθεμία από τις παραπάνω φορτίσεις ξεχωριστά, καθώς και διαγράμματα σύγκρισης των φορτίσεων ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας μεταξύ τους, ορίζοντας ως αφετηρία την πιο απλή φόρτιση, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψιν μόνο η θερμική υπόσταση του προβλήματος (LC9 για χειμερινούς μήνες και LC10 για καλοκαιρινούς μήνες). Ακολούθως, εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα για την απόκριση των δομικών στοιχείων της συνδυασμένης θεμελίωσης. Για ερευνητικούς λόγους, στα γραφήματα προκύπτουν αποτελέσματα για όλες τις πιθανές φορτίσεις, ωστόσο παρακάτω περιγράφονται τα συμπεράσματα των πιθανών φορτίσεων στην πράξη. Αναλύεται δηλαδή η επιρροή του θερμικού φορτίου λόγω ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας στο στοιχείο της πλάκας στις οριακές μηχανικές φορτίσεις ULS και SLS και ποσοτικοποιείται η διαφορά που προκύπτει στις επιπτώσεις της φόρτισης αυτής συγκριτικά με τη θερμική φόρτιση κατά την ομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας στην πλάκα. Τα συμπεράσματα προκύπτουν από τα αντίστοιχα διαγράμματα του Παραρτήματος Α'.

Όπως έχει προαναφερθεί, κατά το σχεδιασμό επιλέχθηκαν δύο μηχανικά φορτία που αντιπροσωπεύουν την οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) και λειτουργικότητας (SLS) για τον συγκεκριμένο κτιριακό τύπο. Πρόκειται για μέγιστο μηχανικό φορτίο σχεδιασμού και φορτίο πραγματικών δράσεων, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας λοιπόν τα αποτελέσματα των φορτίσεων LC21, LC22 με τα αποτελέσματα της φόρτισης LC17 και αντίστοιχα τα αποτελέσματα των LC31, LC32 με αυτά της φόρτισης LC18 διεξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίπτωση στην απόκριση της

συνδυασμένης θεμελίωσης της προσθήκης της ανομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας της πλάκας στις οριακές μηχανικές φορτίσεις.

#### Καμπτική ροπή

##### LC21 – LC17

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 16% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο ULS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 76%. Η κατά 60% μεγαλύτερη αύξηση της καμπτικής ροπής των πασσάλων συγκριτικά με την τιμή της ροπής στην πλάκα, οφείλεται στο θετικό (προς τα κάτω) τόξο κάμψης που αναπτύσσεται στον κεφαλόδεσμο κατά την προσθήκη του θερμικού φορτίου.

##### LC22 – LC17

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 56% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο ULS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 44%. Τόσο η αύξηση της ροπής κάμψης της πλάκας κατά 40% συγκριτικά με τη χειμερινή περίοδο, όσο και η μείωση αντίστοιχα της ροπής των πασσάλων κατά 32% οφείλεται στο αρνητικό (προς τα άνω) βέλος κάμψης που αναπτύσσεται στον κεφαλόδεσμο κατά την προσθήκη του θερμικού φορτίου.

##### LC31 – LC18

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 36% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο SLS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 76%. Η κατά 40% μεγαλύτερη αύξηση της καμπτικής ροπής των πασσάλων συγκριτικά με την τιμή της ροπής στην πλάκα, οφείλεται στο θετικό (προς τα κάτω) τόξο κάμψης που αναπτύσσεται στον κεφαλόδεσμο κατά την προσθήκη του θερμικού φορτίου.

##### LC32 – LC18

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 52% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο SLS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 56%. Τόσο η

αύξηση της ροπής κάμψης της πλάκας κατά 20% συγκριτικά με τη χειμερινή περίοδο, όσο και η μείωση αντίστοιχα της ροπής των πασσάλων κατά 20% οφείλεται στο αρνητικό (προς τα άνω) βέλος κάμψης που αναπτύσσεται στον κεφαλόδεσμο κατά την προσθήκη του θερμικού φορτίου.

Παρατηρείται πως για μικρότερο σε τιμή μηχανικό φορτίο SLS σε συνδυασμό με τη θερμική φόρτιση συγκριτικά με τον αντίστοιχο συνδυασμό για μηχανικό φορτίο ULS η ροπή των πασσάλων αυξάνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό κατά 12% και μάλιστα ξεπερνά και την τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής που προκαλεί η φόρτιση με το μέγιστο μηχανικό φορτίο ULS. Προκύπτει κατά συνέπεια πως η επίδραση μηχανικού φορτίου SLS σε συνδυασμό με τη θερμική φόρτιση της πλάκας κατά την εαρινή περίοδο είναι δυσμενέστερη (όσον αφορά την ανάπτυξη ροπών) από τον αντίστοιχο συνδυασμό φορτίσεων κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά και από την εφαρμογή του μεγαλύτερου σε μέγεθος συνδυασμού θερμικής φόρτισης με μηχανικό φορτίο ULS κατά την εαρινή περίοδο.

#### LC21 – LC19

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 7% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο ULS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 11%.

#### LC22 – LC20

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 14% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο ULS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 19%.

Παρατηρείται πως οι δράσεις των ίδιων συνδυασμών φορτίσεων προκαλούν αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής των δομικών στοιχείων κατά την εαρινή περίοδο κατά 7 και 8% αντίστοιχα συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της μέγιστης ροπής κατά τη χειμερινή περίοδο. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται λόγω της τάσης της κοιτόστρωσης κατά τη θέρμανση του εσωτερικού της (καλοκαιρινοί μήνες) να καμπυλώνεται με τα κοίλα προς τα άνω, γεγονός που αναιρείται από την ισχυρότερη επίδραση του μηχανικού φορτίου (τάση για κύρτωση προς τα κάτω), δημιουργώντας επιπρόσθετες ροπές. Κατά την ίδια λογική, οι πάσσαλοι τείνουν να διογκωθούν, γεγονός που αποτρέπεται από την επιβολή του θετικού (προς τα κάτω) μηχανικού φορτίου ULS.

#### LC31 – LC29

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 17% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο SLS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 11%.

#### LC32 – LC30

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 15% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο SLS. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται αύξηση καμπτικής ροπής κατά 22%.

#### Επικόμβια κατακόρυφη μετακίνηση

#### LC21 – LC17

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 53% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και μείωση κατά 23% στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο ULS. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη μείωση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην περαιτέρω κύρτωση προς τα κάτω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας κατά την επιβολή πρόσθετου θερμικού φορτίου στο ήδη επιβαλλόμενο μηχανικό, κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 25% για τους γωνιακούς, 2-12% για τους εξωτερικούς, μείωση κατά 22-33% για τους ενδιάμεσους και μείωση κατά 23-28% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

#### LC22 – LC17

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί αντίρροπη πλέον μετακίνηση στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης περίπου 6.5 φορές μικρότερη και αύξηση κατά 15% στον κεντρικό κόμβο συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο ULS. Η αλλαγή διεύθυνσης

και η μείωση της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην τάση για κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας κατά την επιβολή πρόσθετου θερμικού φορτίου στο ήδη επιβαλλόμενο μηχανικό κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 49% για τους γωνιακούς, 2-27% για τους εξωτερικούς, αύξηση κατά 15-20% για τους ενδιάμεσους και αύξηση κατά 10-15% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

Για τις παραπάνω συγκρίσεις παρατηρείται πως η επίδραση του θερμικού φορτίου σε συνδυασμό με το οριακό μηχανικό φορτίο ULS χαρακτηρίζεται από ευμενέστερες μετακινήσεις κατά την εαρινή περίοδο, καθώς καταπονούνται λιγότερο οι γωνιακοί και εξωτερικοί πάσσαλοι, οι οποίοι τυχαίνει – λόγω γεωμετρίας της κατασκευής και κατανομής των φορτίσεων – να δέχονται μεγαλύτερο φορτίο.

#### LC31 – LC18

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 61% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και μείωση κατά 34% στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο SLS. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη μείωση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην περαιτέρω κύρτωση προς τα κάτω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας κατά την επιβολή πρόσθετου θερμικού φορτίου στο ήδη επιβαλλόμενο μηχανικό, κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 31% για τους γωνιακούς, 4-14% για τους εξωτερικούς, μείωση κατά 36-60% για τους ενδιάμεσους και μείωση κατά 36-46% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

#### LC32 – LC18

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αντίρροπη πλέον μετακίνηση στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης περίπου 2 φορές

μικρότερη και σχεδόν μηδενική μεταβολή στον κεντρικό κόμβο συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της μόνο από το μηχανικό φορτίο SLS. Η αλλαγή διεύθυνσης και η μείωση της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αμελητέα αύξηση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην τάση για κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας κατά την επιβολή πρόσθετου θερμικού φορτίου στο ήδη επιβαλλόμενο μηχανικό κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 85% για τους γωνιακούς, 3-42% για τους εξωτερικούς, αύξηση κατά 21-27% για τους ενδιάμεσους και αύξηση κατά 21-24% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

Για τις παραπάνω συγκρίσεις παρατηρείται πως η επίδραση του θερμικού φορτίου σε συνδυασμό με το οριακό μηχανικό φορτίο ULS χαρακτηρίζεται από ευμενέστερες μετακινήσεις κατά την εαρινή περίοδο, καθώς καταπονούνται λιγότερο οι γωνιακοί και εξωτερικοί πάσσαλοι, οι οποίοι τυχαίνει – λόγω γεωμετρίας της κατασκευής και κατανομής των φορτίσεων – να δέχονται μεγαλύτερο φορτίο.

#### LC21 – LC19

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί αμελητέα αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και μείωση κατά 6% στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολή θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο ULS. Η αμελητέα αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη μείωση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην περαιτέρω κύρτωση προς τα κάτω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας που προκαλεί η ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας (αύξηση κατά 5 βαθμούς Κελσίου στην κεντρική περιοχή της πλάκας), κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 1% για τους γωνιακούς, 1-4% για τους εξωτερικούς, αύξηση κατά 3% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 23-30 (παράλληλοι στη μικρή πλευρά της πλάκας), μείωση κατά 5% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 31-36 (παράλληλοι στη μεγάλη πλευρά της πλάκας) και μείωση 6-7% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των

πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

#### LC22 – LC20

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 8% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης προς τα άνω στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και αύξηση κατά 5% στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολή θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο ULS. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης προς τα άνω με την ταυτόχρονη αύξηση προς τα κάτω της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην περαιτέρω κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας που προκαλεί η ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας (αύξηση κατά 5 βαθμούς Κελσίου στην κεντρική περιοχή της πλάκας), κατά τους εαρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται 2% μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης για τους γωνιακούς, 5% για τους εξωτερικούς με αριθμό κεφαλής 9,13,14 και 18 (παράλληλοι στη μεγάλη πλευρά της πλάκας και γειτονικοί με τους γωνιακούς) και 1% για τους υπόλοιπους εξωτερικούς, μείωση κατά 2% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 23-30 (παράλληλοι στη μικρή πλευρά της πλάκας), αύξηση κατά 3% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 31-36 (παράλληλοι στη μεγάλη πλευρά της πλάκας) και μείωση 4% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

#### LC31 – LC29

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αμελητέα αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και μείωση κατά 11% στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολή θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο SLS. Η αμελητέα αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη μείωση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην περαιτέρω κύρτωση προς τα κάτω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας που προκαλεί η ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας (αύξηση κατά 5 βαθμούς Κελσίου στην κεντρική περιοχή της πλάκας), κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 1% για τους γωνιακούς, 5% για τους εξωτερικούς με αριθμό κεφαλής 9,13,14 και 18 (παράλληλοι στη μεγάλη πλευρά της πλάκας και γειτονικοί με τους γωνιακούς) και 1% για τους υπόλοιπους εξωτερικούς, αύξηση κατά 4% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 23-30 (παράλληλοι στη



μικρή πλευρά της πλάκας), μείωση κατά 8-10% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 31-36 (παράλληλοι στη μεγάλη πλευρά της πλάκας) και μείωση 11% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

### LC32 – LC30

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ανομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 2% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης προς τα άνω στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και μείωση κατά 17% στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της από τη θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολή θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το μηχανικό φορτίο SLS. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης προς τα άνω με την ταυτόχρονη μείωση προς τα άνω της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στην περαιτέρω κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας που προκαλεί η ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας (αύξηση κατά 5 βαθμούς Κελσίου στην κεντρική περιοχή της πλάκας), κατά τους εαρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται 4% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης για τους γωνιακούς, 1-7% για τους εξωτερικούς, μείωση κατά 2% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 23-30 (παράλληλοι στη μικρή πλευρά της πλάκας), αύξηση κατά 5% για τους ενδιάμεσους με αριθμό κεφαλής 31-36 (παράλληλοι στη μεγάλη πλευρά της πλάκας) και μείωση 6% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση).

### Βαθμός λειτουργίας πασσάλων

Ο βαθμός λειτουργίας κάθε πασσάλου είναι ανάλογος της κατακόρυφης μετακίνησης των στοιχείων θεμελίωσης, τηρώντας την εφαρμογή της καμπύλης φέρουσας ικανότητας – καθίζησης κατά το γερμανικό κανονισμό DIN4014. Για λόγους συντομίας η ποσοστιαία μεταβολή του βαθμού λειτουργίας κάθε πασσάλου για τις φορτίσεις που εξετάζονται φαίνεται στα αντίστοιχα σχήματα και συμβαδίζει με τα συμπεράσματα των επικόμβιων μετακινήσεων των πασσάλων για κάθε φόρτιση.

Πριν την ολοκλήρωση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι χρήσιμη η περαιτέρω διερεύνηση του ενεργειακού συστήματος, αξιοποιώντας συμπληρωματικά το δυναμικό των πασσάλων. Οι πάσσαλοι ως στοιχεία βαθιάς θεμελίωσης είναι δυνατό να αυξήσουν εκθετικά την ενεργειακή απόδοση του γεωθερμικού συστήματος κατά τη λειτουργία τους ως γεωεναλλάκτες

συνδυαστικά με την ενεργειακή κοιτόστρωση, επιτυγχάνοντας παράλληλα το βέλτιστο τεχνικοοικονομικό σχεδιασμό. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφονται οι φορτίσεις προς εξέταση και αναλύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

## 5.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων κατά τη λειτουργία της ενεργειακής συνδυασμένης θεμελίωσης

Πρώτη προσέγγιση της διερεύνησης λειτουργίας των ενεργειακών πασσάλων αποτελεί η θερμική φόρτιση κατά την οποία μεταβάλλεται ομοιόμορφα η θερμοκρασία στο εσωτερικό των στοιχείων στο σύνολό τους κατά 20 βαθμούς Κελσίου τη χειμερινή περίοδο και 25 βαθμούς Κελσίου την εαρινή περίοδο. Υπενθυμίζεται πως η τιμή της θερμοκρασιακής μεταβολής των 20 βαθμών Κελσίου το χειμώνα είναι οριακή, καθώς στους 0 βαθμούς απόλυτης θερμοκρασίας (γίνεται η παραδοχή σταθερής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ίσης με 20 βαθμούς Κελσίου) το ρευστό που κυκλοφορεί στους σωλήνες του πρωτεύοντος κυκλώματος του συστήματος (είτε νερό, είτε μείγμα με νερό) τείνει να παγώσει με αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία του γεωθερμικού συστήματος. Ως εκτούτου, γίνεται η παραδοχή πως η εφαρμογή του μοντέλου αφορά περιοχές με υψηλή μέση θερμοκρασία (περίπου 22 βαθμούς Κελσίου) και στην περίπτωση που πέσει κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου ενεργοποιείται το σύστημα αυτοματισμού. (LC11, LC12)

Σε επόμενο βήμα, διαπιστώνοντας τη μεγαλύτερη καταπόνηση των εξωτερικών πασσάλων, λόγω της κατανομής των μηχανικών φορτίσεων στη γεωμετρία του κτιριακού συστήματος, εξετάστηκε η εγκατάσταση σωληνώσεων κατά μήκος όλων των πασσάλων πλην των γωνιακών, αναμένοντας τη μείωση του φορτίου που δέχονται. Υπενθυμίζεται πως δε λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση μεταξύ της ομάδας πασσάλων και το έδαφος θεωρείται ασυνεχές μέσο, οπότε η μεταφορά της θερμότητας από τα στοιχεία των πασσάλων γεωεναλλακτών αγνοείται. Για το λόγο αυτό, αποδεσμεύοντας τους γωνιακούς πασσάλους από το θερμικό φορτίο, επιλέγεται η προς εξέταση θερμική φόρτιση κατά την οποία μεταβάλλεται ομοιόμορφα η θερμοκρασία στο εσωτερικό των πασσάλων κατά 20 βαθμούς Κελσίου τη χειμερινή περίοδο και 25 βαθμούς Κελσίου την εαρινή περίοδο, πλην των στοιχείων των γωνιακών πασσάλων, η θερμοκρασία των οποίων παραμένει σταθερή (LC15, LC16). Ωστόσο, παρατηρήθηκε πως κατά τους χειμερινούς μήνες – λαμβάνοντας υπόψιν και το μηχανικό φορτίο – ο ενιαίος κεφαλόδεσμος παραμορφώνεται όπως ήδη έχει αναλυθεί με τα κοίλα προς τα κάτω και ταυτόχρονα οι πάσσαλοι γεωεναλλάκτες συρρικνώνονται (κατά την ψύξη τους). Συνεπώς, το αμετάβλητο μήκος των γωνιακών πασσάλων που δεν αποτελούν μέρος της ενεργειακής θεμελίωσης λειτουργεί μη ευνοϊκά εν τέλει, προκαλώντας αυξημένες εντάσεις στην περιοχή της κεφαλής τους. Για τη γεωμετρία και τις φορτίσεις του παρόντος μοντέλου, το μέγεθος των καταπονήσεων αυτών είναι τέτοιο που ξεπερνά τη φέρουσα ικανότητα των γωνιακών πασσάλων και εν τέλει αστοχούν. Από την άλλη, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες φαίνεται πως οι γωνιακοί πάσσαλοι καταπονούνται λιγότερο συγκριτικά με την περίπτωση που αποτελούν θεμέλιο γεωεναλλάκτη, καθώς δεν καταπονούνται από το θερμικό φορτίο και συγχρόνως ο ενιαίος κεφαλόδεσμος

παραμορφώνεται με τα κοίλα προς τα άνω, ελαχιστοποιώντας το αξονικό φορτίο που δέχονται οι γωνιακοί πάσσαλοι στην κεφαλή τους.

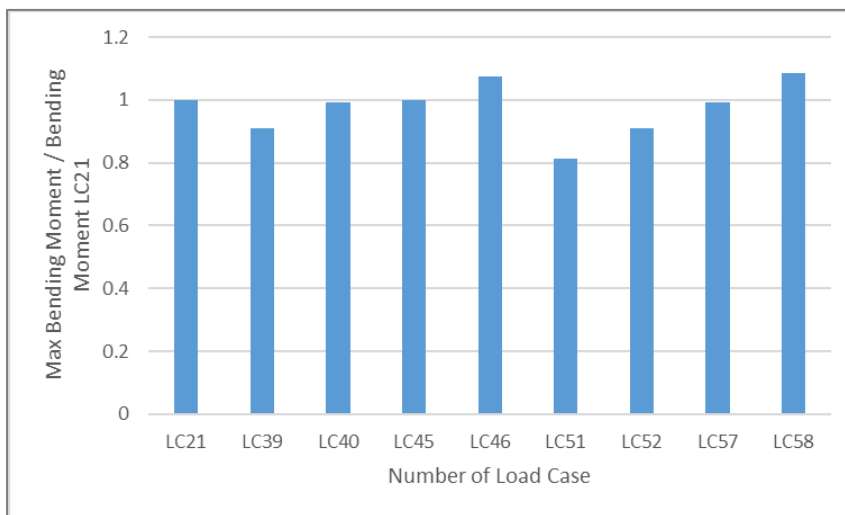
Η αστοχία των γωνιακών πασσάλων της παραπάνω φόρτισης κατά την χειμερινή περίοδο καθιστά αδύνατη τη μελέτη της τελευταίας και αντ'αυτού εξετάζεται η θερμική φόρτιση κατά την οποία μεταβάλλεται ομοιόμορφα η θερμοκρασία στο εσωτερικό των πασσάλων κατά 20 βαθμούς Κελσίου τη χειμερινή περίοδο και 25 βαθμούς Κελσίου την εαρινή περίοδο, πλην των στοιχείων των γωνιακών πασσάλων, η θερμοκρασία των οποίων μεταβάλλεται κατά 10 και 15 βαθμούς Κελσίου αντίστοιχα, θεωρώντας καταχρηστικά πως ποσοστό της θερμότητας μεταφέρεται από τους πασσάλους γεωεναλλάκτες στους γωνιακούς, οι οποίοι δεν αποτελούν μέρος τους ενεργειακού συστήματος κατ'αντιστοιχία με τις προηγούμενες φορτίσεις (LC13, LC14). Η συγκεκριμένη φόρτιση αποτελεί μέση λύση των φορτίσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω (θεώρηση όλων των πασσάλων ως γεωεναλλάκτες, θεώρηση όλων των πασσάλων πλην των γωνιακών ως γεωεναλλάκτες, αγνοώντας τη μεταφορά θερμότητας) και αναμένονται τα ανάλογα αποτελέσματα.

Πριν την παράθεση των αποτελεσμάτων γίνεται αναφορά στην αρίθμηση των φορτίσεων που μόλις περιγράφηκαν σε συνδυασμό με τις πιθανές θερμικές φορτίσεις της ενεργειακής κοιτόστρωσης υπό τα οριακά μηχανικά φορτία αστοχίας και λειτουργικότητας που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 5.

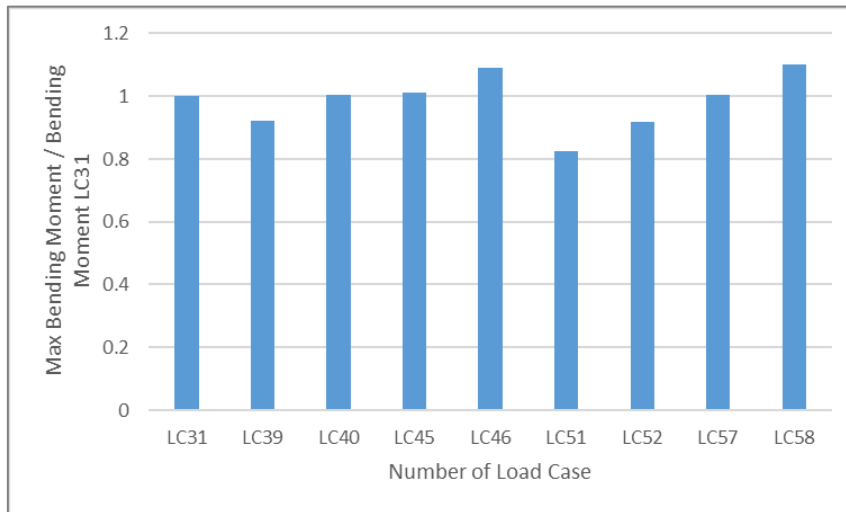
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 11 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 39)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 13 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 40)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 12 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 42)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 14 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 43)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 11 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 45)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 13 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + ULS) (LC 46)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 12 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 48)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 14 και LCC 17 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + ULS) (LC 49)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 11 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 51)
- Συνδυασμός LCC 7 και LCC 13 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 52)

- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 12 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 54)
- Συνδυασμός LCC 8 και LCC 14 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 55)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 11 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 57)
- Συνδυασμός LCC 9 και LCC 13 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων χειμώνα + SLS) (LC 58)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 12 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 60)
- Συνδυασμός LCC 10 και LCC 14 και LCC 18 (λειτουργία πλάκας + πασσάλων καλοκαίρι + SLS) (LC 61)

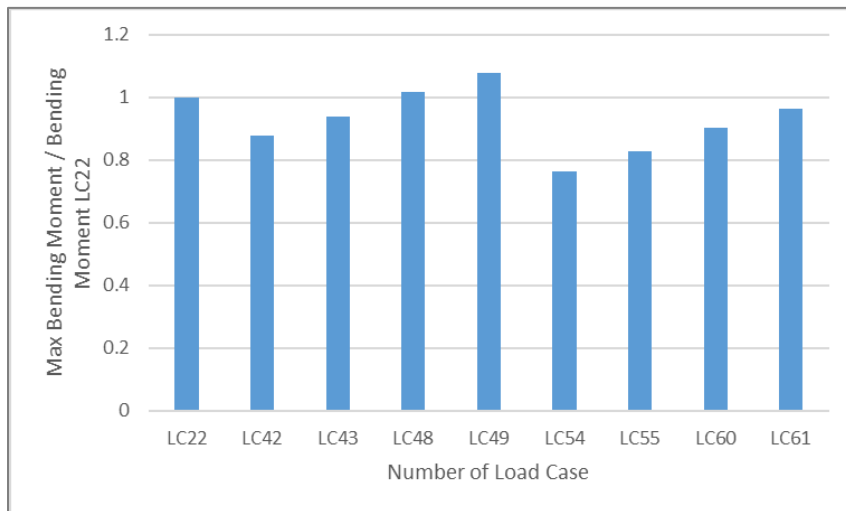
Για λόγους συντομίας τα διαγράμματα των εντατικών και κινηματικών μεγεθών των στοιχείων της θεμελίωσης προς εξέταση είναι συγκεντρωτικά και ακολουθούν την ίδια σειρά με τα προηγούμενα γραφήματα (βλ. Παράρτημα Α'). Παρκάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα κανονικοποιημένα ως προς τις φορτίσεις LC21, LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες και LC22, LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα.



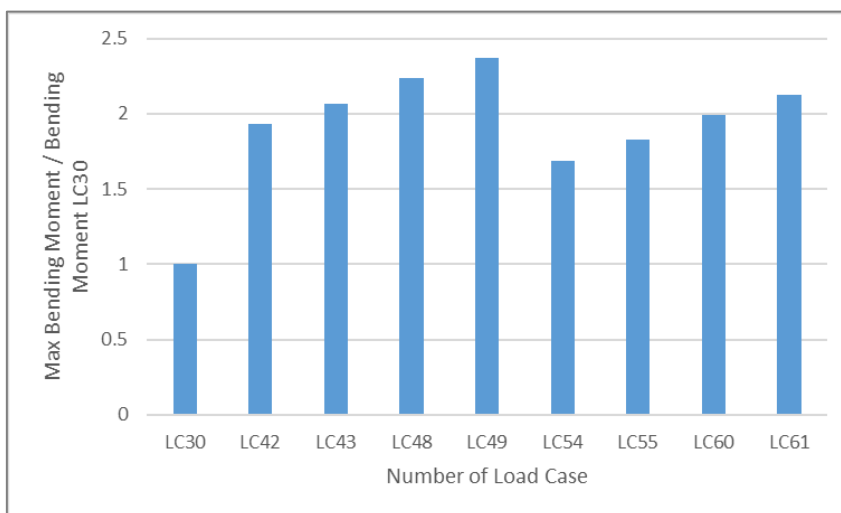
*Σχήμα 5.65* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



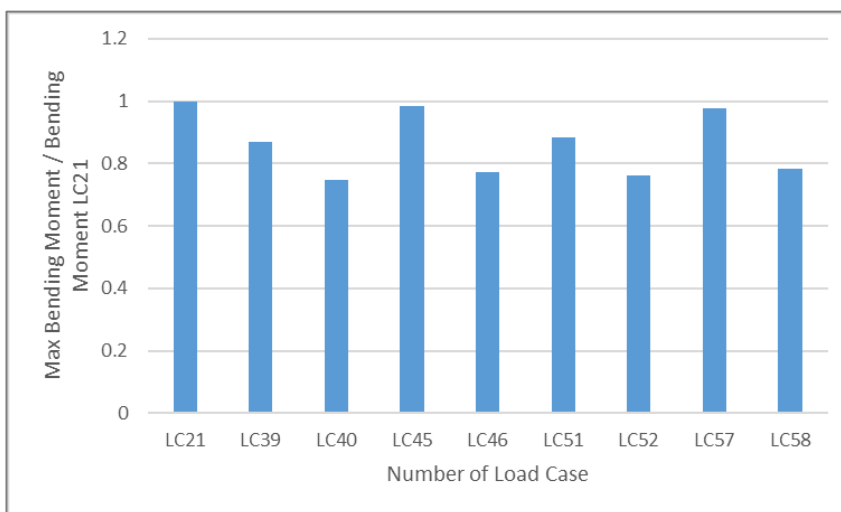
**Σχήμα 5.66** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



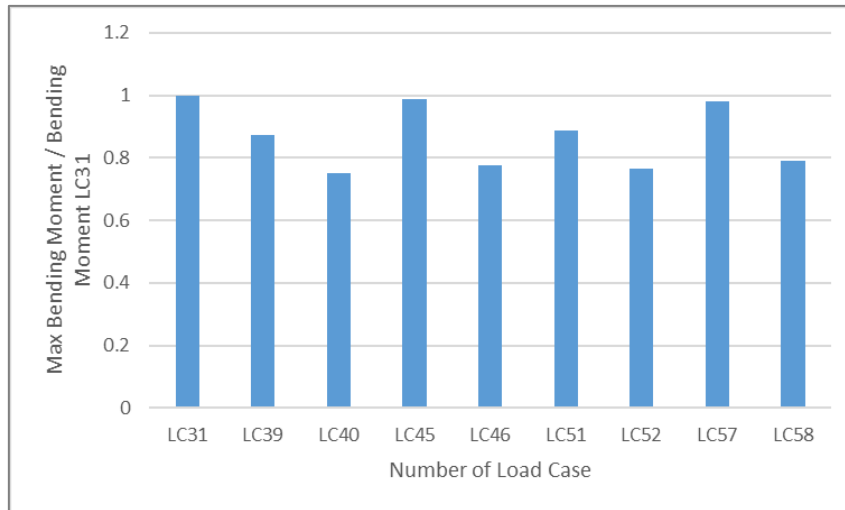
**Σχήμα 5.67** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



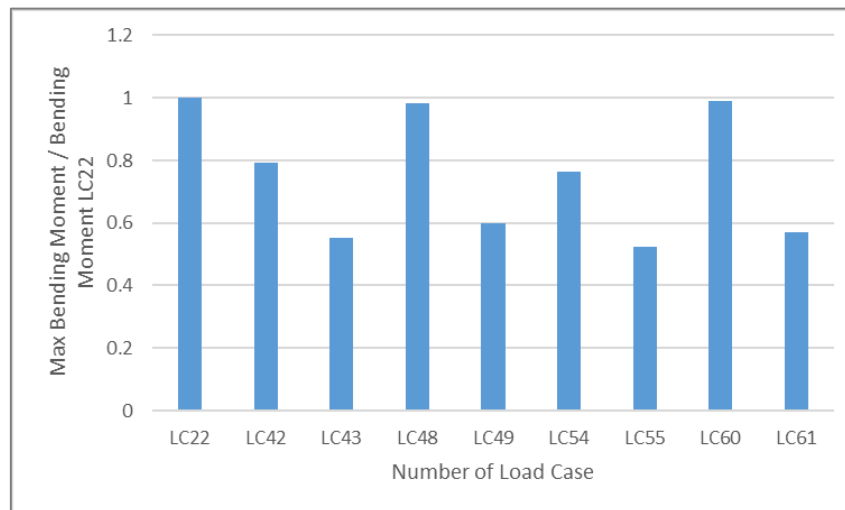
**Σχήμα 5.68** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



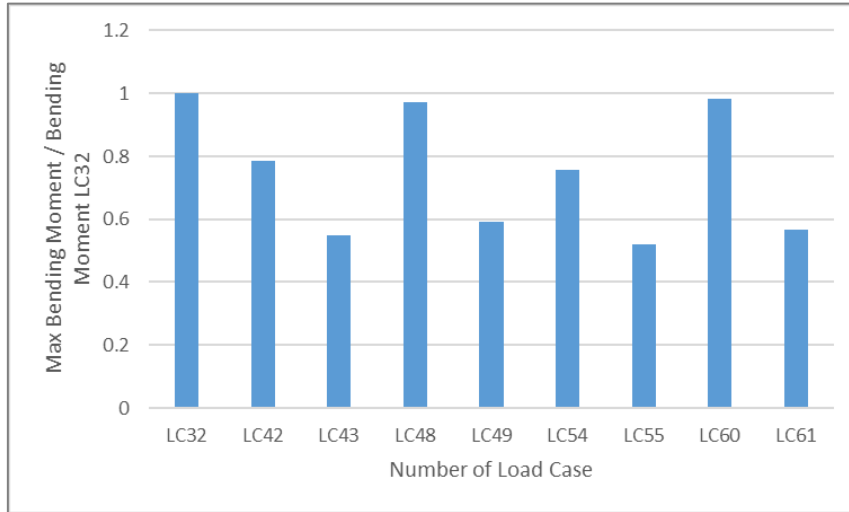
**Σχήμα 5.69** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



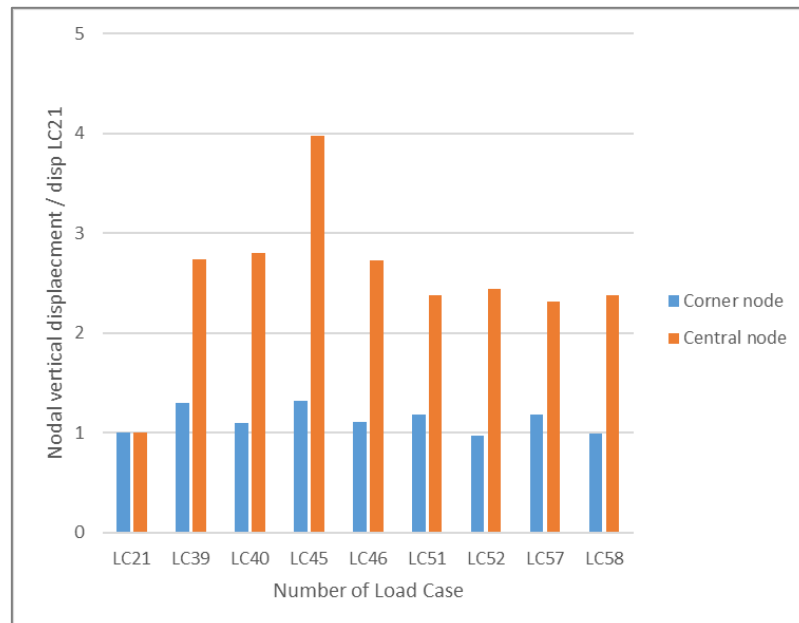
*Σχήμα 5.70* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



*Σχήμα 5.71* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

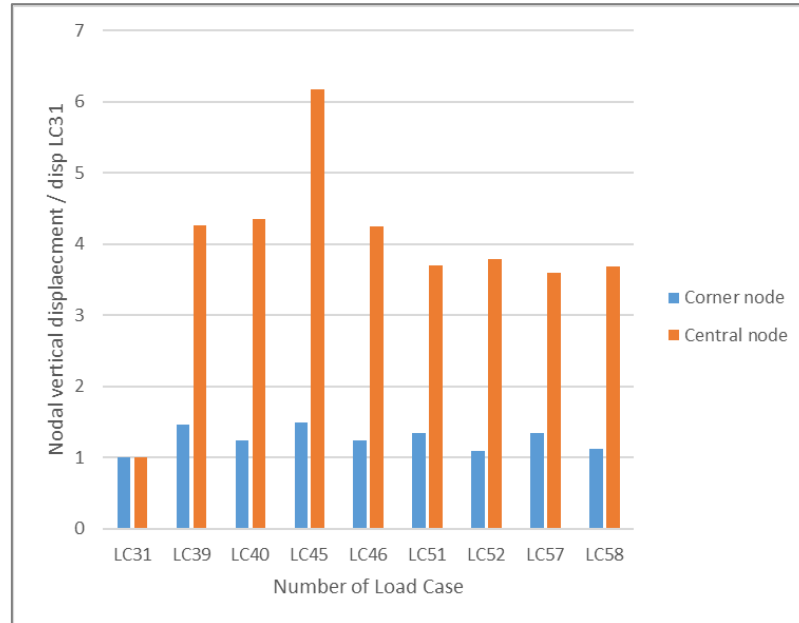


**Σχήμα 5.72** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

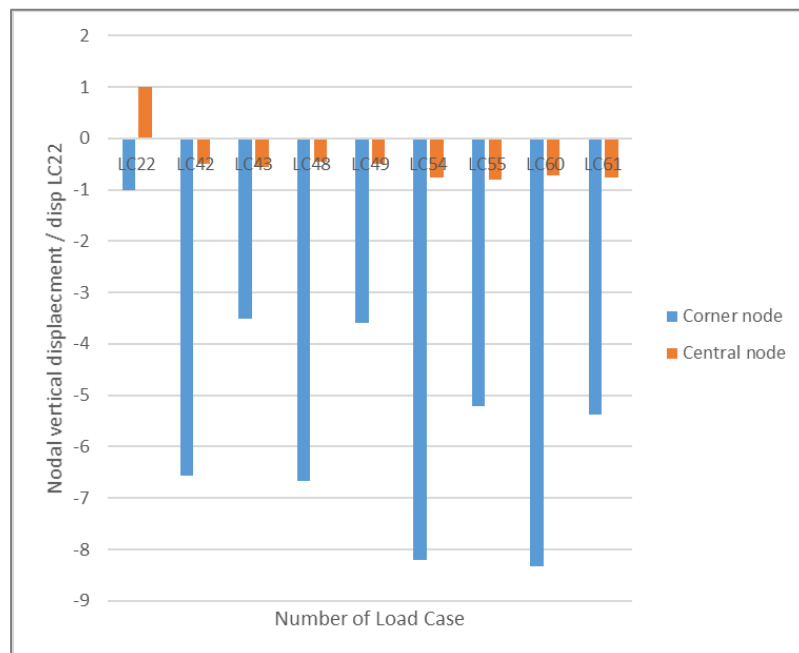


**Σχήμα 5.73** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.

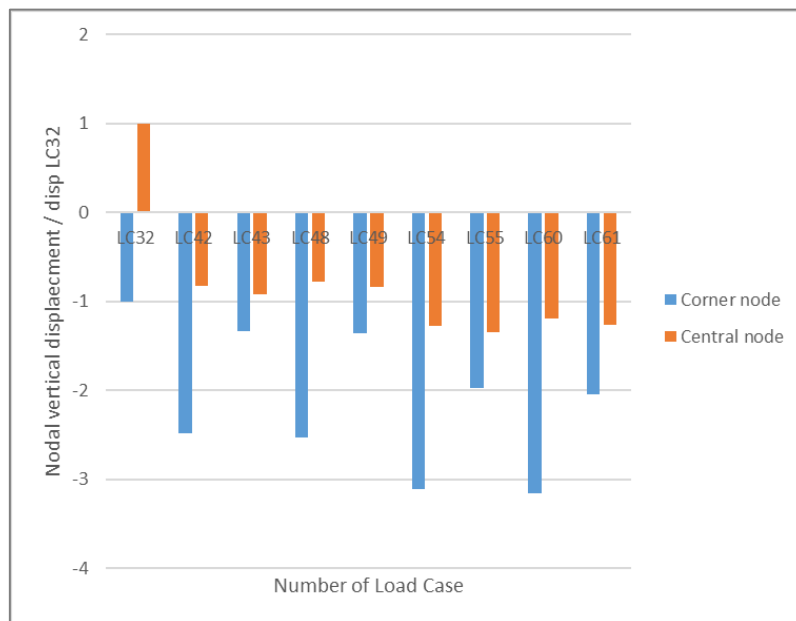




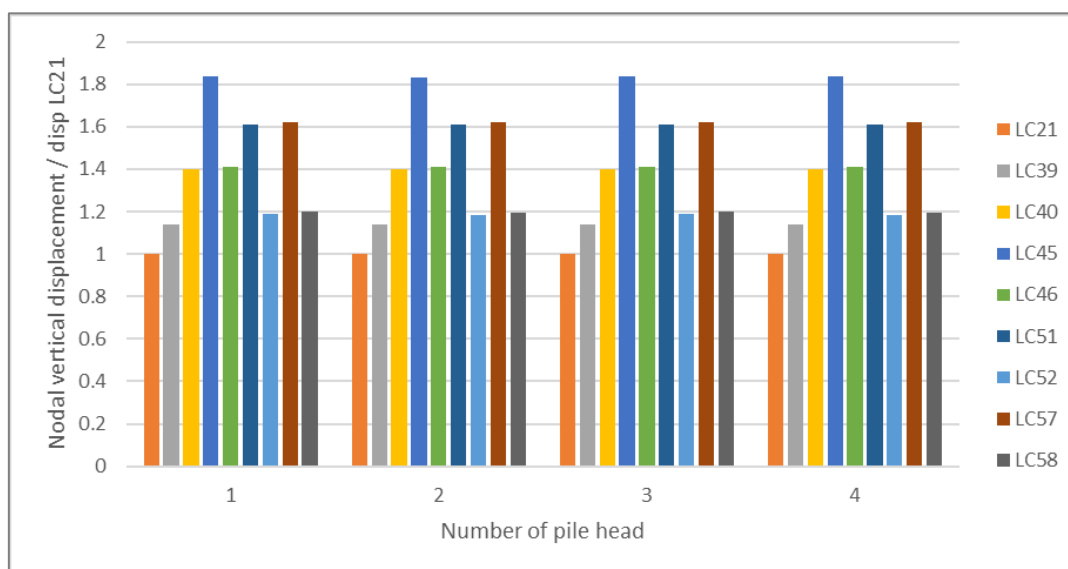
**Σχήμα 5.74** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



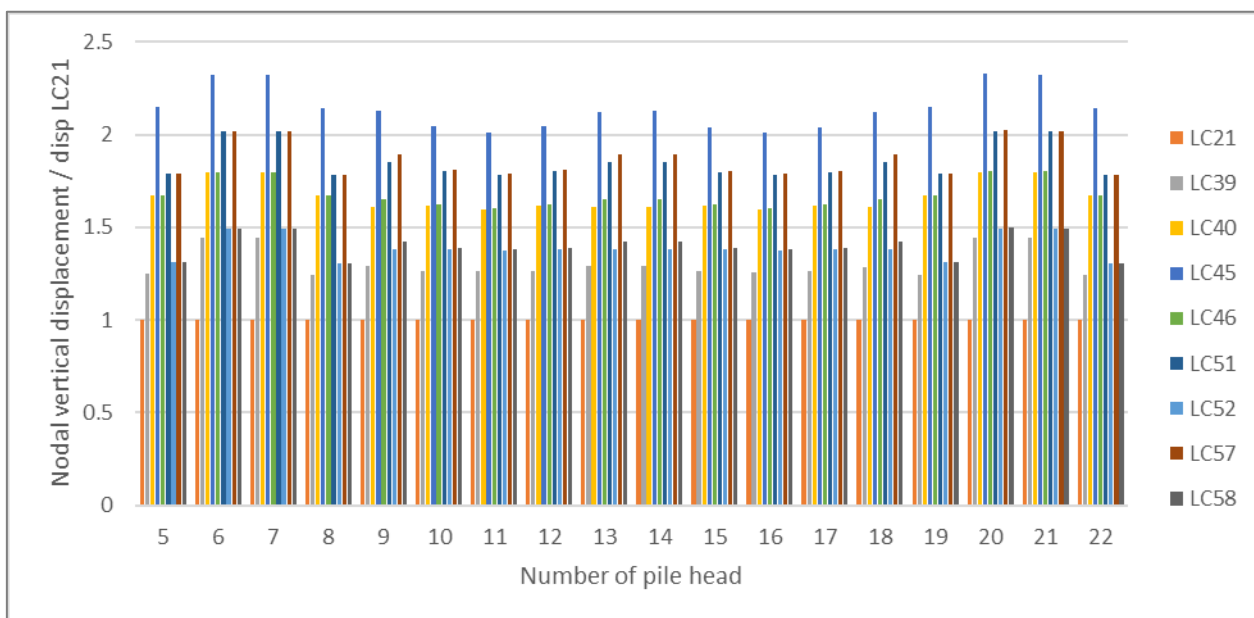
**Σχήμα 5.75** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



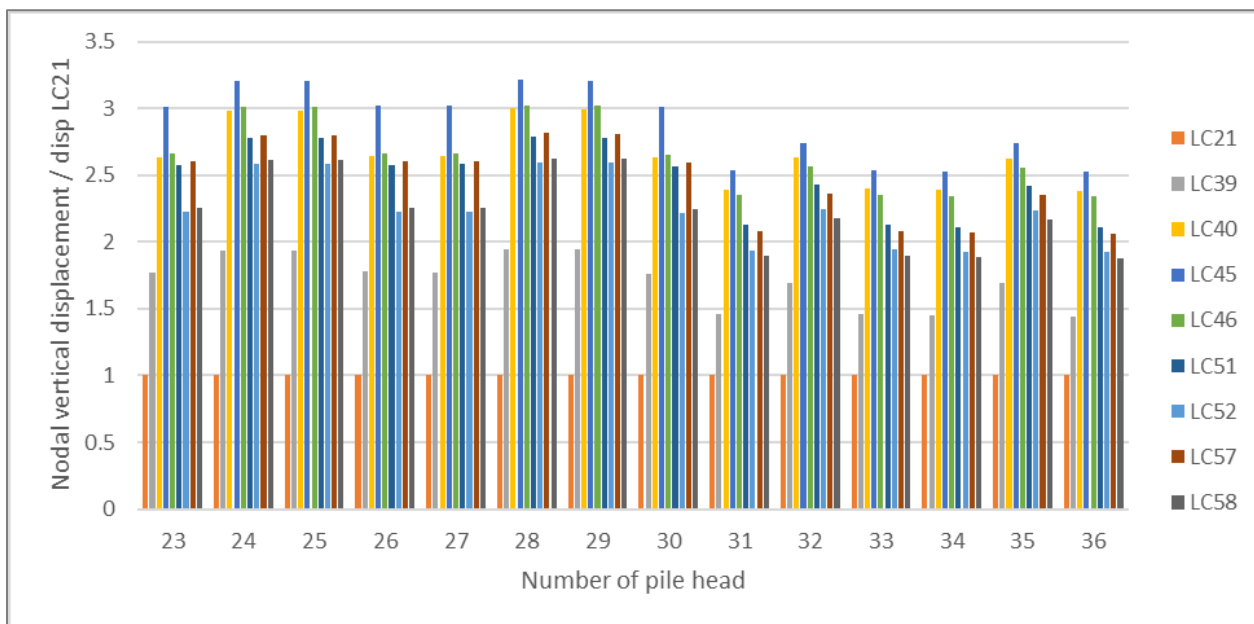
**Σχήμα 5.76** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



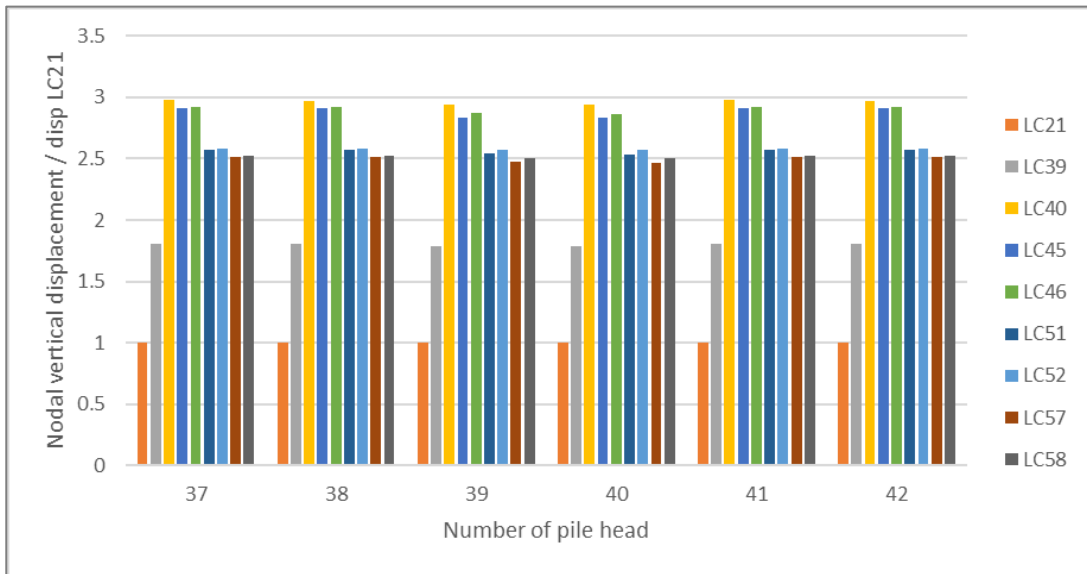
**Σχήμα 5.77** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



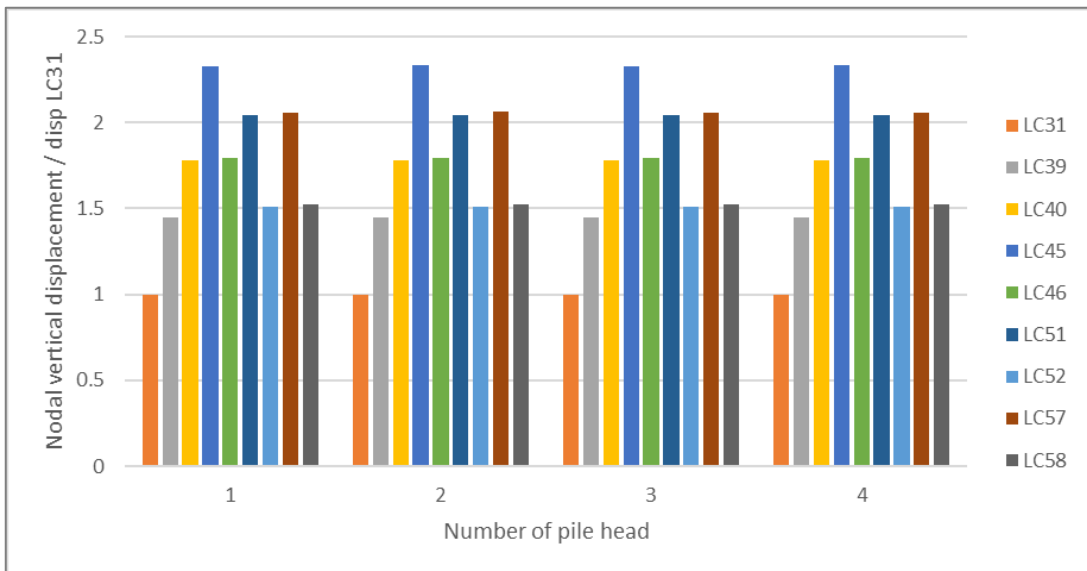
**Σχήμα 5.78** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



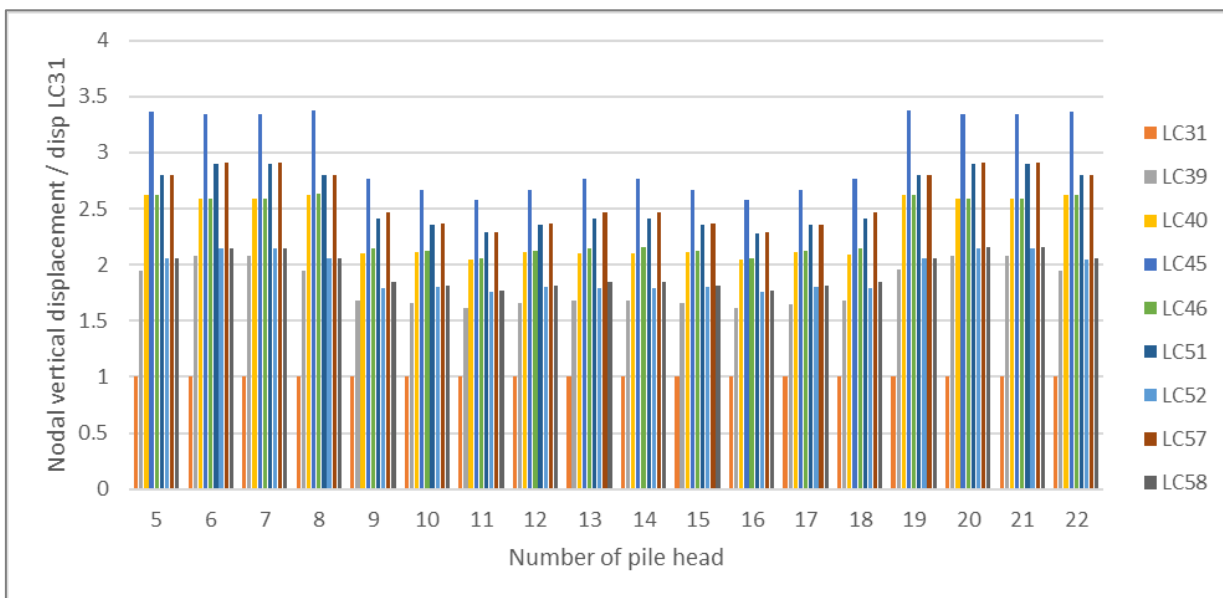
**Σχήμα 5.79** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



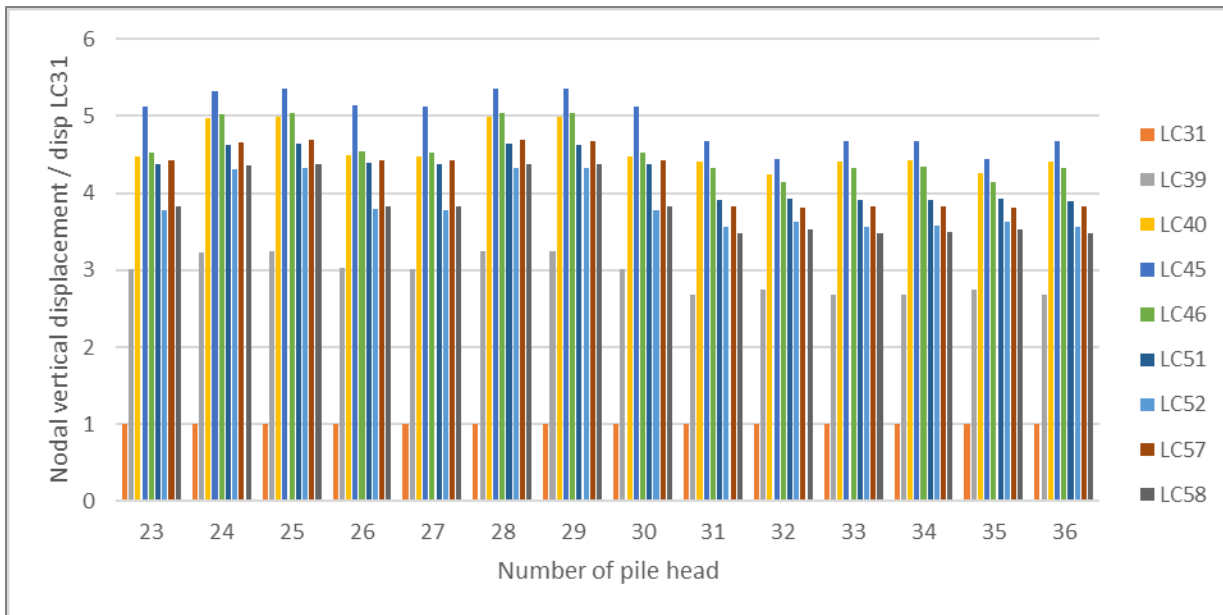
Σχήμα 5.80 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



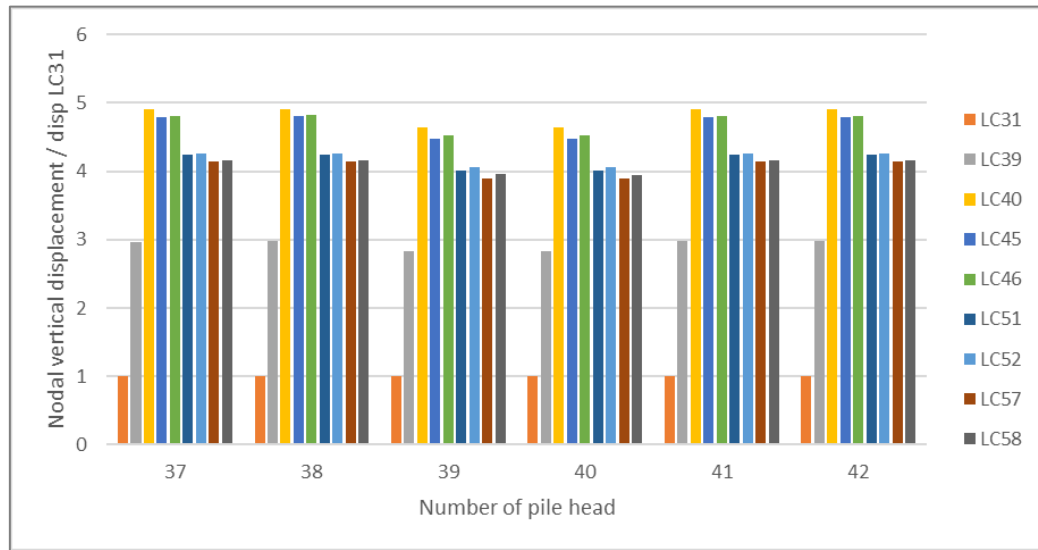
Σχήμα 5.81 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



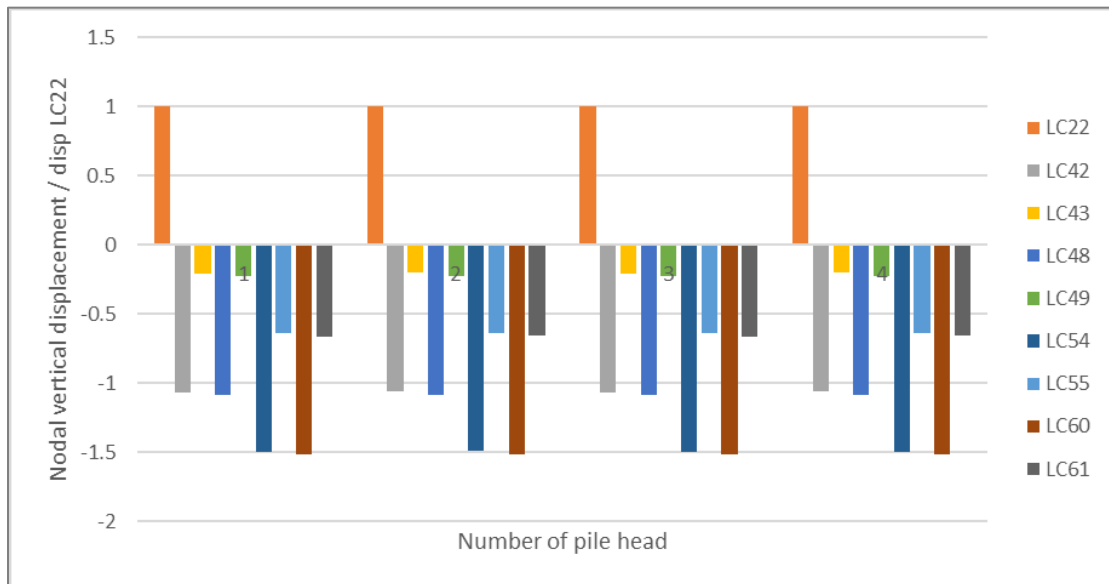
**Σχήμα 5.82** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



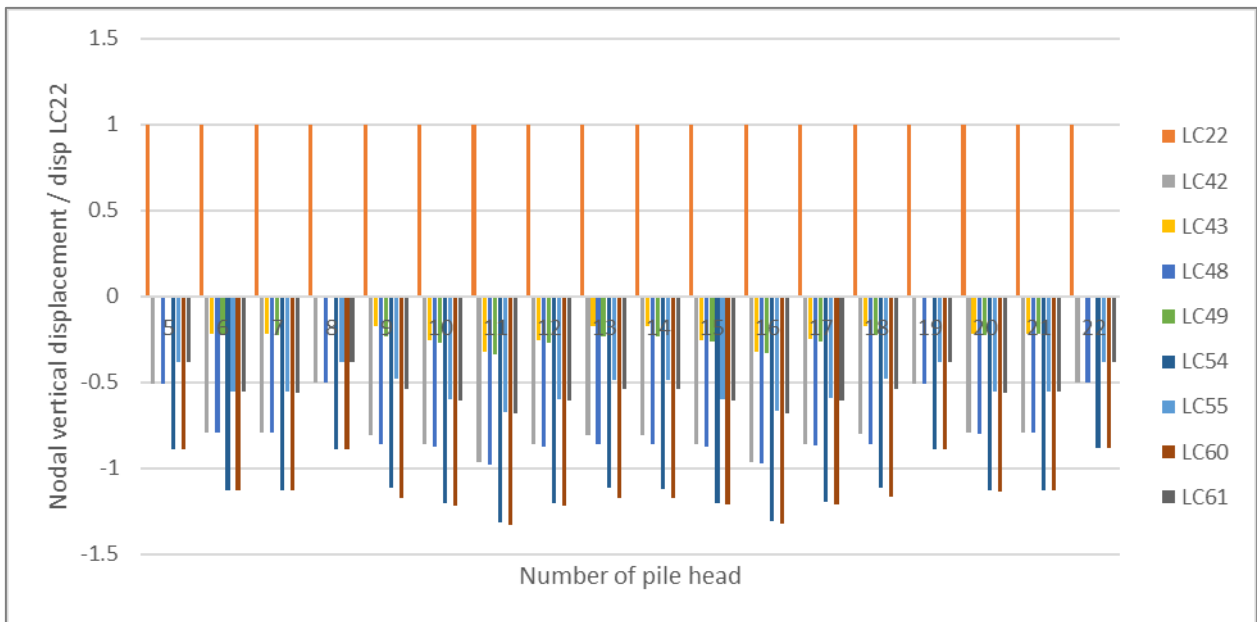
**Σχήμα 5.83** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



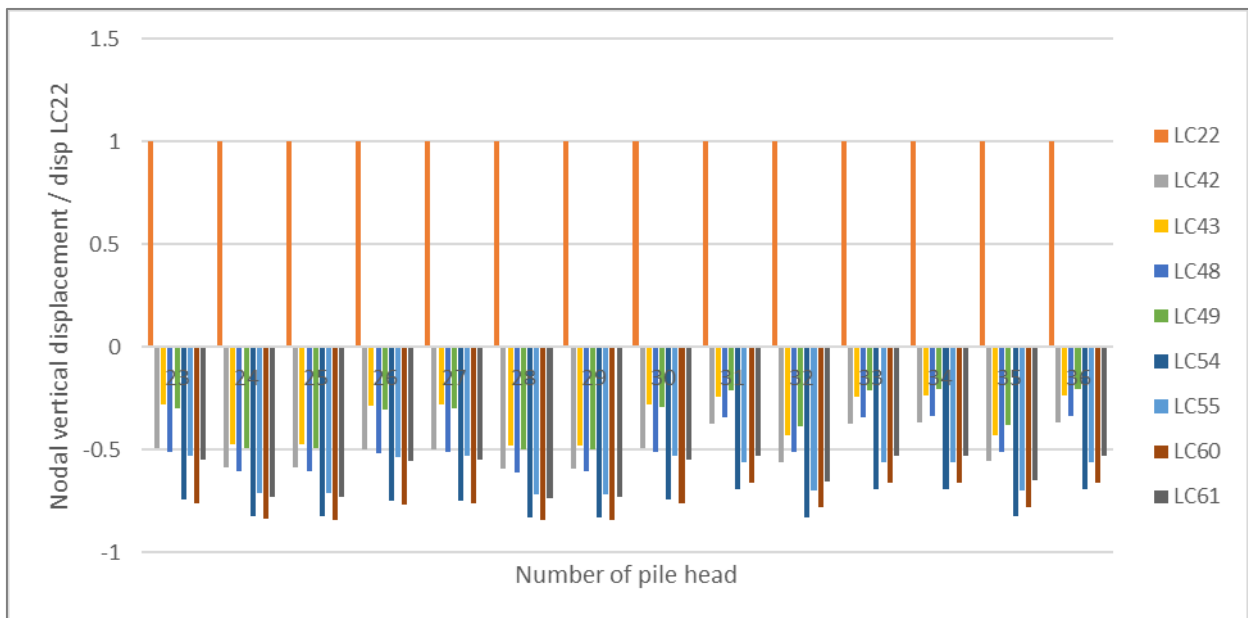
**Σχήμα 5.84** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



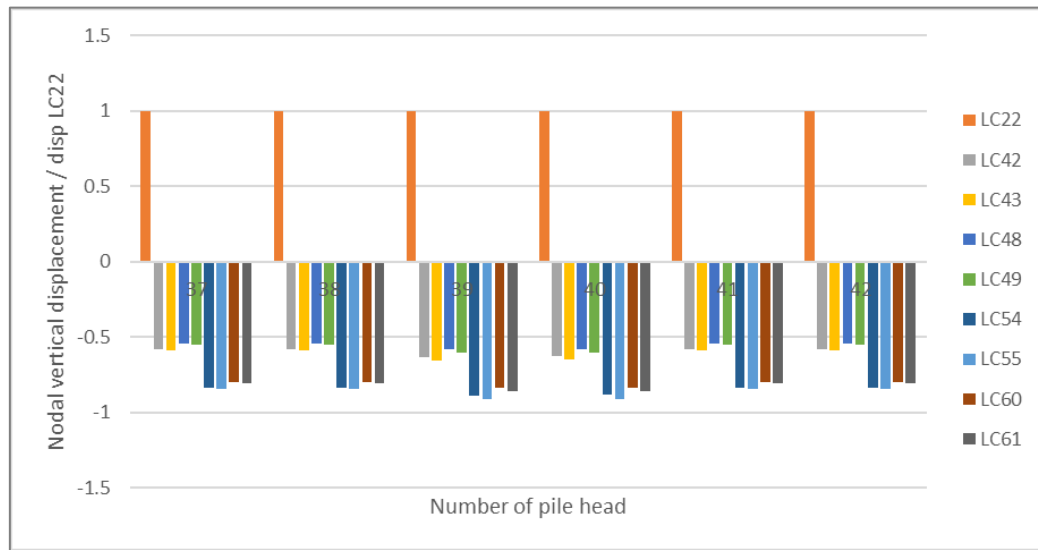
**Σχήμα 5.85** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



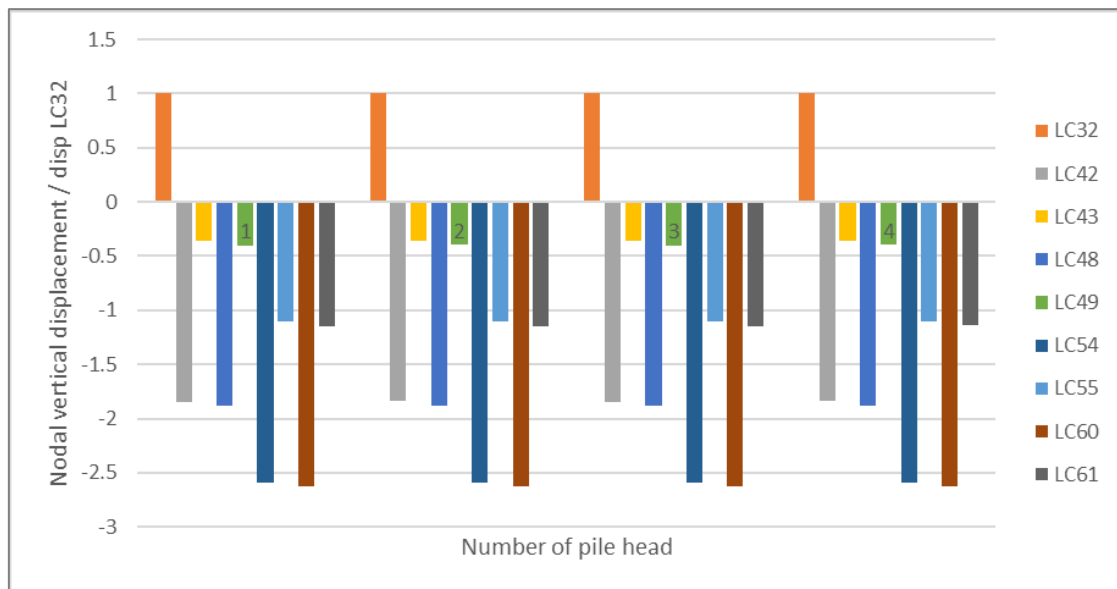
**Σχήμα 5.86** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα 5.87** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

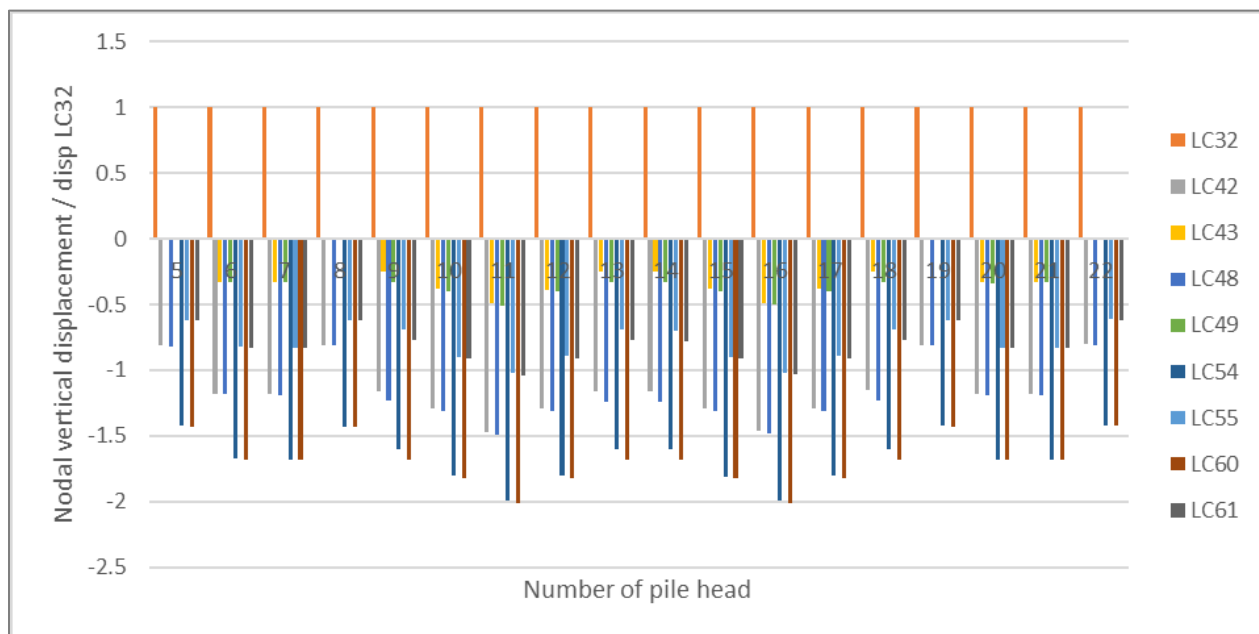


Σχήμα 5.88 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

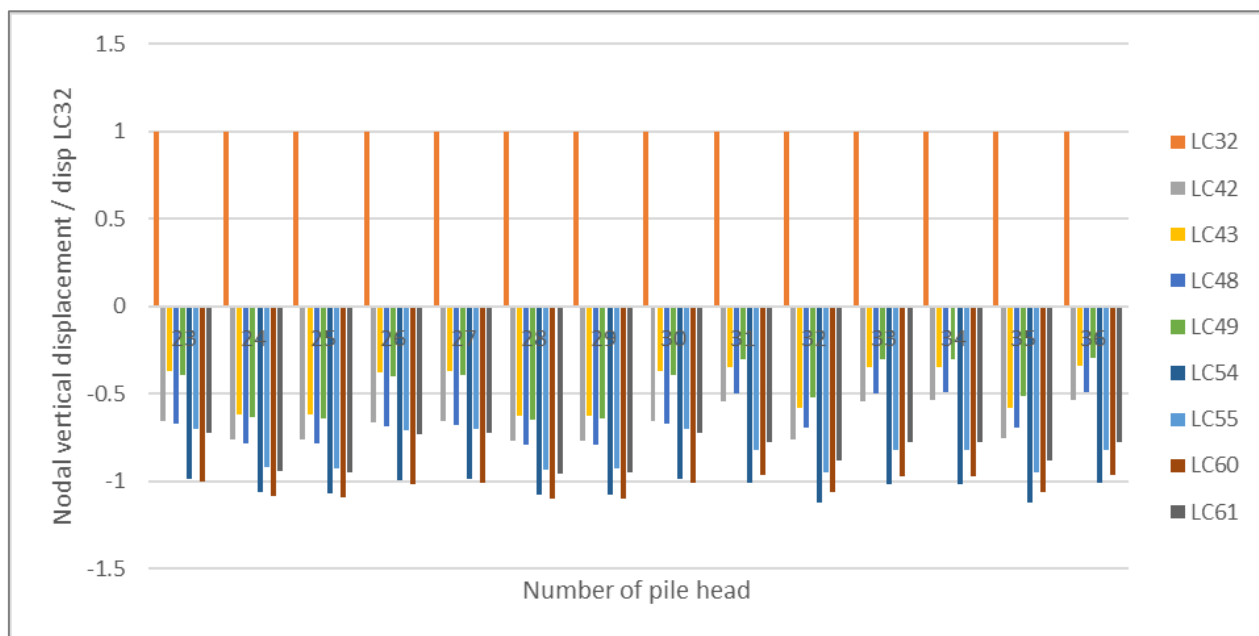


Σχήμα 5.89 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

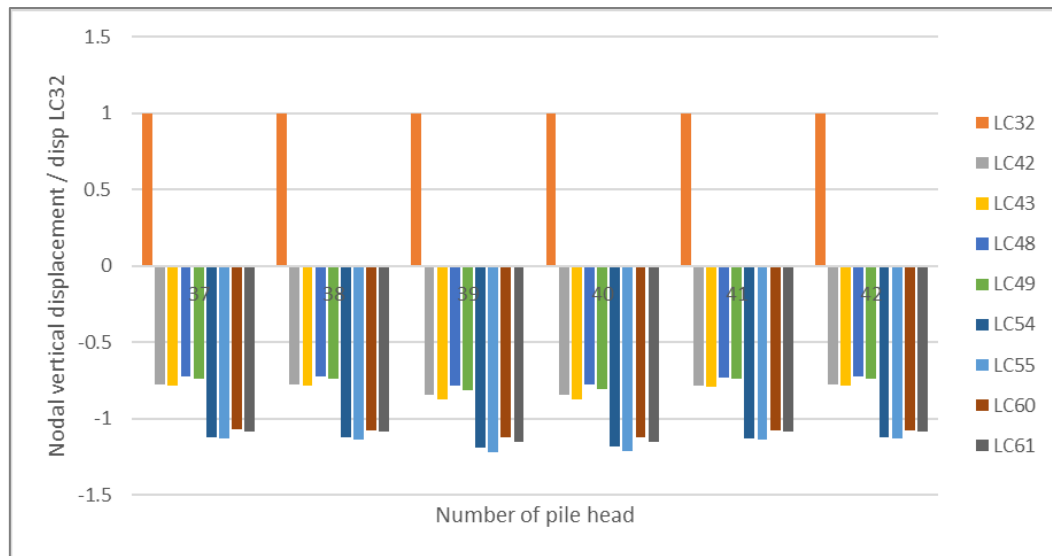




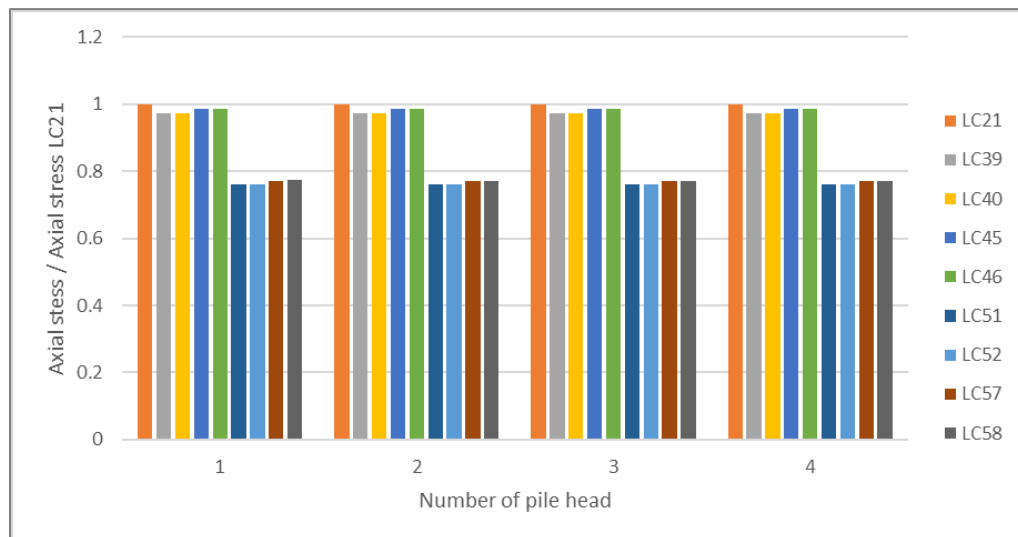
**Σχήμα 5.90** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



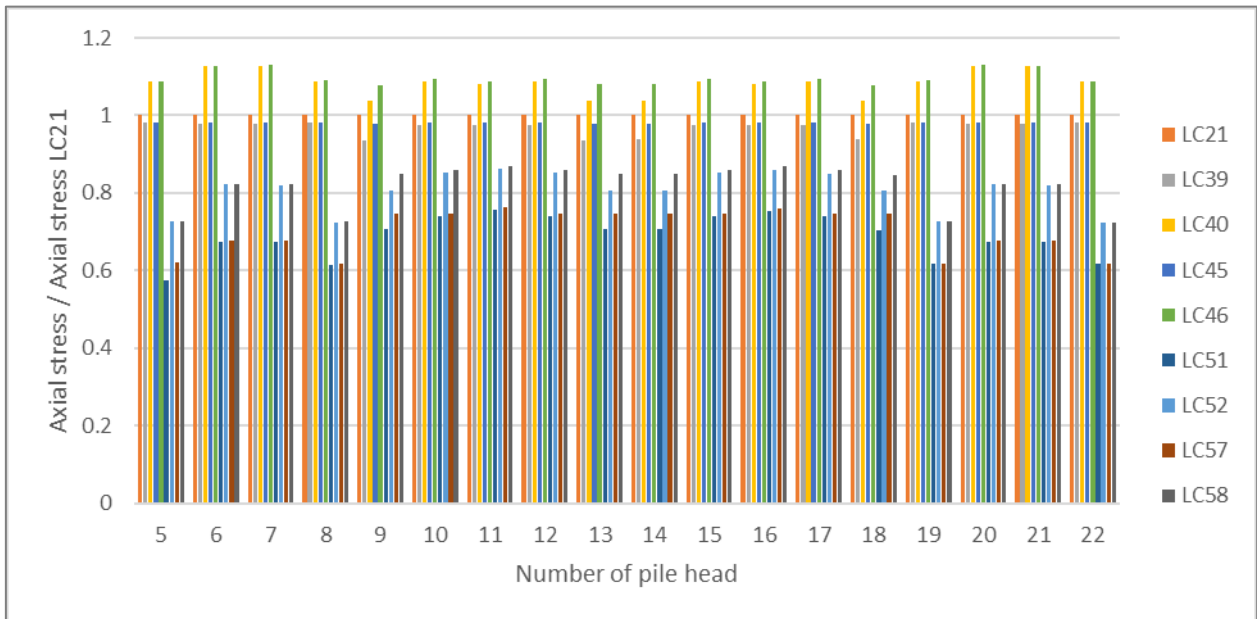
**Σχήμα 5.91** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



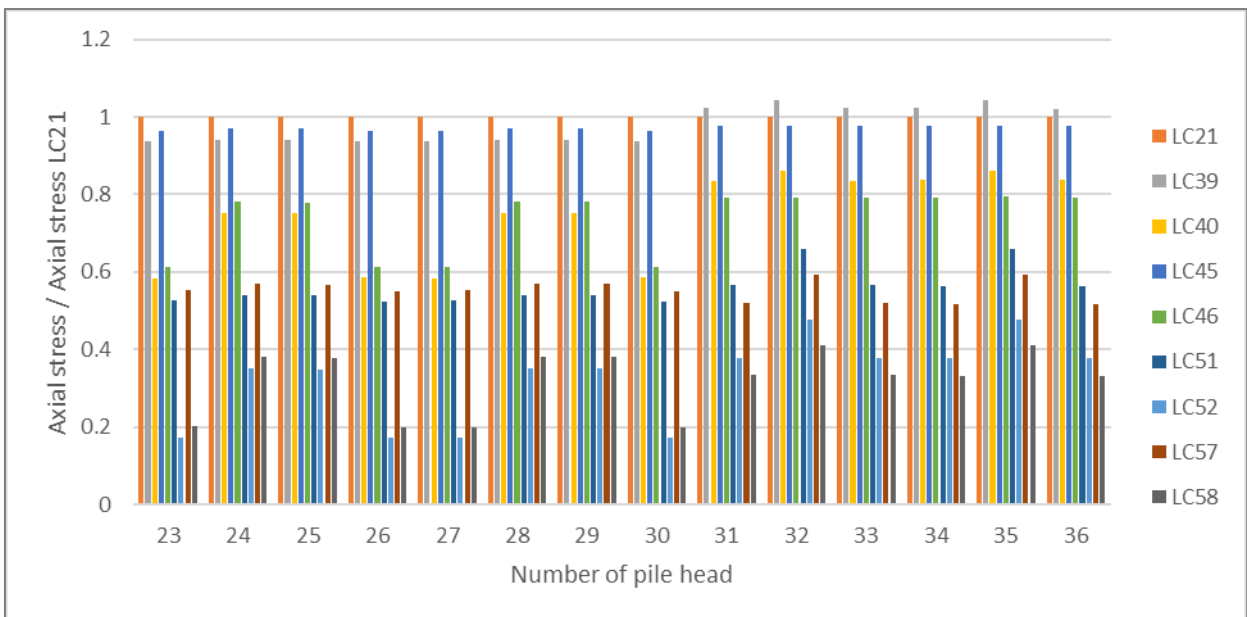
**Σχήμα 5.92** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



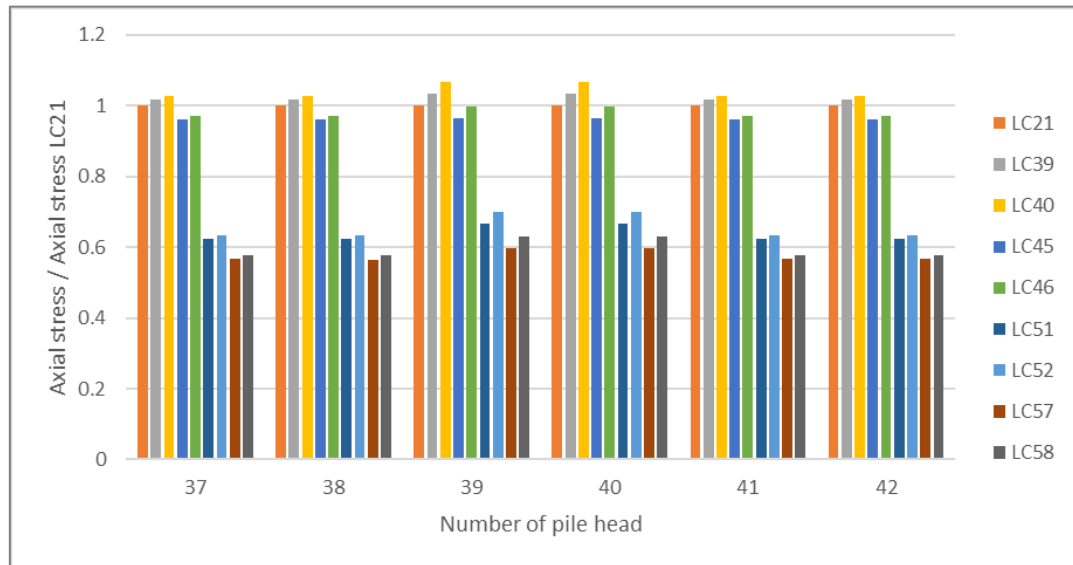
**Σχήμα 5.93** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



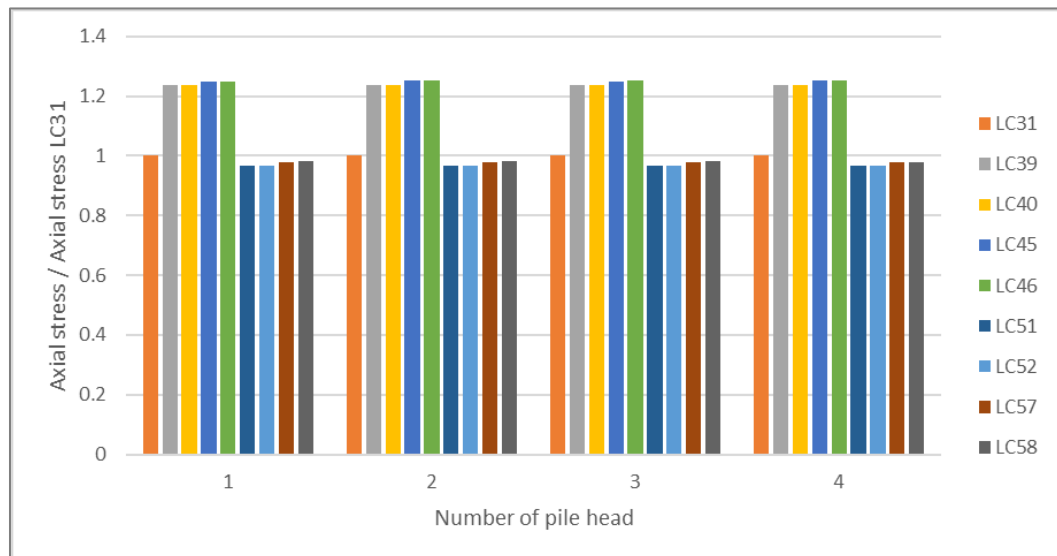
**Σχήμα 5.94** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



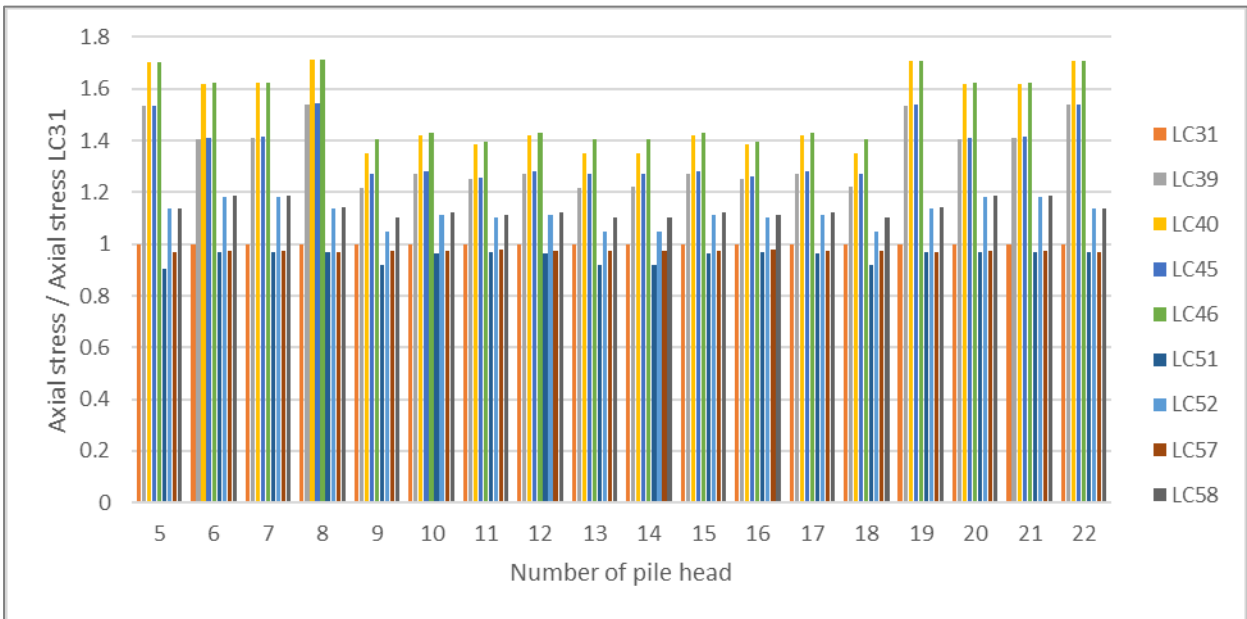
**Σχήμα 5.95** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



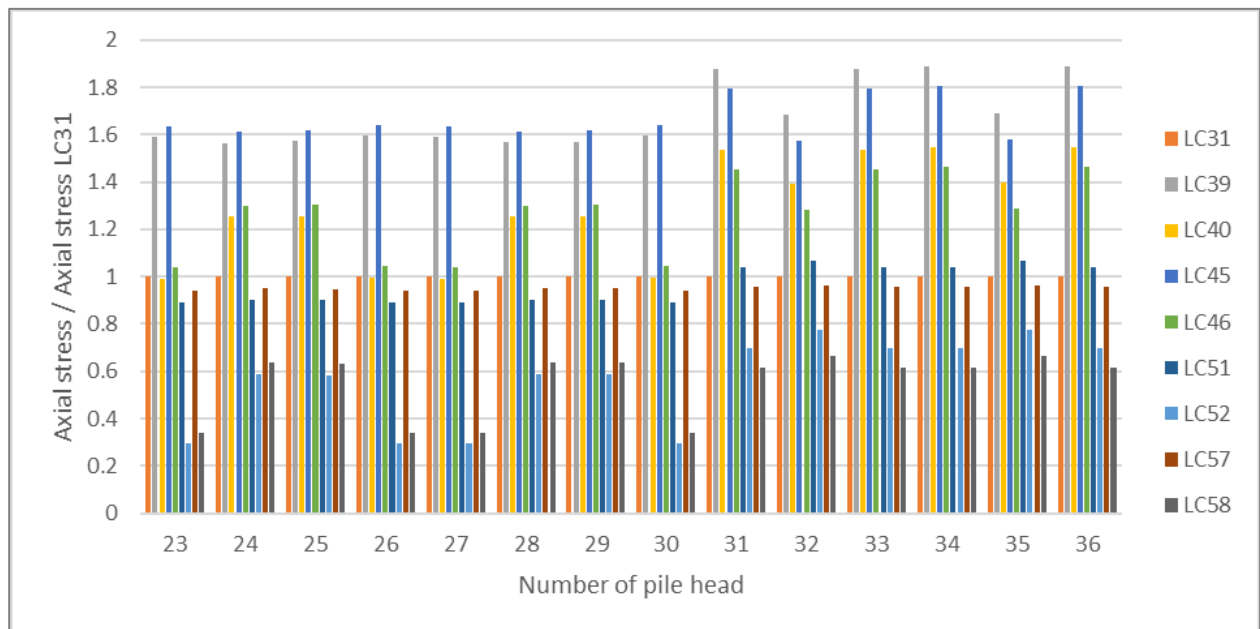
**Σχήμα 5.96** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατάρυψη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



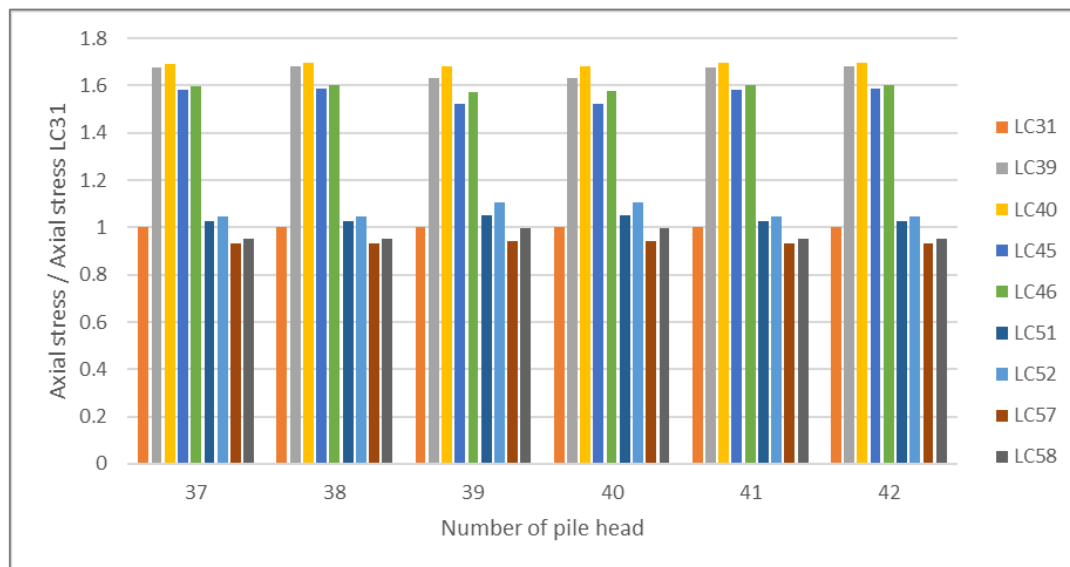
**Σχήμα 5.97** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατάρυψη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



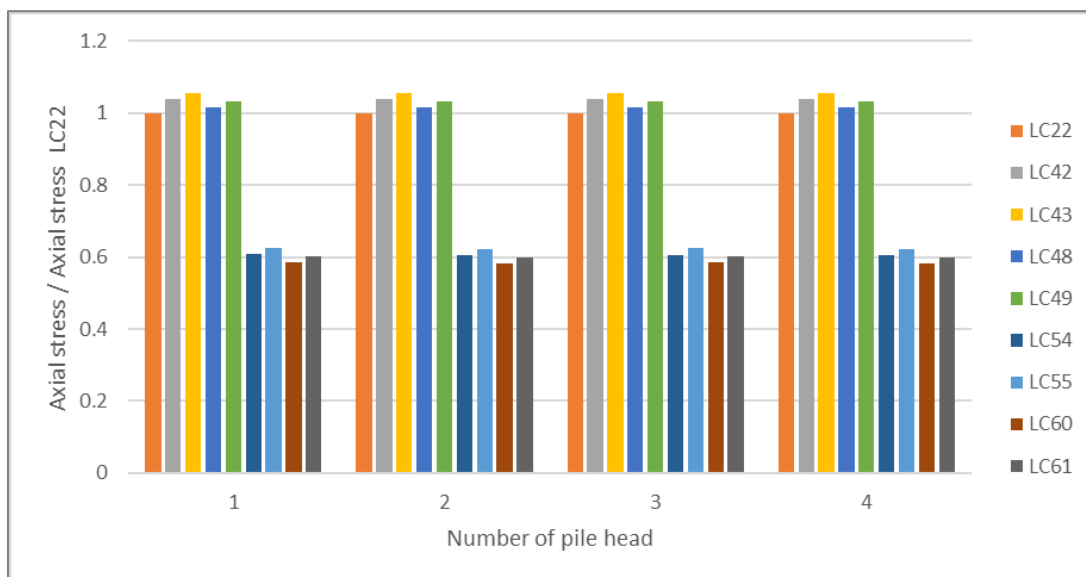
**Σχήμα 5.98** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



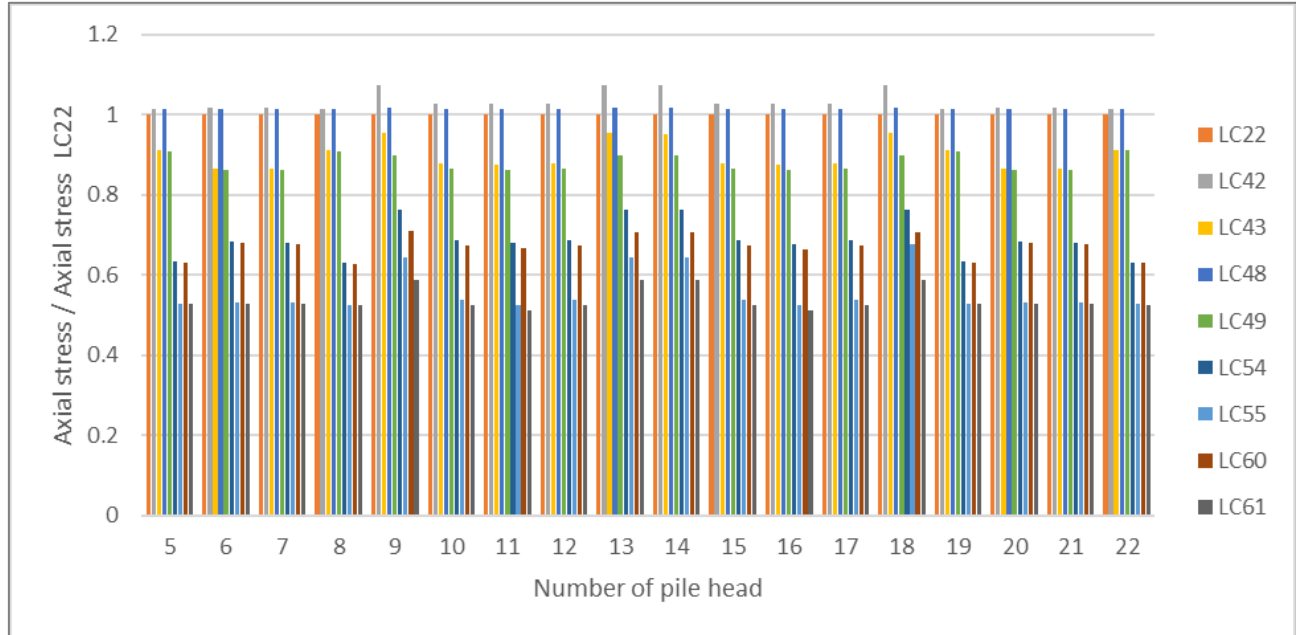
**Σχήμα 5.99** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



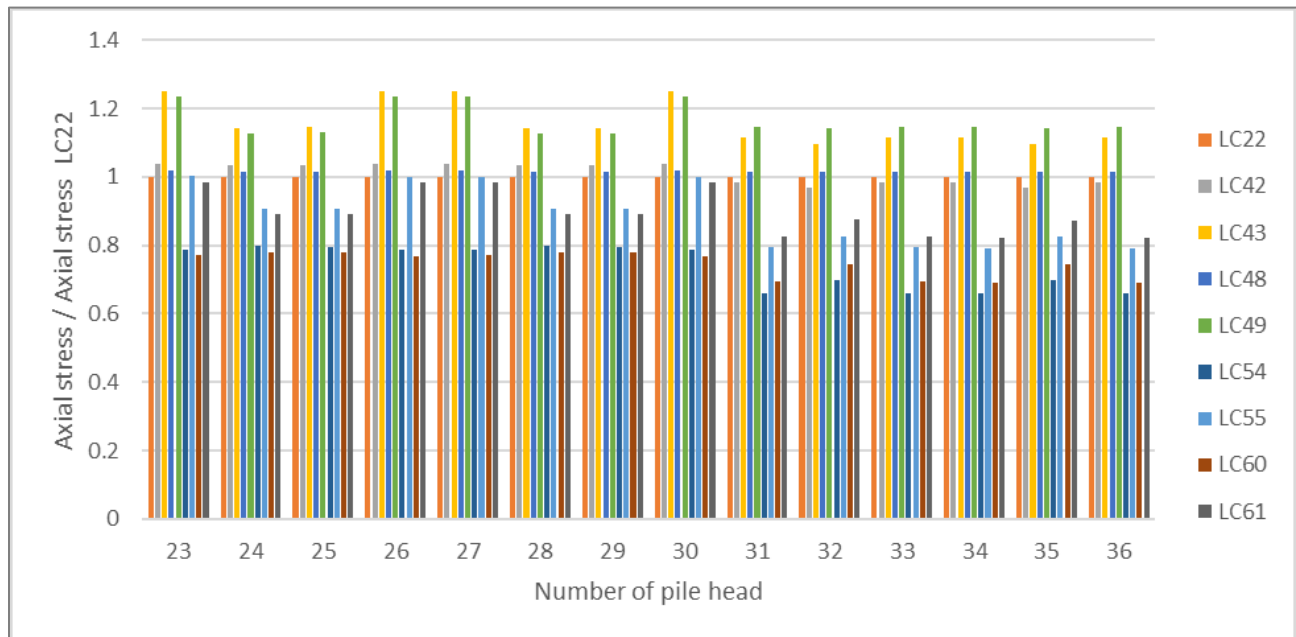
**Σχήμα 5.100** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



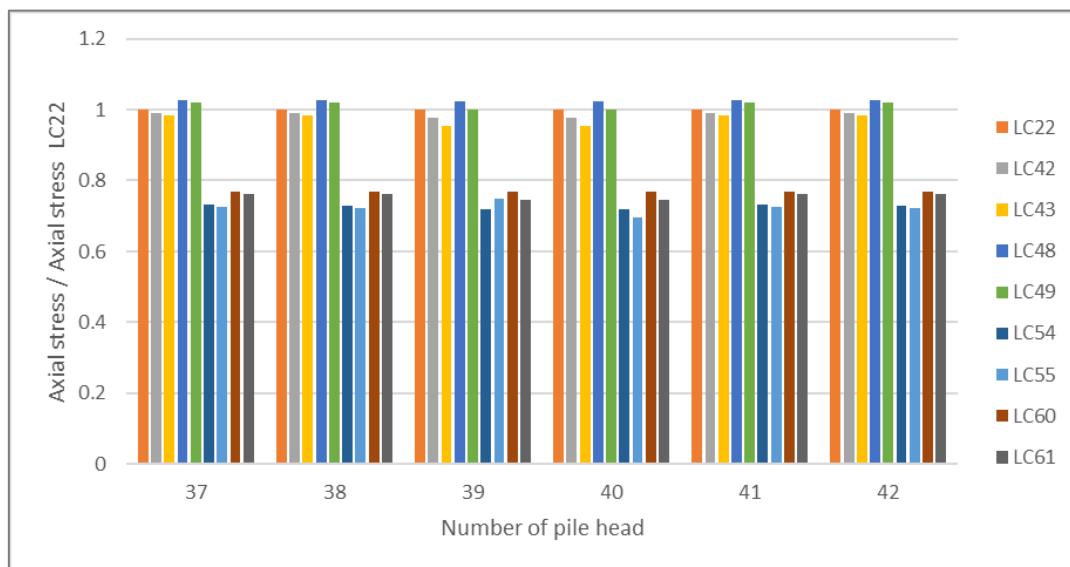
**Σχήμα 5.101** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



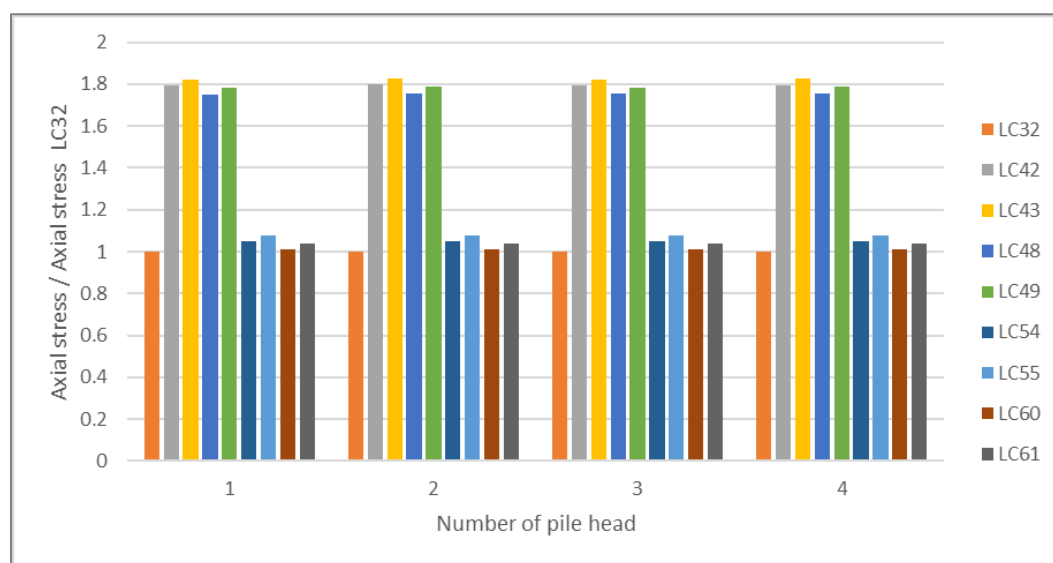
**Σχήμα 5.102** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα 5.103** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

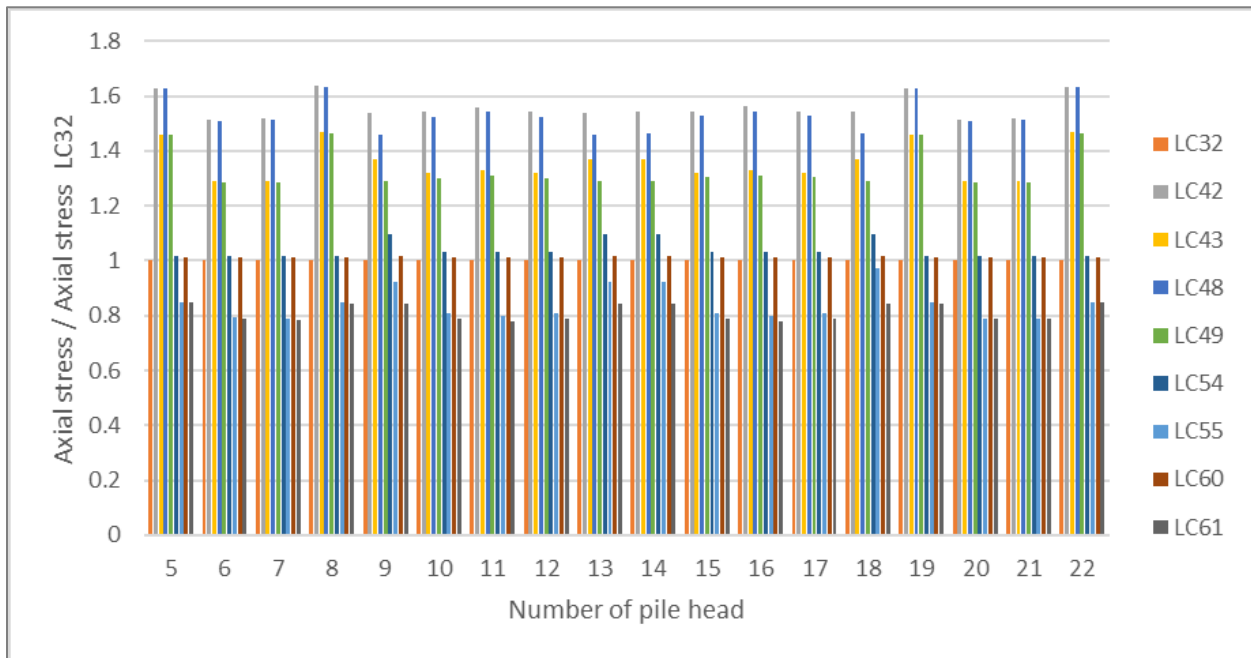


Σχήμα 5.104 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

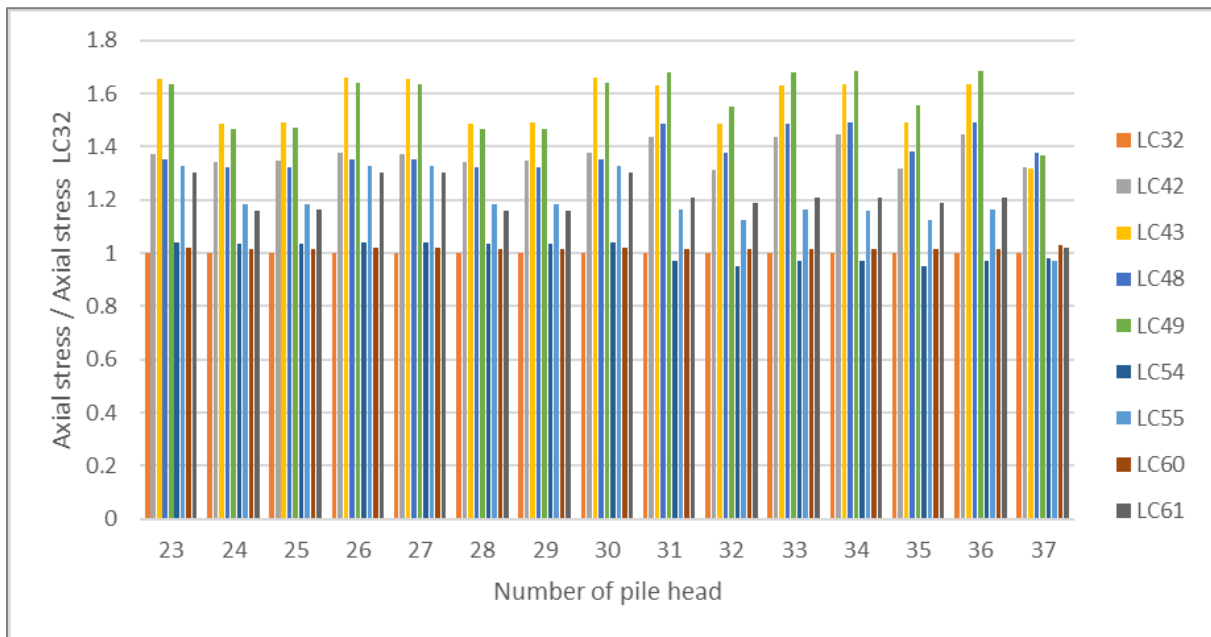


Σχήμα 5.105 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

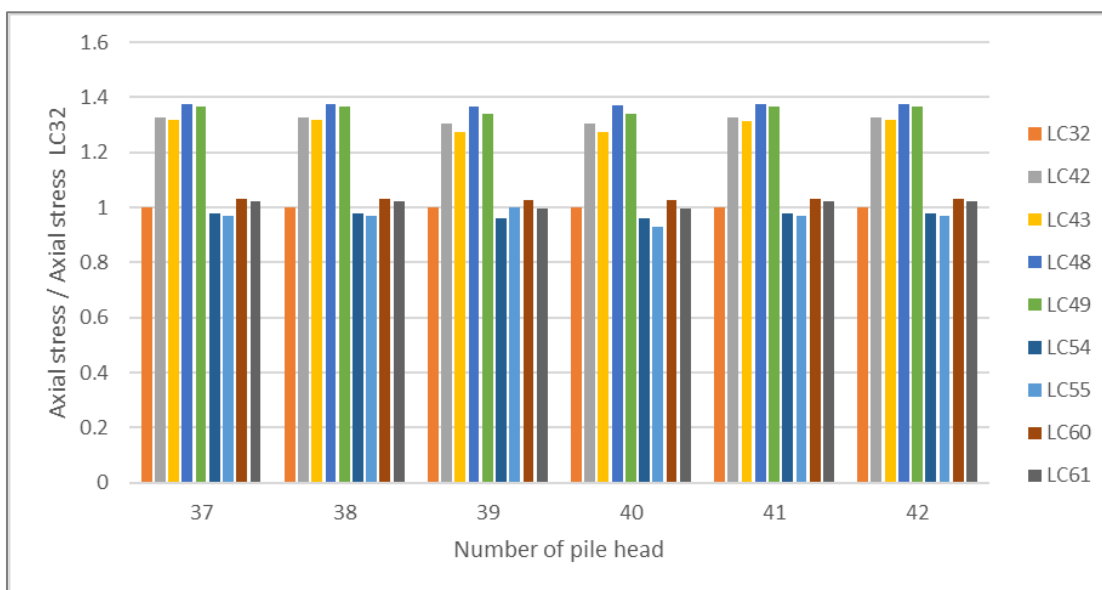




Σχήμα 5.106 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχήμα 5.107 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



*Σχήμα 5.108* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς το βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η σύγκριση των αναλύσεων στοχεύει στη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίπτωση στην απόκριση της συνδυασμένης θεμελίωσης της προσθήκης ενεργειακών πασσάλων στη βασική φόρτιση προς εξέταση, κατά την οποία οι σωλήνες του πρωτεύοντος δικτύου τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του ενιαίου κεφαλόδεσμου υπό την επίδραση των οριακών μηχανικών φορτίων.

### Καμπτική ροπή

#### LC21 – LC45

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS δεν επηρεάζει (σχεδόν αύξηση κατά 1%) τη μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 2%. Η μείωση της καμπτικής ροπής στα στοιχεία των πασσάλων οφείλεται στη μείωση της αρνητικής τιμής της ροπής κάμψης της κοιτόστρωσης περιμετρικά της επιφάνειάς της.

#### LC22 – LC48

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη

μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί αύξηση κατά 2% της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 2%. Προκύπτει δηλαδή πως η αύξηση της ροπής κάμψης της πλάκας με βέλος κάμψης προς τα άνω δημιουργεί ίδιο ποσοστό μείωσης ροπής των πασσάλων.

#### LC21 – LC46

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 8% αύξηση της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 17% και η τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής μεταφέρεται από τους εξωτερικούς κεντρικούς πασσάλους της μεγαλύτερης πλευράς της κοιτόστρωσης με αριθμό κεφαλής 11 και 16 στους γωνιακούς 1-4. Αν και η μέγιστη καμπτική ροπή του στοιχείου της κοιτόστρωσης αυξάνεται με βέλος κάμψης προς τα κάτω, φαίνεται πως η αντίστοιχη ροπή που αναπτύσσεται στους πασσάλους μειώνεται, λόγω της ανακατανομής της στις κεφαλές τους. Οι εσωτερικοί πάσσαλοι αναλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό ροπής συγκριτικά με το αντίστοιχο ποσοστό κατά την ισόποση θερμική φόρτιση των πασσάλων στο σύνολό τους και κατά συνέπεια οι εξωτερικοί δεν καταπονούνται τόσο.

#### LC22 – LC49

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί αύξηση κατά 8% της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 40%. Η αύξηση της ροπής κάμψης των πασσάλων κατά 23% συγκριτικά με τη χειμερινή περίοδο οφείλεται στην αύξηση του αρνητικού (προς τα άνω) βέλους κάμψης που αναπτύσσεται στον κεφαλόδεσμο και στην παράλληλη ανακατανομή της ροπής στα στοιχεία των πασσάλων, ανακουφίζοντας τους εξωτερικούς και κυρίως τους γωνιακούς, οι οποίοι φέρουν και μικρότερο μέγεθος ροπής, λόγω της μικρότερης θερμικής μεταβολής στην οποία υπόκεινται.

Παρατηρείται πως για την ισόποση θερμική φόρτιση των πασσάλων στο σύνολό τους κατά το έτος η μεταβολή της ροπής κάμψης τόσο στην κοιτόστρωση, όσο και στα στοιχεία των πασσάλων είναι αμελητέα, ενώ η μείωση της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό των γωνιακών

πασσάλων κατά 10 βαθμούς Κελσίου επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα στοιχεία θεμελίωσης κατά το έτος.

#### LC31 – LC57

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS δεν επηρεάζει (σχεδόν αύξηση κατά 1%) τη μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 2%.

#### LC32 – LC60

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αύξηση κατά 2% της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 2%.

Παρατηρείται πως οι δράσεις των ίδιων συνδυασμών φορτίσεων για διαφορετικό οριακό μηχανικό φορτίο (ULS και SLS) προκαλούν το ίδιο ποσοστό μεταβολής της μέγιστης καμπτικής ροπής των στοιχείων της συνδυασμένης θεμελίωσης.

#### LC31 – LC58

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αύξηση κατά 10% της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 21%.

#### LC32 – LC61

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αύξηση κατά 8% της μέγιστης καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την τιμή της ροπής κατά την αντίστοιχη καταπόνησή της δίχως την

εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Αντίστοιχα, στο στοιχείο του πασσάλου προκαλείται μείωση καμπτικής ροπής κατά 43%.

Παρατηρείται πως οι δράσεις των ίδιων συνδυασμών φορτίσεων για διαφορετικό οριακό μηχανικό φορτίο (ULS και SLS) προκαλούν αμελητέα μεταβολή του ποσοστού αυξομείωσης της μέγιστης καμπτικής ροπής των στοιχείων της συνδυασμένης θεμελίωσης της τάξεως του 4%.

#### Επικόμβια κατακόρυφη μετακίνηση

##### LC21 – LC45

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 32% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και καθίζηση 4 φορές μεγαλύτερη στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στη μείωση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω καθίζηση του δομικού στοιχείου της πλάκας εξαιτίας της συρρίκνωσης της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (ψύξη) κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης 1.8 φορές για τους γωνιακούς, 2 φορές για τους εξωτερικούς, 2 με 3 φορές για τους ενδιάμεσους και 3 φορές για τους εσωτερικούς πασσάλους. Η αύξηση του ποσοστού καθίζησης των πασσάλων και της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή κατά τη φόρτιση χωρίς μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των πασσάλων οφείλεται στην τάση που έχει πλέον το δομικό στοιχείο του πασσάλου να συρρικνωθεί. Το κατώτερο τμήμα του μήκους των πασσάλων χαρακτηρίζεται από αντίρροπες επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις (προς τα άνω), οι οποίες εν τέλει εξουδετερώνονται από τις αρκετά μεγαλύτερες θετικές επικόμβιες μετακινήσεις και κατά συνέπεια τα στοιχεία των πασσάλων κατά τη συρρίκνωση του μήκους τους ωθούν την επιφάνεια της κοιτόστρωσης προς τα κάτω, προκαλώντας αυξανόμενη καθίζηση στο συνολικό σύστημα της συνδυασμένης θεμελίωσης.

##### LC22 – LC48

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί αύξηση 6.7 φορές της κατακόρυφης μετακίνησης προς τα άνω στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και μείωση κατά 54% με αντίρροπη φορά (προς τα άνω) στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων

στους πασσάλους. Η αλλαγή διεύθυνσης και η μείωση της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων προς τα άνω οφείλεται στην αύξηση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας, εξαιτίας της διόγκωσης (διαστολή) της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (θέρμανση) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα μετακίνηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση προς τα άνω της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 10% στις κεφαλές των γωνιακών, μείωση προς τα άνω κατά 50% για τους εξωτερικούς της μικρής πλευράς της κοιτόστρωσης γειτονικά των γωνιακών (αριθμός κεφαλής 5,8,19,22), για τους κεντρικούς εξωτερικούς της μεγάλης πλευράς της κοιτόστρωσης (αριθμός κεφαλής 11,16) κατά 2% και για τους υπόλοιπους εξωτερικούς μείωση κατά 20%, μείωση κατά 40-50% για τους ενδιάμεσους πλην των ενδιάμεσων με αριθμό κεφαλής 31,33,34,36 με 70% και μείωση κατά 40-45% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση). Το ανώτερο τμήμα του μήκους των πασσάλων χαρακτηρίζεται από αντίρροπες επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις (προς τα άνω) και πλέον η μέγιστη επικόμβια μετακίνηση συναντάται στη βάση του πασσάλου.

#### LC21 – LC46

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί 10% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και αύξηση 2.7 φορές στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στη μείωση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω καθίζηση του δομικού στοιχείου της πλάκας εξαιτίας της συρρίκνωσης της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (ψύξη) κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης 1.5 φορά για τους γωνιακούς, 1.8 φορές για τους εξωτερικούς, 2.5-3 φορές για τους ενδιάμεσους και 3 φορές για τους εσωτερικούς πασσάλους. Η αύξηση του ποσοστού καθίζησης των πασσάλων και της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή κατά τη φόρτιση χωρίς μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των πασσάλων οφείλεται στην τάση που έχει πλέον το δομικό στοιχείο του πασσάλου να συρρικνωθεί.

Παρατηρείται πως η μείωση της μεταβολής θερμοκρασίας στο εσωτερικό των γωνιακών πασσάλων κατά 10 βαθμούς Κελσίου προκαλεί μείωση του ποσοστού αύξησης της καθίζησης της κοιτόστρωσης με το ποσοστό μείωσης στην περιοχή των γωνιακών κόμβων να είναι 5 φορές μεγαλύτερο αυτού της κεντρικής περιοχής, ενώ οι καθιζήσεις των πασσάλων κάθε κατηγορίας χαρακτηρίζονται από αμελητέα μεταβολή κατακόρυφης μετακίνησης.

#### LC22 – LC49

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου ULS προκαλεί αντίρροπη πλέον μετακίνηση στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης περίπου 4 φορές μεγαλύτερη και αντίρροπη μετακίνηση μειωμένη κατά 50% στον κεντρικό κόμβο συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αλλαγή διεύθυνσης και η μείωση της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων προς τα άνω οφείλεται στην αύξηση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας, εξαιτίας της διόγκωσης (διαστολή) της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (θέρμανση) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αλλαγή φοράς (μετακίνηση κόμβου κεφαλής προς τα άνω) και μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 80% για τους γωνιακούς, αμελητέα μεταβολή για τους εξωτερικούς της μικρής πλευράς της κοιτόστρωσης γειτονικά των γωνιακών (αριθμός κεφαλής 5,8,19,22), για τους κεντρικούς εξωτερικούς της μεγάλης πλευράς της κοιτόστρωσης (αριθμός κεφαλής 11,16) μείωση κατά 70% και για τους υπόλοιπους εξωτερικούς μείωση κατά 75%, μείωση κατά 50-60% για τους ενδιάμεσους πλην των ενδιάμεσων με αριθμό κεφαλής 31,33,34,36 με 80% και μείωση κατά 40-45% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση). Το ανώτερο τμήμα του μήκους των πασσάλων χαρακτηρίζεται από αντίρροπες επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις (προς τα άνω) και πλέον η μέγιστη επικόμβια μετακίνηση συναντάται στη βάση του πασσάλου.

Παρατηρείται πως η μείωση της μεταβολής θερμοκρασίας στο εσωτερικό των γωνιακών πασσάλων προκαλεί μείωση του ποσοστού αύξησης της καθίζησης της κοιτόστρωσης με το ποσοστό μείωσης στην περιοχή των γωνιακών κόμβων να είναι 1.5 φορά μεγαλύτερο αυτού της κεντρικής περιοχής, ενώ οι καθιζήσεις των πασσάλων κάθε κατηγορίας μεταβάλλονται αρκετά. Παρατηρείται πως η μείωση της μεταβολής θερμοκρασίας στο εσωτερικό των γωνιακών

πασσάλων προκαλεί μείωση του ποσοστού αύξησης της μετακίνησης των ίδιων πασσάλων κατά 80%, γεγονός που μετατρέπει τελικά την μετακίνηση των κόμβων των γωνιακών κεφαλών μικρότερη από την αντίστοιχη που εμφανίζουν χωρίς την επίδραση της ομάδας πασσάλων ως γεωεναλλάκτες. Οι κόμβοι κεφαλής των εξωτερικών πασσάλων γειτονικά των γωνιακών και παράλληλα στη μικρή πλευρά της κοιτόστρωσης (5,8,19,22) χαρακτηρίζονται από αμελητέα μετακίνηση. Οι κόμβοι κεφαλής των κεντρικών εξωτερικών πασσάλων παράλληλων στη μεγάλη πλευρά της κοιτόστρωσης (11,16) παρουσιάζουν μεταβολή 68% και οι υπόλοιποι κόμβοι εξωτερικών πασσάλων χαρακτηρίζονται από μεταβολή μετακίνησης κατά 55%. Η μετακίνηση των κόμβων των ενδιάμεσων πασσάλων διαφέρει κατά 10% και η αντίστοιχη των εσωτερικών κατά 5-10%. Προκύπτει λοιπόν, πως κατά την εαρινή περίοδο η μικρότερη κατά 10 βαθμούς Κελσίου μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των γωνιακών πασσάλων συγκριτικά με τη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας των υπόλοιπων πασσάλων – γεωεναλλακτών επιφέρει μεγάλο ποσοστό μείωσης της μετακίνησης των περιφερειακών πασσάλων (γωνιακών και εξωτερικών), ενώ η μείωση της επικόμβιας μετακίνησης των ενδιάμεσων και εσωτερικών πασσάλων κυμαίνεται σε ποσοστό 5-10%

#### LC31 – LC57

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 34% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και καθίζηση 3.6 φορές μεγαλύτερη στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στη μείωση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω καθίζηση του δομικού στοιχείου της πλάκας εξαιτίας της συρρίκνωσης της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (ψύξη) κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης 2 φορές για τους γωνιακούς, 2-2.5 φορές για τους εξωτερικούς, 4-4.5 φορές για τους ενδιάμεσους και 4 φορές για τους εσωτερικούς πασσάλους. Η αύξηση του ποσοστού καθίζησης των πασσάλων και της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή κατά τη φόρτιση χωρίς μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των πασσάλων οφείλεται στην τάση που έχει πλέον το δομικό στοιχείο του πασσάλου να συρρικνωθεί. Το κατώτερο τμήμα του μήκους των πασσάλων χαρακτηρίζεται από αντίρροπες επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις (προς τα άνω), οι οποίες εν τέλει εξουδετερώνονται από τις αρκετά μεγαλύτερες θετικές επικόμβιες μετακινήσεις και κατά συνέπεια τα στοιχεία των πασσάλων κατά τη συρρίκνωση του μήκους τους ωθούν την επιφάνεια της κοιτόστρωσης προς τα κάτω, προκαλώντας αυξανόμενη καθίζηση στο συνολικό σύστημα της συνδυασμένης θεμελίωσης.



LC32 – LC60

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αύξηση περίπου 3 φορές της κατακόρυφης μετακίνησης προς τα άνω στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και αύξηση κατά 20% με αντίρροπη φορά (προς τα άνω) στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αλλαγή διεύθυνσης και η αύξηση της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων προς τα άνω οφείλεται στην αύξηση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας, εξαιτίας της διόγκωσης (διαστολή) της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (θέρμανση) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα μετακίνηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση προς τα άνω της κατακόρυφης μετακίνησης 2.6 φορές στις κεφαλές των γωνιακών, αύξηση προς τα άνω κατά 40% για τους εξωτερικούς της μικρής πλευράς της κοιτόστρωσης γειτονικά των γωνιακών (αριθμός κεφαλής 5,8,19,22), για τους κεντρικούς εξωτερικούς της μεγάλης πλευράς της κοιτόστρωσης (αριθμός κεφαλής 11,16) 2 φορές και για τους υπόλοιπους εξωτερικούς αύξηση κατά 1.8 φορές, αμελητέα αύξηση για τους ενδιάμεσους και αύξηση κατά 10% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση). Το ανώτερο τμήμα του μήκους των πασσάλων χαρακτηρίζεται από αντίρροπες επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις (προς τα άνω) και πλέον η μέγιστη επικόμβια μετακίνηση συναντάται στη βάση του πασσάλου.

LC31 – LC58

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί 12% αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης και αύξηση 4 φορές στον κεντρικό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου οφείλεται στη μείωση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω καθίζηση του δομικού στοιχείου της πλάκας εξαιτίας της συρρίκνωσης της ομάδας πασσάλων

λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (ψύξη) κατά τους χειμερινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 52% στους γωνιακούς, 2 φορές για τους εξωτερικούς, 3.8-4.4 φορές για τους ενδιάμεσους και 4 φορές για τους εσωτερικούς πασσάλους. Η αύξηση του ποσοστού καθίζησης των πασσάλων και της κοιτόστρωσης συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή κατά τη φόρτιση χωρίς μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των πασσάλων οφείλεται στην τάση που έχει πλέον το δομικό στοιχείο του πασσάλου να συρρικνωθεί.

Παρατηρείται πως η μείωση της μεταβολής θερμοκρασίας στο εσωτερικό των γωνιακών πασσάλων κατά 10 βαθμούς Κελσίου προκαλεί μείωση του ποσοστού αύξησης της μετακίνησης της περιοχής των γωνιακών κόμβων κατά 35%, ενώ το ποσοστό μεταβολής της μετακίνησης της κεντρικής περιοχής δε μεταβάλλεται σημαντικά. Οι καθιζήσεις των πασσάλων κάθε κατηγορίας χαρακτηρίζονται από αμελητέα μεταβολή κατακόρυφης μετακίνησης, πέραν της επικόμβιας μετακίνησης της κεφαλής των γωνιακών πασσάλων που χαρακτηρίζεται από μείωση 1.5 φορές.

#### LC32 – LC61

Κατά τη διάρκεια της εαρινής περιόδου, η επιπλέον θερμική δράση της ομοιόμορφης μεταβολής θερμοκρασίας των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους στην υπάρχουσα ανομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας της κοιτόστρωσης υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου SLS προκαλεί αντίρροπη πλέον μετακίνηση στους γωνιακούς κόμβους της κοιτόστρωσης περίπου 2 φορές μεγαλύτερη και αντίρροπη μετακίνηση αυξημένη κατά 26% στον κεντρικό κόμβο συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μετακίνησης κατά την καταπόνησή της δίχως την εγκατάσταση σωλήνων στους πασσάλους. Η αλλαγή διεύθυνσης και η μείωση της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μετακίνησης του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης με την ταυτόχρονη αύξηση της μετακίνησης των γωνιακών κόμβων προς τα άνω οφείλεται στην αύξηση της κατακόρυφης αντίστασης των πασσάλων έναντι στην επιφάνεια του κεφαλόδεσμου έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω κύρτωση προς τα άνω της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου της πλάκας, εξαιτίας της διόγκωσης (διαστολή) της ομάδας πασσάλων λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής στο εσωτερικό τους (θέρμανση) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Παράλληλα, για τη μετρηθείσα καθίζηση της πλάκας, προκαλείται αλλαγή φοράς (μετακίνηση κόμβου κεφαλής προς τα άνω) και αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης κατά 14% για τους γωνιακούς, 10% αύξηση για τους εξωτερικούς της μικρής πλευράς της κοιτόστρωσης γειτονικά των γωνιακών (αριθμός κεφαλής 5,8,19,22), για τους κεντρικούς εξωτερικούς της μεγάλης πλευράς της κοιτόστρωσης (αριθμός κεφαλής 11,16) μείωση κατά 4% και για τους υπόλοιπους εξωτερικούς μείωση κατά 20-30%, αμελητέα μείωση για τους ενδιάμεσους πλην των ενδιάμεσων με αριθμό κεφαλής 31,33,34,36 με 4% και αύξηση κατά 10% για τους εσωτερικούς πασσάλους. Οι κεφαλές των πασσάλων είναι πακτωμένες στην κοιτόστρωση (ενιαίος κεφαλόδεσμος) με την τελευταία να αποτελεί εύκαμπτο στερεό σώμα. Ως εκτούτου, η διαφοροποίηση του ποσοστού αύξησης της κατακόρυφης μετακίνησης των πασσάλων ανά κατηγορία θέσης οφείλεται στην παραμόρφωση της γεωμετρίας της πλάκας κατά την επίδραση των φορτίων (καμπύλωση). Το ανώτερο τμήμα του

μήκους των πασσάλων χαρακτηρίζεται από αντίρροπες επικόμβιες κατακόρυφες μετακινήσεις (προς τα άνω) και πλέον η μέγιστη επικόμβια μετακίνηση συναντάται στη βάση του πασσάλου.

### Βαθμός λειτουργίας πασσάλων

Ο βαθμός λειτουργίας κάθε πασσάλου είναι ανάλογος της κατακόρυφης μετακίνησης των τελευταίων, τηρώντας την εφαρμογή της καμπύλης φέρουσας ικανότητας – καθίζησης μεμονωμένου πασσάλου κατά το γερμανικό κανονισμό DIN4014. Για λόγους συντομίας η ποσοστιαία μεταβολή του βαθμού λειτουργίας κάθε πασσάλου για τις φορτίσεις που εξετάζονται φαίνεται στα αντίστοιχα σχήματα και συμβαδίζει με τα συμπεράσματα των επικόμβιων μετακινήσεων των πασσάλων για κάθε φόρτιση.

## 6. Συμπεράσματα

Για την εγκατάσταση του συστήματος γεωθερμικής αντλίας χρειάζεται η διερεύνηση μιας σειράς πιθανών μηχανικών και θερμικών φορτίσεων για τον προσδιορισμό της εκάστοτε εντατικής και κινηματικής κατάστασης των δομικών στοιχείων της θεμελίωσης και κατ'επέκταση της κτιριακής κατασκευής. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η μελέτη της απόκρισης της συνδυασμένης θεμελίωσης, τοποθετώντας το πρωτεύον δίκτυο των σωλήνων κάτω από την επιφάνεια του ενιαίου κεφαλόδεσμου.

Κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό, εξετάζοντας την επίδραση των οριακών μηχανικών φορτίων αστοχίας και λειτουργικότητας και ορίζοντας ως επιπρόσθετη θερμική φόρτιση ως προς σύγκριση την ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας του στοιχείου της πλάκας τοποθετώντας του σωλήνες στο εσωτερικό του, διαπιστώθηκε πως κατά τη λειτουργία των σωλήνων στην κάτω παρειά της πλάκας υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου αναπτύσσονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές στη θεμελίωση συγκριτικά με την επίδραση ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής στην πλάκα υπό μηχανικό φορτίο ή και την επιβολή του μηχανικού φορτίου καθ'αυτού. Τη μεγαλύτερη μέση επικόμβια μετακίνηση φαίνεται να προκαλεί η επιβολή του μηχανικού φορτίου οριακής αστοχίας.

Για την αξιοποίηση του δυναμικού της βαθιάς θεμελίωσης της ομάδας πασσάλων εξετάζεται η προσθήκη ενεργειακών πασσάλων στο γεωθερμικό σύστημα. Όπως έχει αναλυθεί, επιλέγεται η θερμική φόρτιση κατά την οποία γίνεται εγκατάσταση σωλήνων κατά μήκος όλων των πασσάλων, καθώς και η θερμική φόρτιση κατά την οποία αφαιρείται η λειτουργία του γεωεναλλάκτη από τους γωνιακούς πασσάλους, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της καταπόνησής τους (η κατανομή των μηχανικών φορτίων της ανωδομής προσδίδει μεγαλύτερο αξονικό φορτίο στις κεφαλές των γωνιακών πασσάλων). Κατά την ανάλυση πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας και λειτουργικότητας των πασσάλων τόσο κατά την επιβολή μηχανικών, όσο και θερμικών φορτίσεων, ώστε να λειτουργούν ομοιόμορφα κατά προσέγγιση και να μην ξεπερνάται η τιμή της φέρουσας ικανότητάς τους. Προέκυψε πως μεγαλύτερη τιμή καμπτικής ροπής αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία του ενεργειακού κεφαλόδεσμου με ανομοιόμορφη

μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του (σωλήνες στο κάτω μέρος) σε συνδυασμό με τη λειτουργία των πασσάλων – γεωεναλλακτών πλην των γωνιακών κατά την εαρινή περίοδο. Κατά τη συγκεκριμένη φόρτιση, αν και επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της αξονικής καταπόνησης της κεφαλής των γωνιακών πασσάλων, η καμπύλωση της γεωμετρίας του ενιαίου κεφαλόδεσμου προκαλεί αυξημένη καταπόνηση, οδηγώντας τους ενδιάμεσους πασσάλους σε διαρροή (βαθμός λειτουργίας 102-107%). Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η ενίσχυση των ενδιάμεσων πασσάλων κατά τη διαστασιολόγηση, αυξάνοντας ενδεχομένως το μήκος τους και κατ'επέκταση το όριο φέρουσας ικανότητας. Όπως έχει σχολιαστεί και παραπάνω για τη συγκεκριμένη φόρτιση (LC49) το μέγεθος και η κατανομή των επικόμβιων μετακινήσεων στα στοιχεία της θεμελίωσης προκύπτουν αρκετά ευνοϊκά και παρά το πρόσθετο κόστος κατασκευής, η αναδιαστασιολόγηση των ενδιάμεσων πασσάλων προβλέπεται να προβεί ωφέλιμη για τη μηχανική και ενεργειακή απόδοση του συνολικού συστήματος. Τέλος, οι δυσμενέστερες μετακινήσεις τόσο της κοιτόστρωσης όσο και των πασσάλων προκαλούνται κατά τη λειτουργία της ενεργειακής πλάκας με ανομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του στοιχείου (σωλήνες στο κάτω μέρος) σε συνδυασμό με τη λειτουργία των ενεργειακών πασσάλων στο σύνολό τους υπό το μηχανικό φορτίο σχεδιασμού οριακής κατάστασης αστοχίας, κατά τη χειμερινή περίοδο (LC45). Ωστόσο, οι μετακινήσεις αυτές είναι εντός των ανεκτών ορίων των δομικών στοιχείων της θεμελίωσης και κατά το βήμα ελέγχου επάρκειας και λειτουργικότητας, πραγματοποιήθηκε ο κατάλληλος σχεδιασμός ώστε οι γωνιακοί πάσσαλοι που καταπονούνται περισσότερο να λειτουργούν στο 96% της φέρουσας ικανότητας.

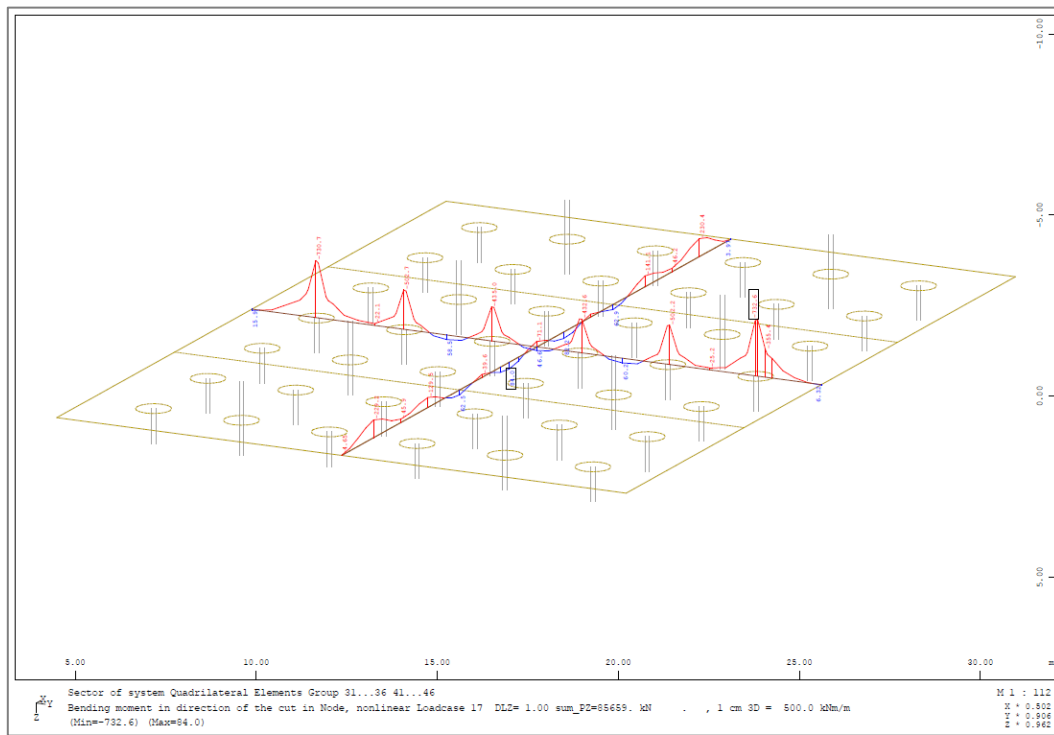
Η παρούσα διπλωματική αποτελεί ερευνητική συνεισφορά για τις επιπτώσεις της εγκατάστασης συστήματος γεωθερμικής αντλίας στη θεμελίωση μιας κτιριακής κατασκευής, εξοικονομώντας χρονική περίοδο κατασκευής και αρχικό κόστος εγκατάστασης και αξιοποιώντας την υψηλή αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα του σκυροδέματος. Σημειώνεται πως δε λήφθηκε υπόψιν η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων κατά την ανάλυση των φορτίσεων (θερμικών και μηχανικών). Κατά τον τελικό σχεδιασμό μιας αντίστοιχης μελέτης – με ή χωρίς τη γεωθερμία – θα πρέπει να αποτιμηθεί και η λειτουργία ομάδας και να ληφθεί υπόψιν κατά την τελική διαστασιολόγηση. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε εμπειρικές σχέσεις απόδοσης της λειτουργίας ομάδας, είτε να γίνει αυτόματη σύζευξη με εφαρμογή τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης, της οποίας οι αριθμητικές απαιτήσεις και ο όγκος επιλύσεων την καθιστά στα ιδιαίτερα σύνθετα προβλήματα σχεδόν απαγορευτική.

## Παράρτημα Α΄

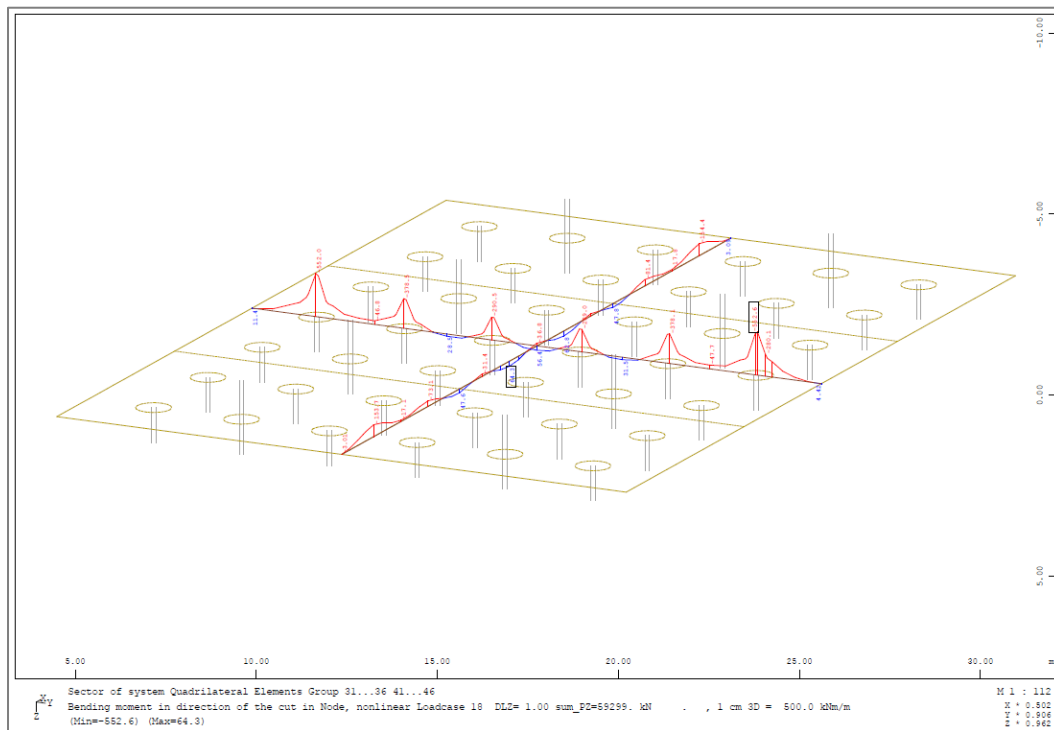
### Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο Παράρτημα Α΄ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα λεπτομερώς, με την εξής σειρά:

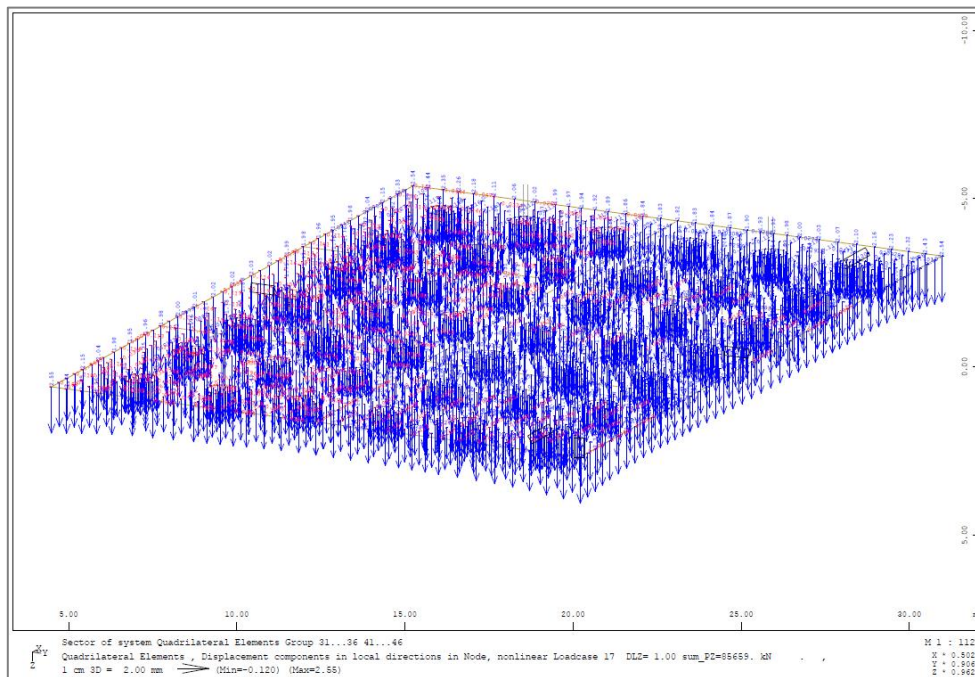
- i. Αποτελέσματα εντατικής και κινηματικής κατάστασης
- ii. Σύγκριση αποτελεσμάτων χωρίς ενεργειακούς πασσάλους
- iii. Σύγκριση αποτελεσμάτων με την προσθήκη ενεργειακών πασσάλων



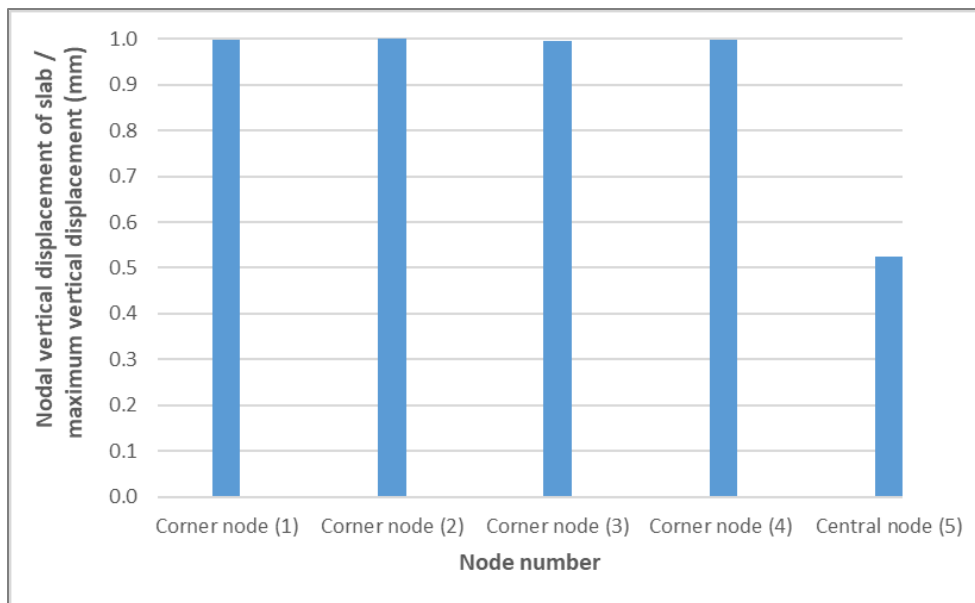
Σχήμα Α'.1 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC17. (Sofistik)



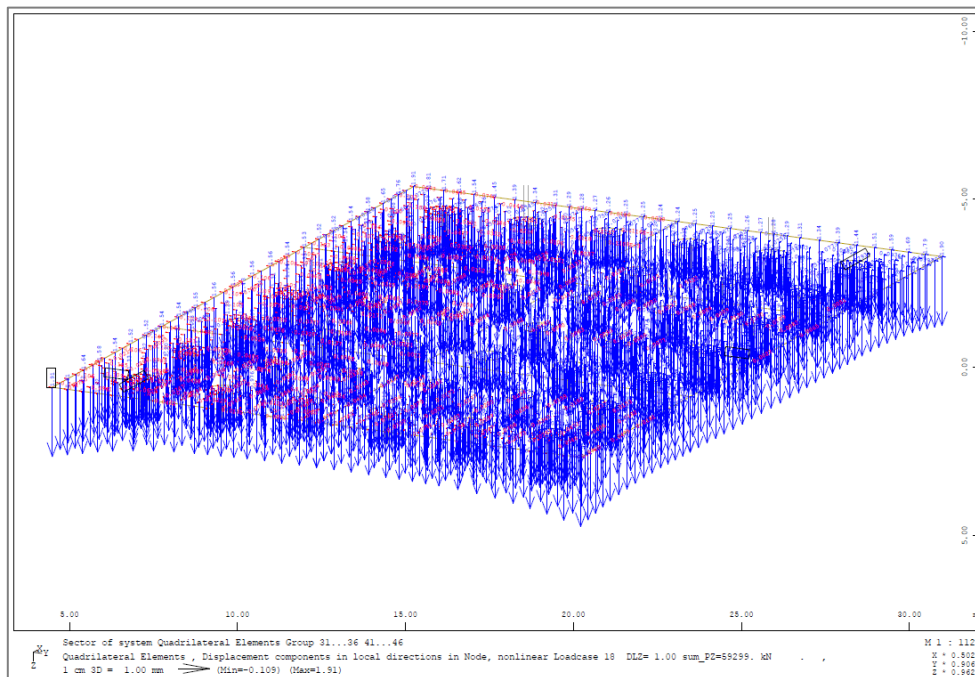
Σχήμα Α'.2 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC18. (Sofistik)



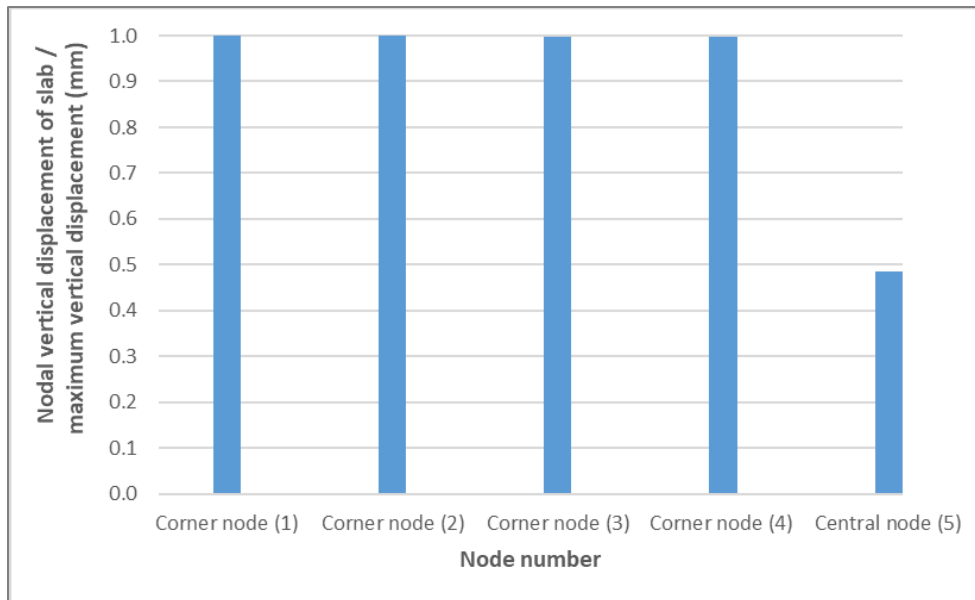
Σχήμα Α'.3 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC17. (Sofistik)



Σχήμα Α'.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC17 (ULS).

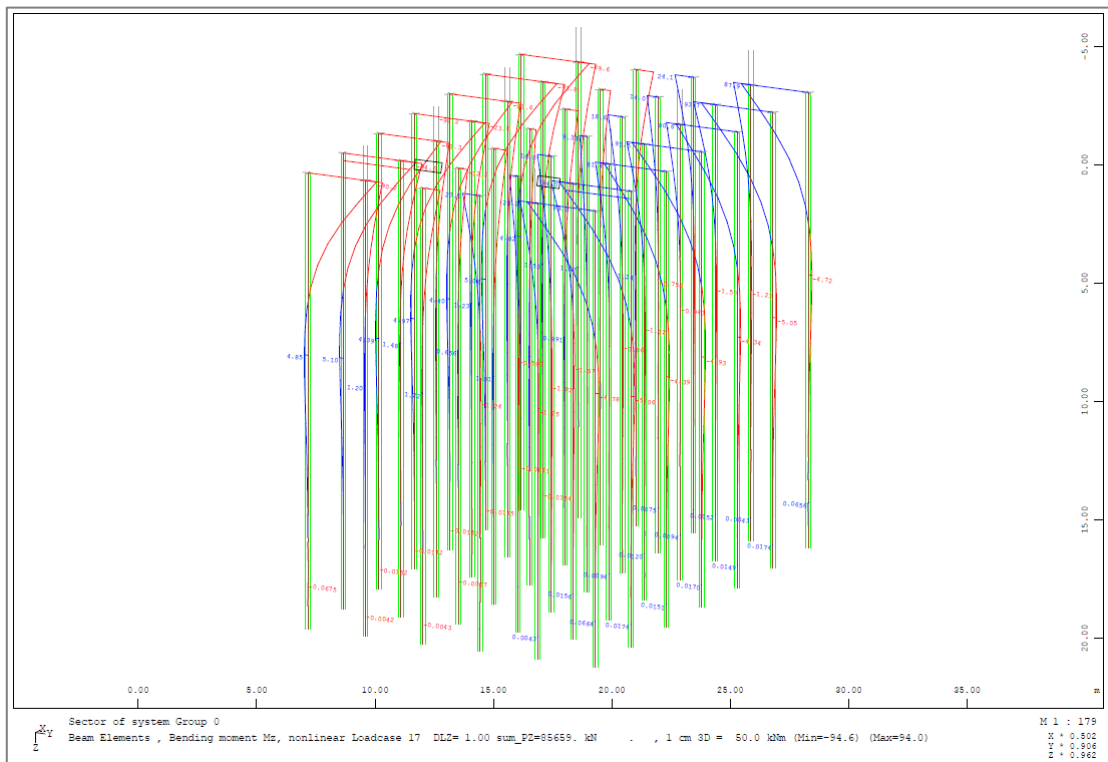


Σχήμα Α'.5 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC18. (Sofistik)

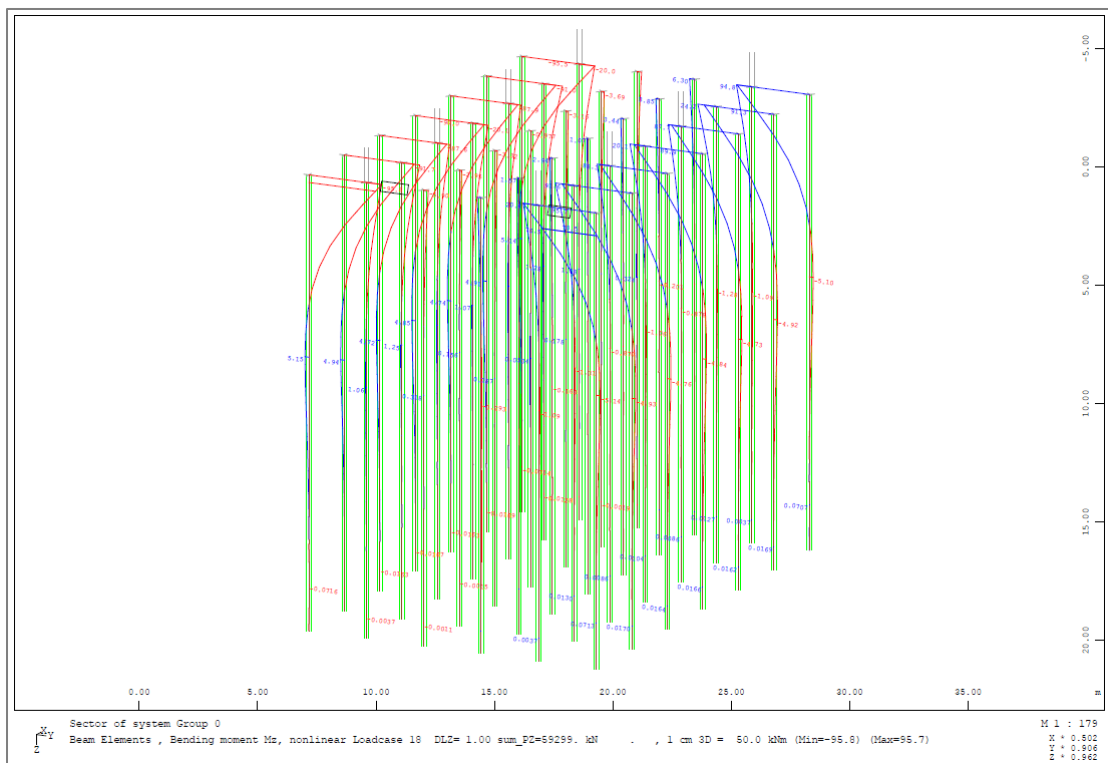


Σχήμα Α'.6 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC17 (ULS).

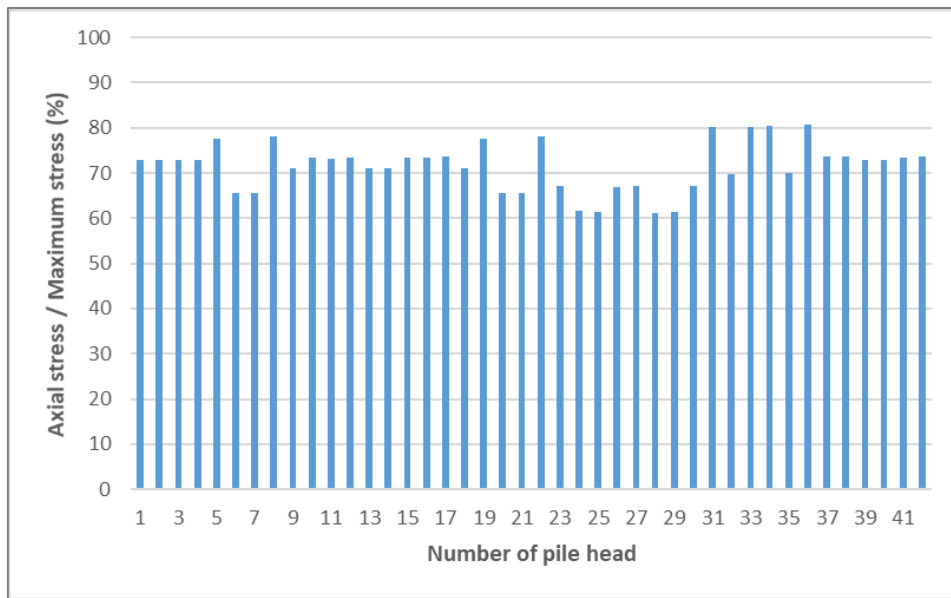




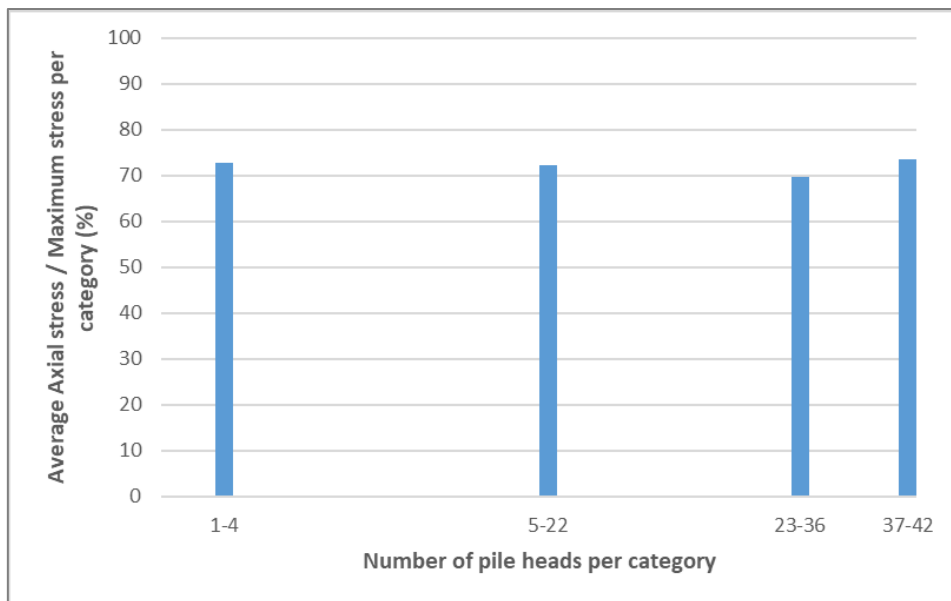
Σχήμα Α'.7 Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC17. (Sofistik)



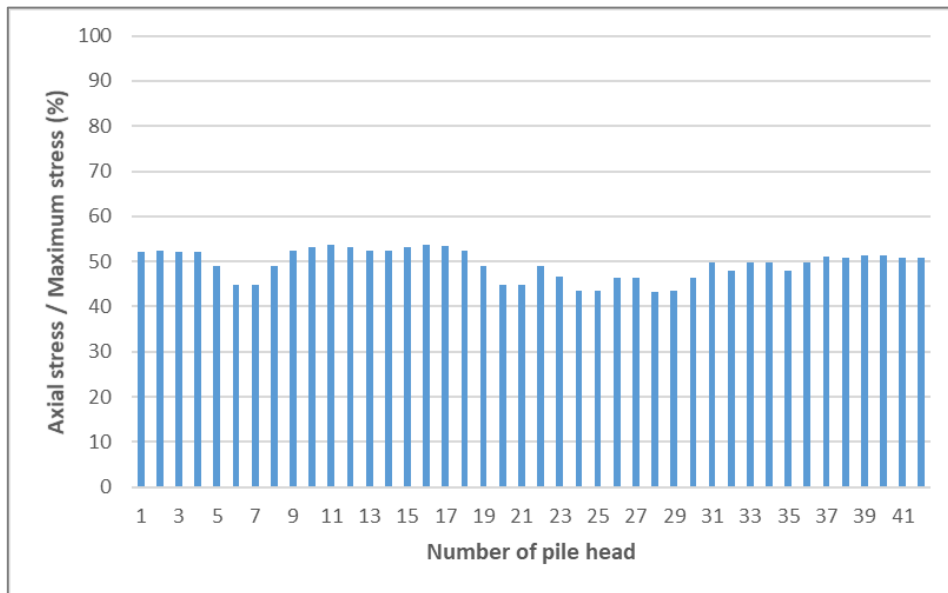
Σχήμα Α'.8 Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC18. (Sofistik)



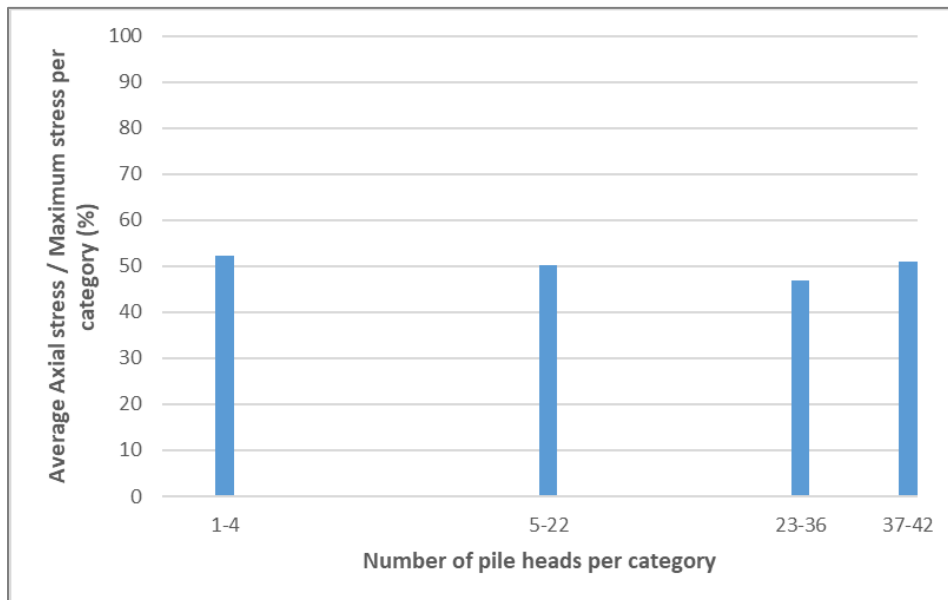
Σχήμα Α'.9 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC17.



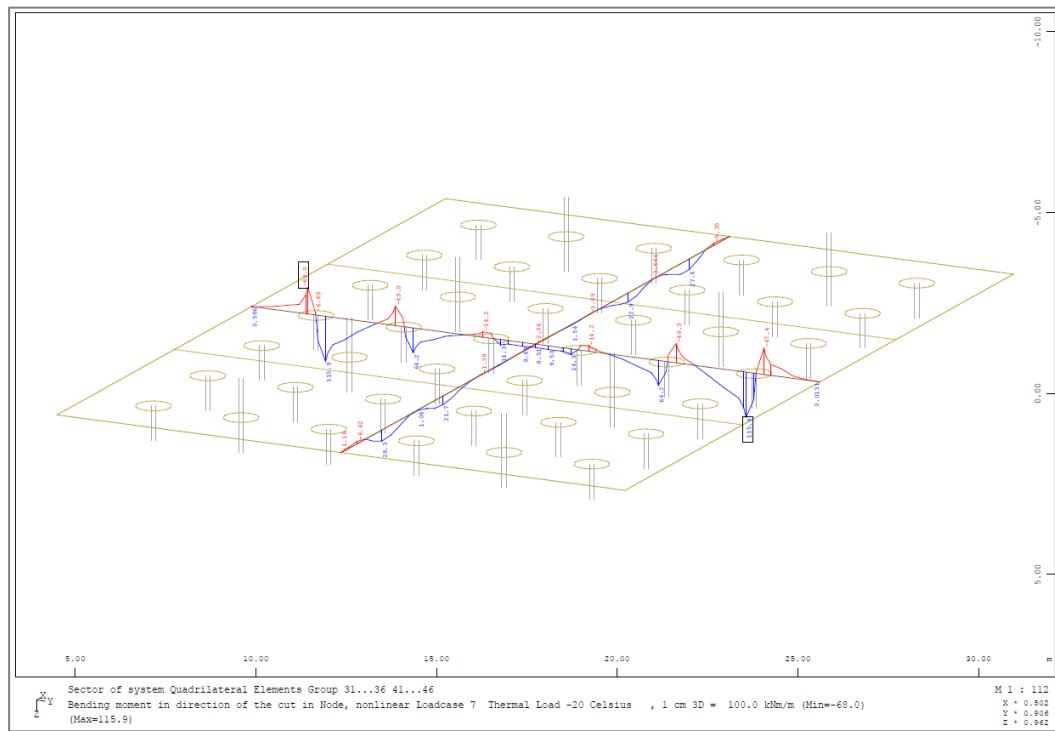
Σχήμα Α'.10 Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέσου βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) ανά κατηγορία για LC17.



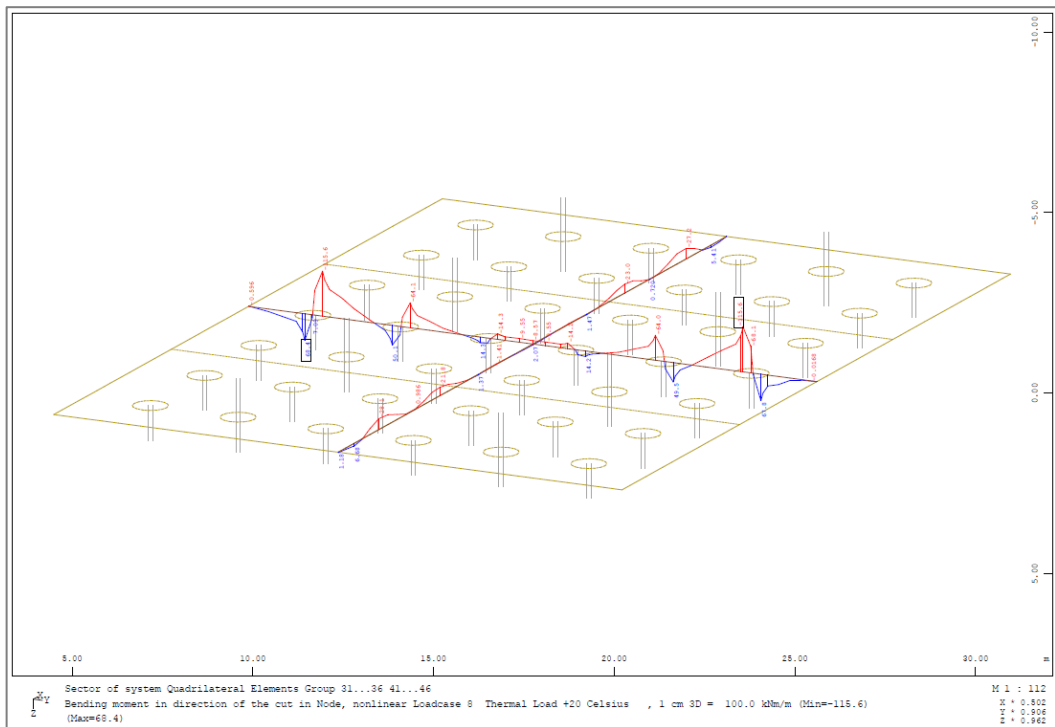
Σχήμα Α'.11 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC18.



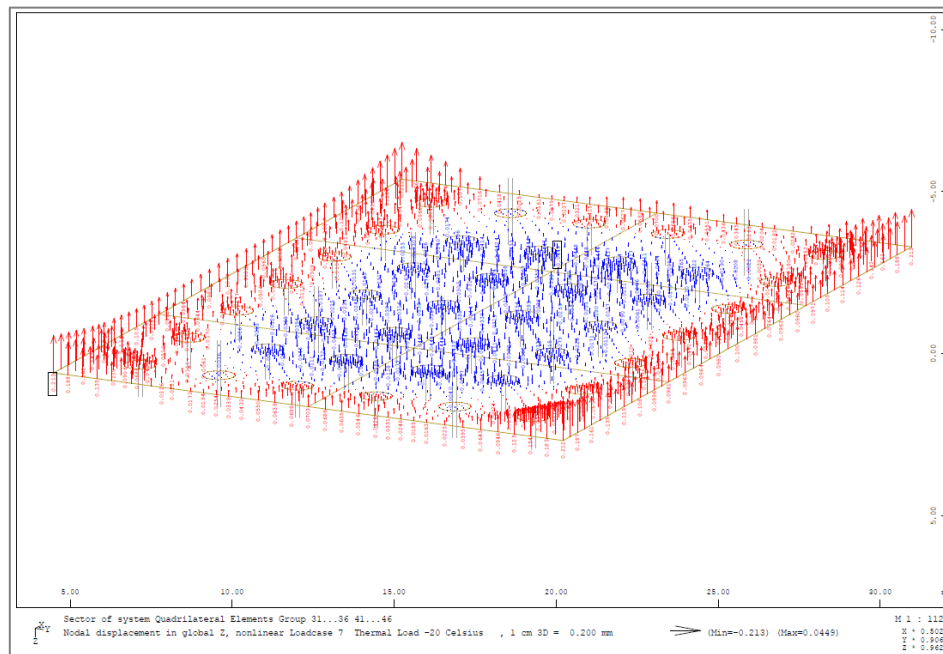
Σχήμα Α'.12 Κανονικοποιημένο διάγραμμα μέσου βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) ανά κατηγορία για LC18.



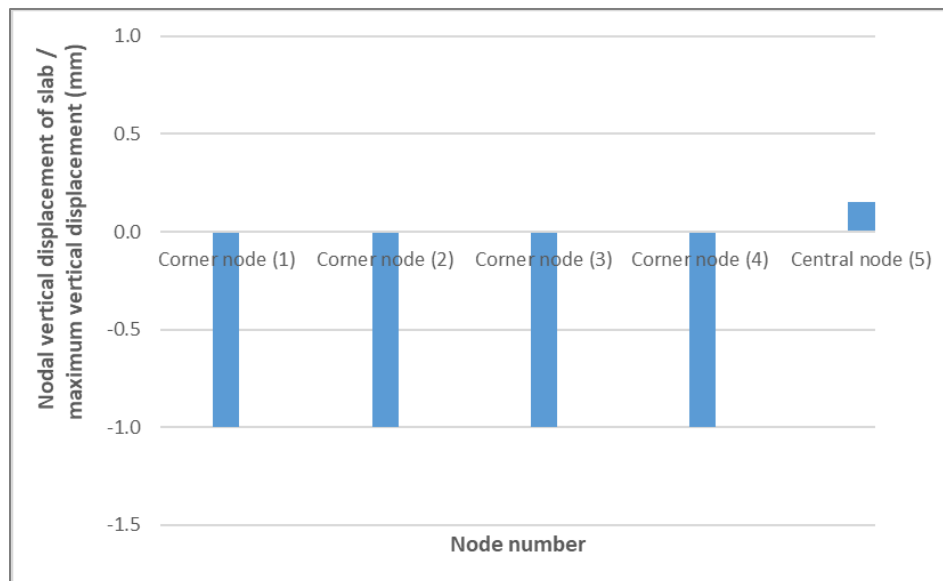
Σχήμα Α'.13 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik)



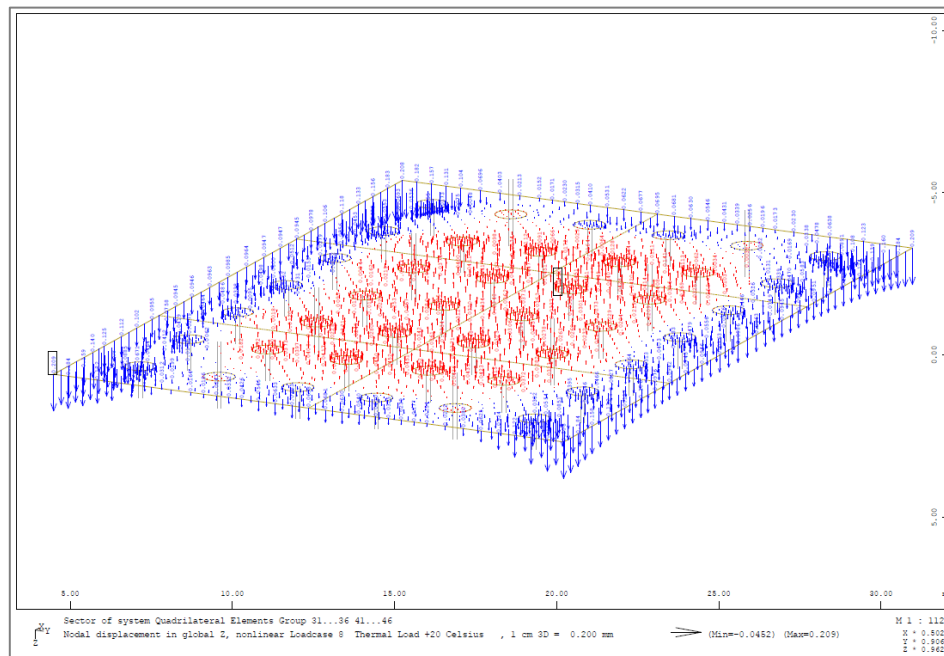
Σχήμα Α'.14 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC8. (Sofistik)



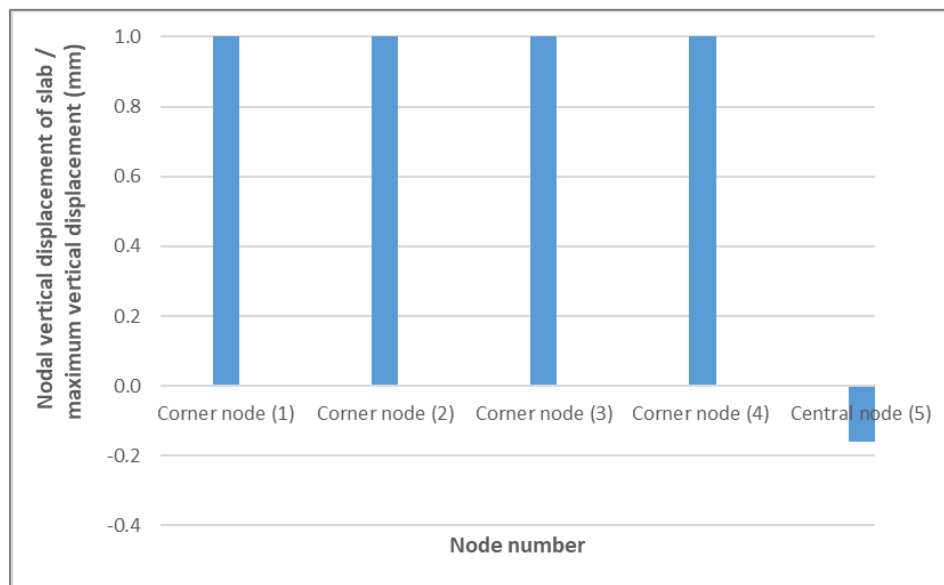
Σχήμα Α'.15 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC7. (Sofistik)



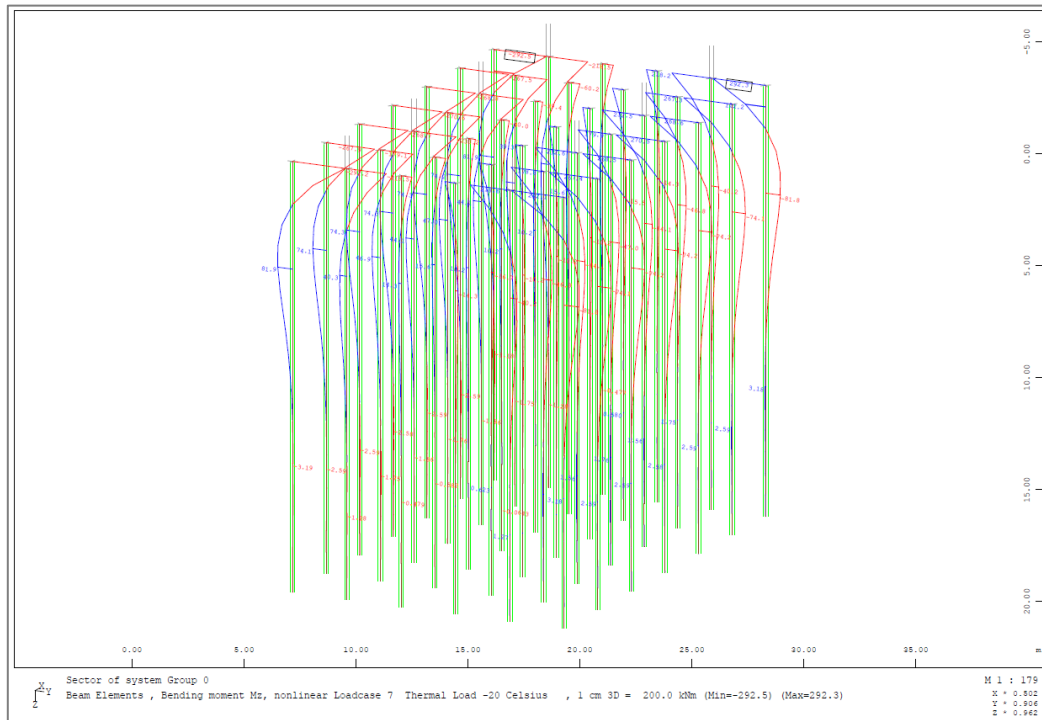
Σχήμα Α'.16 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC7.



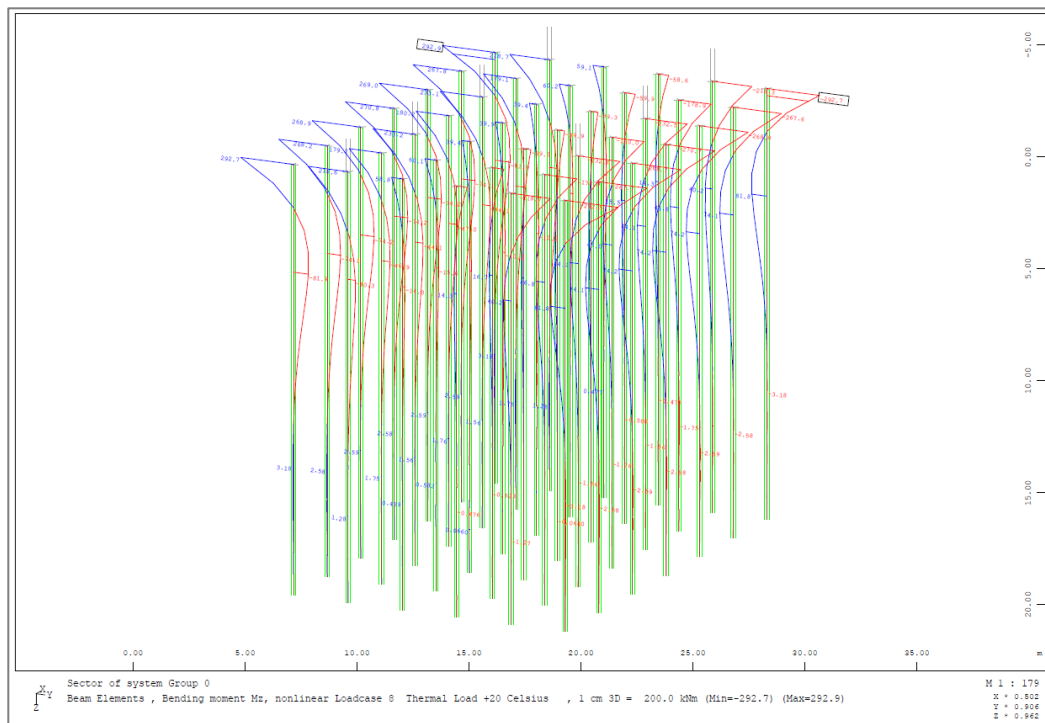
Σχήμα Α'.17 Διαλύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC8. (Sofistik)



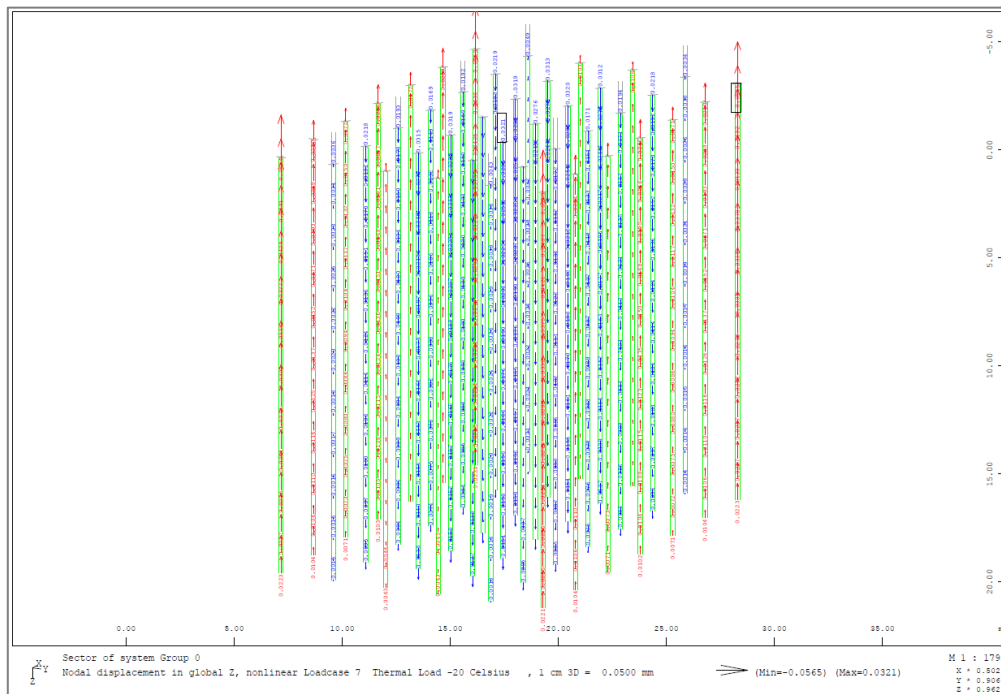
Σχήμα Α'.18 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC8.



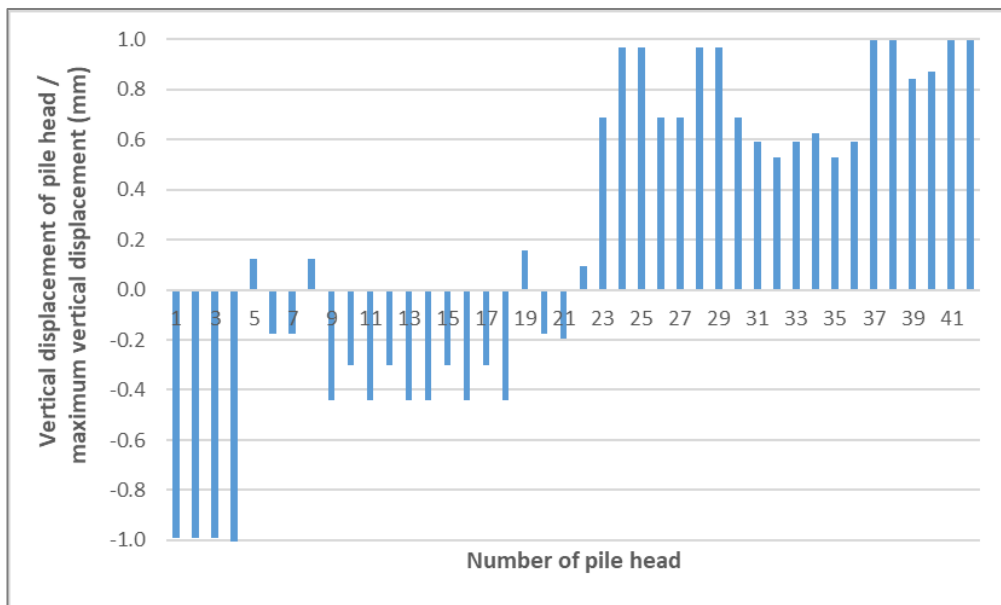
Σχήμα Α'.19 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik)



Σχήμα Α'.20 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik)

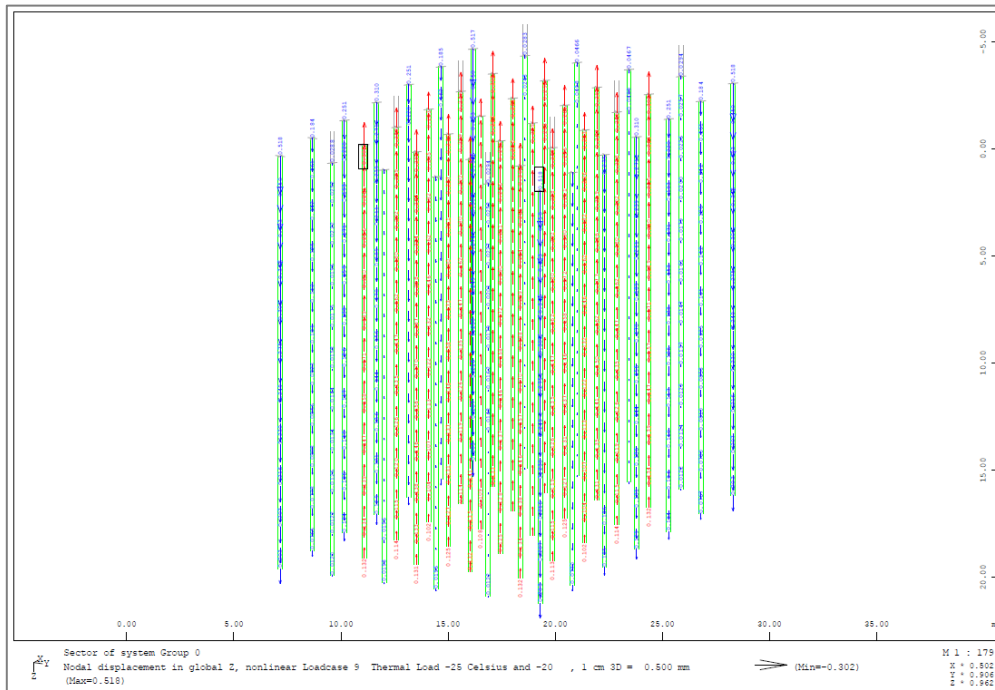


Σχήμα Α'.21 Διανύσματα επικόμβων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC7. (Sofistik)

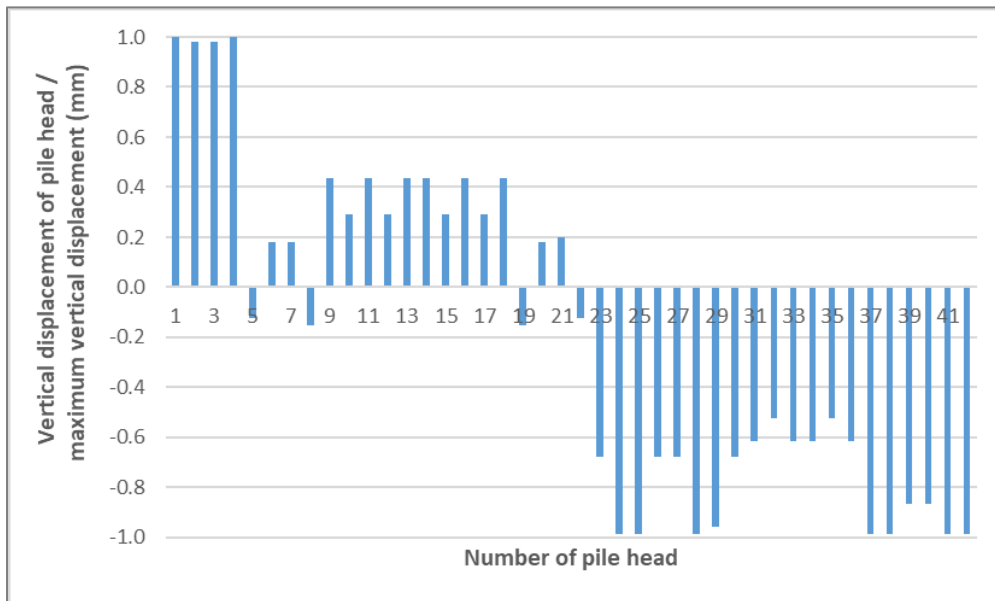


Σχήμα Α'.22 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC7.

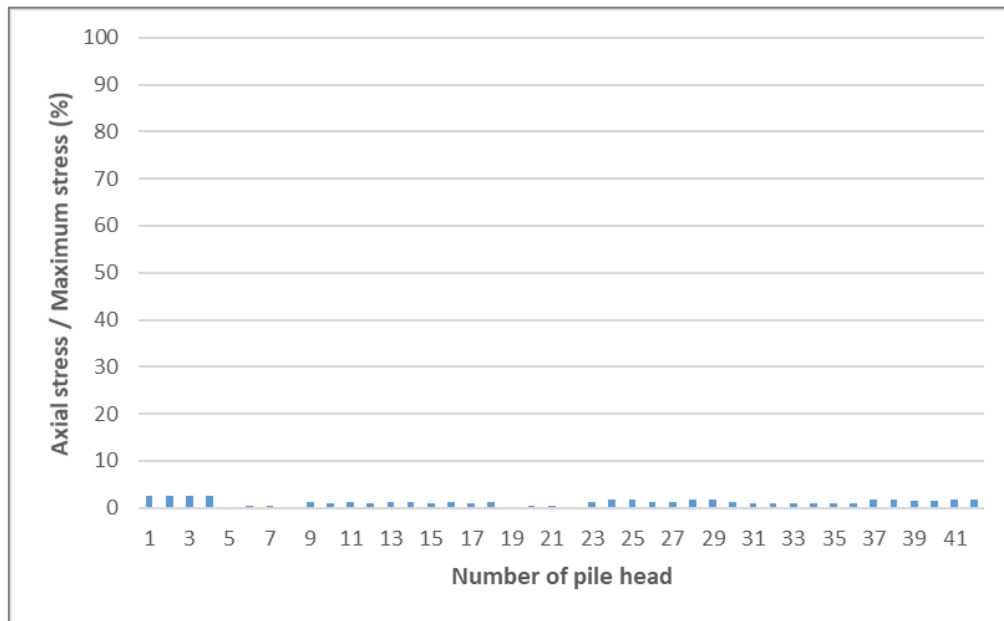




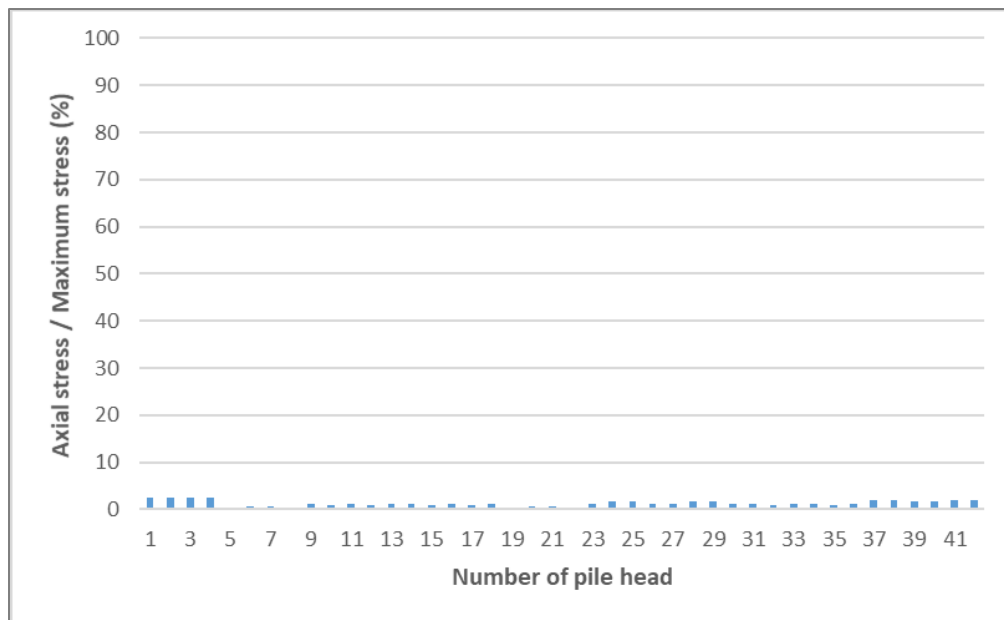
Σχήμα Α'.23 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC8. (Sofistik)



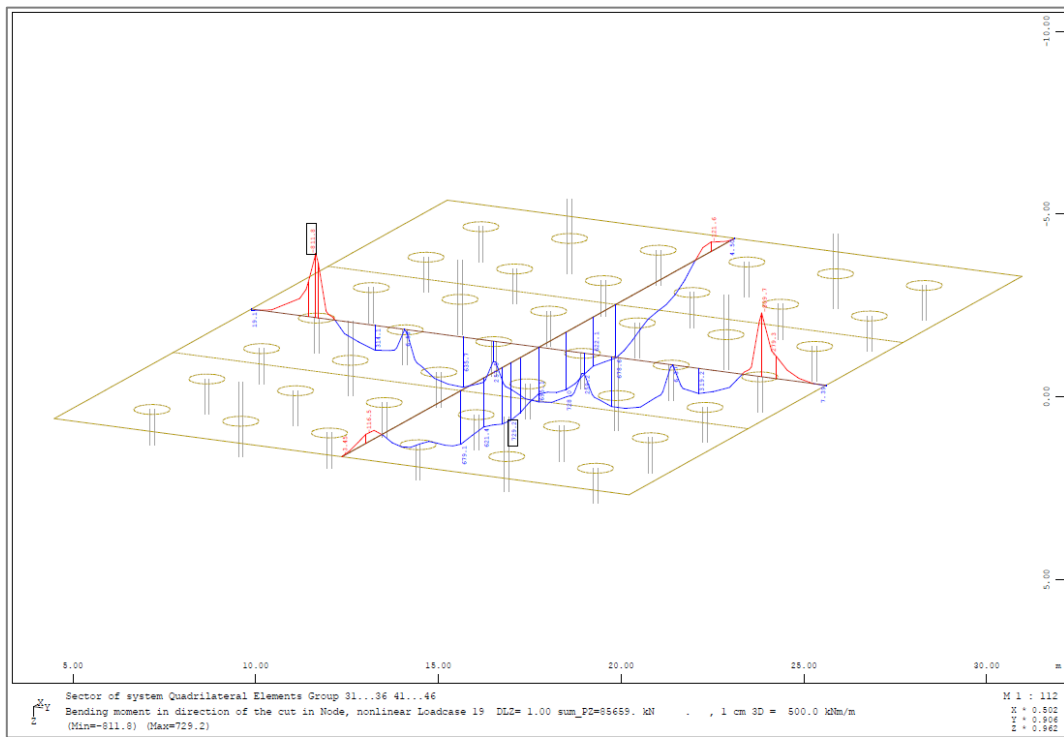
Σχήμα Α'.24 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC8.



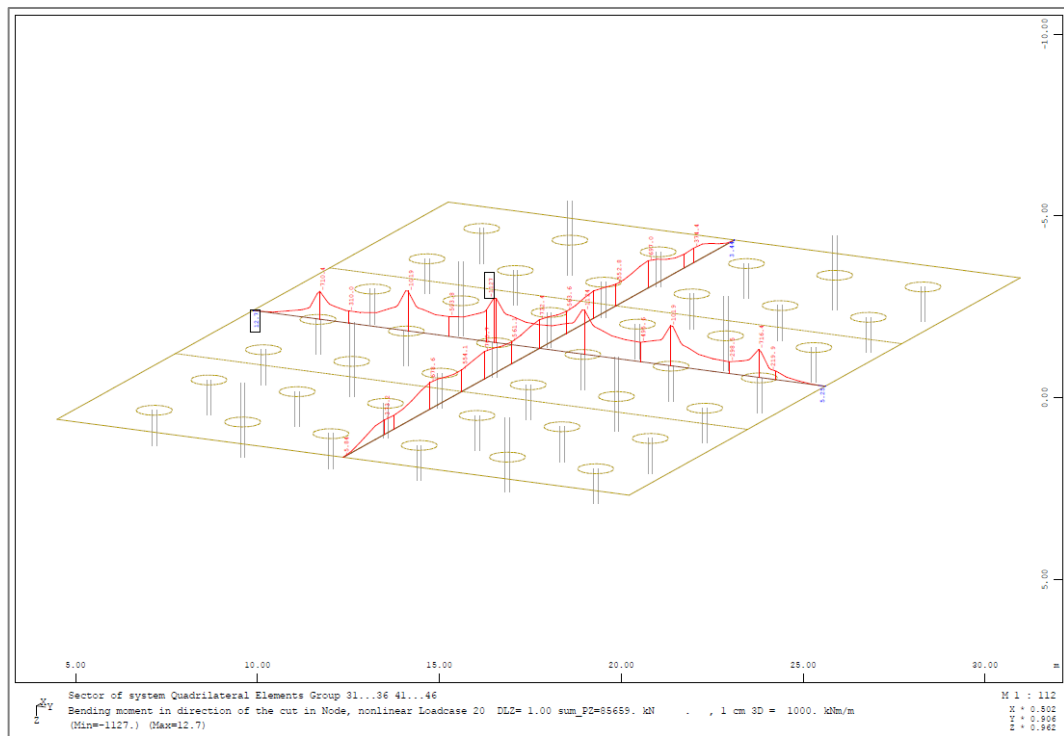
Σχήμα Α'.25 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC7.



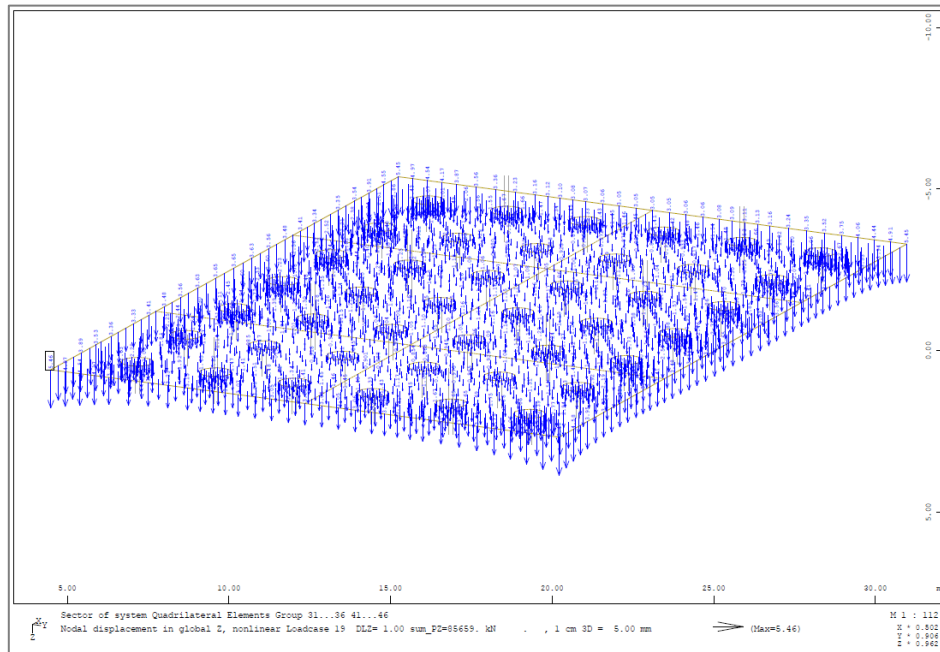
Σχήμα Α'.26 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC8.



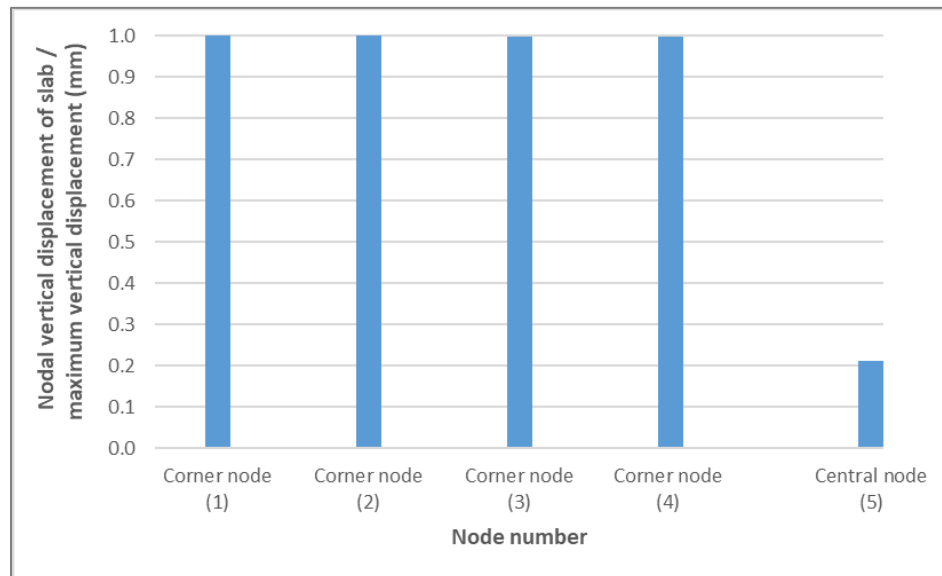
Σχήμα Α'.27 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC19. (Sofistik)



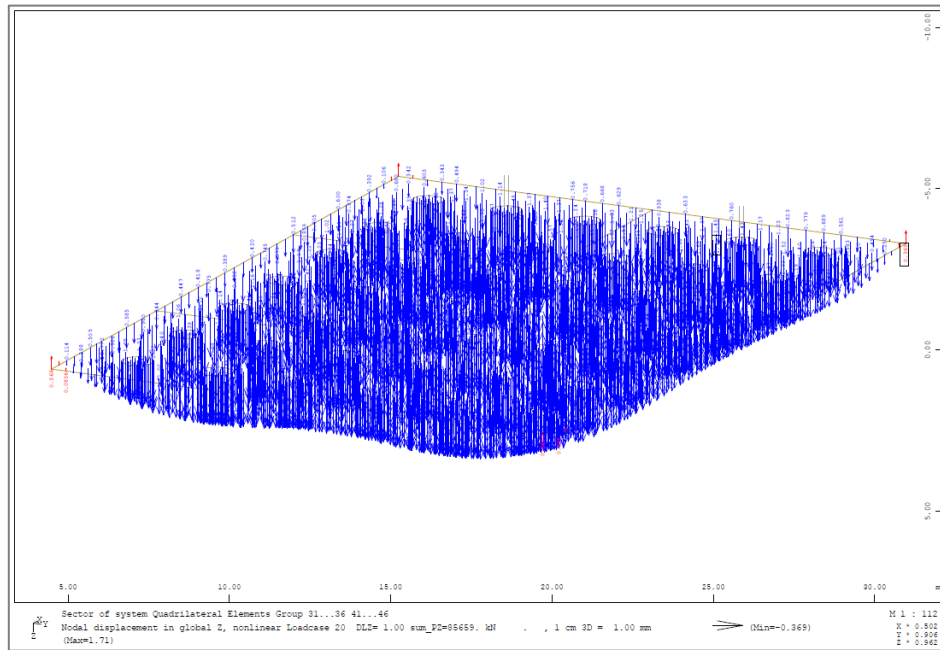
Σχήμα Α'.28 Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC20. (Sofistik)



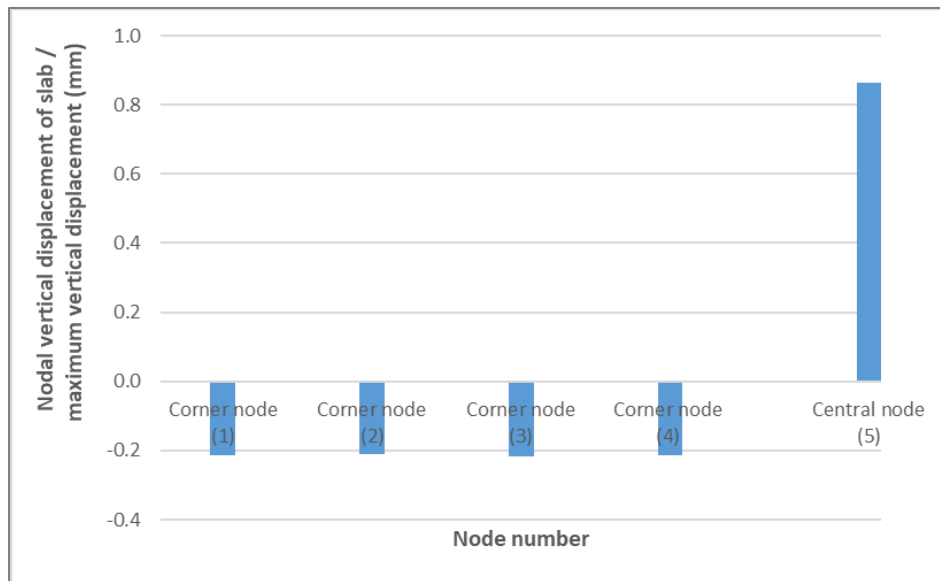
Σχήμα Α'.29 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC19. (Sofistik)



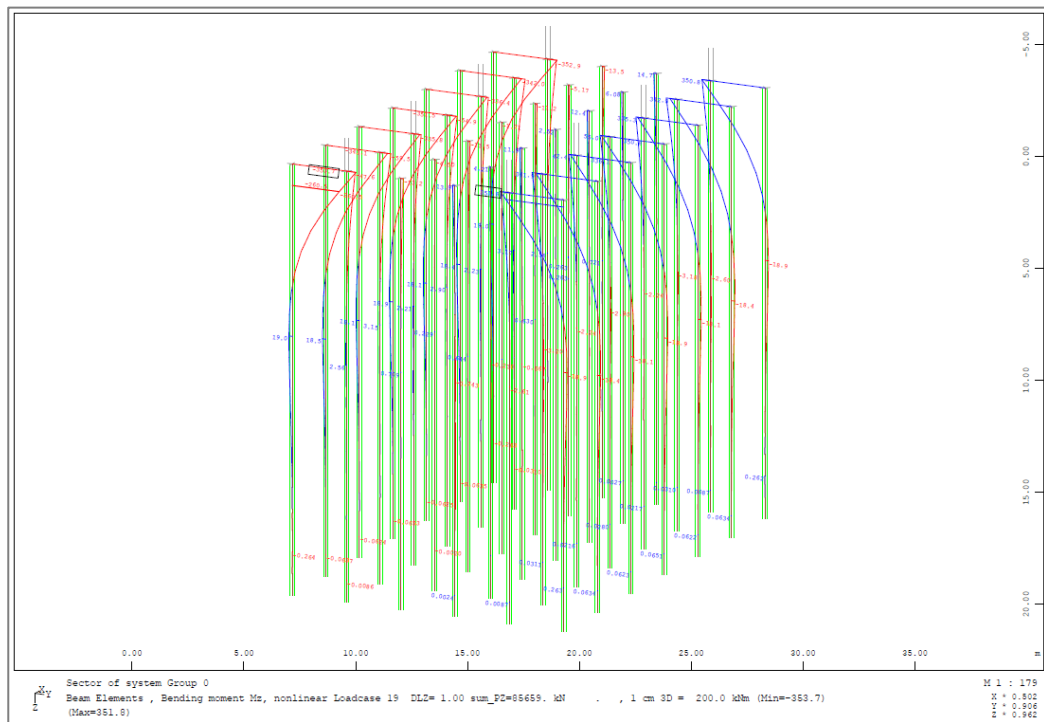
Σχήμα Α'.30 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC19.



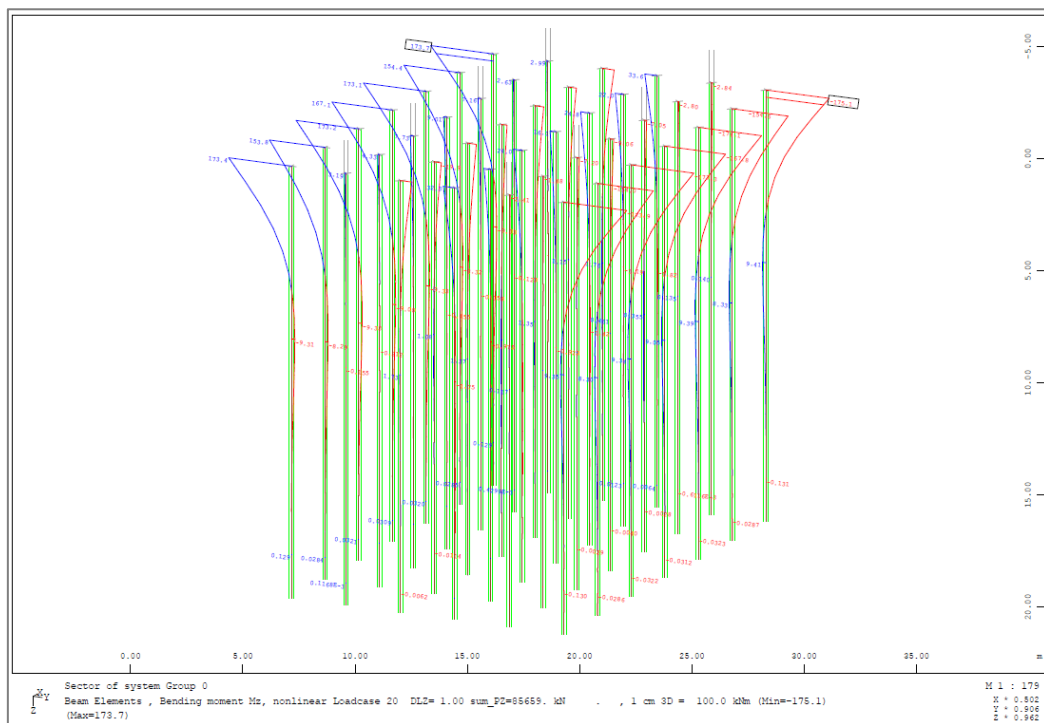
Σχήμα Α'.31 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC20. (Sofistik)



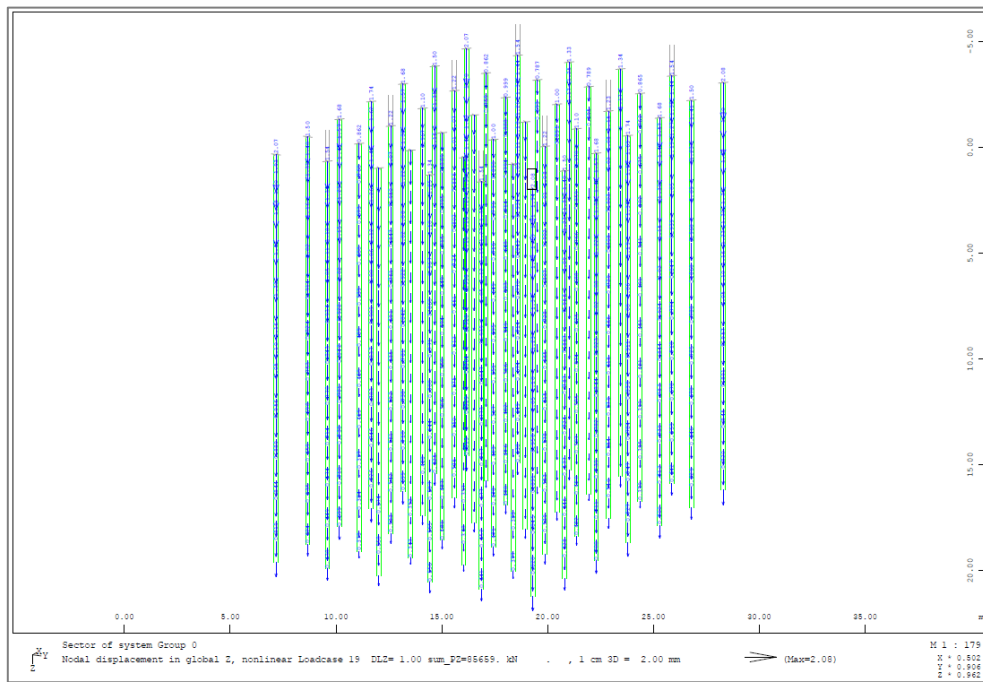
Σχήμα Α'.32 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC20.



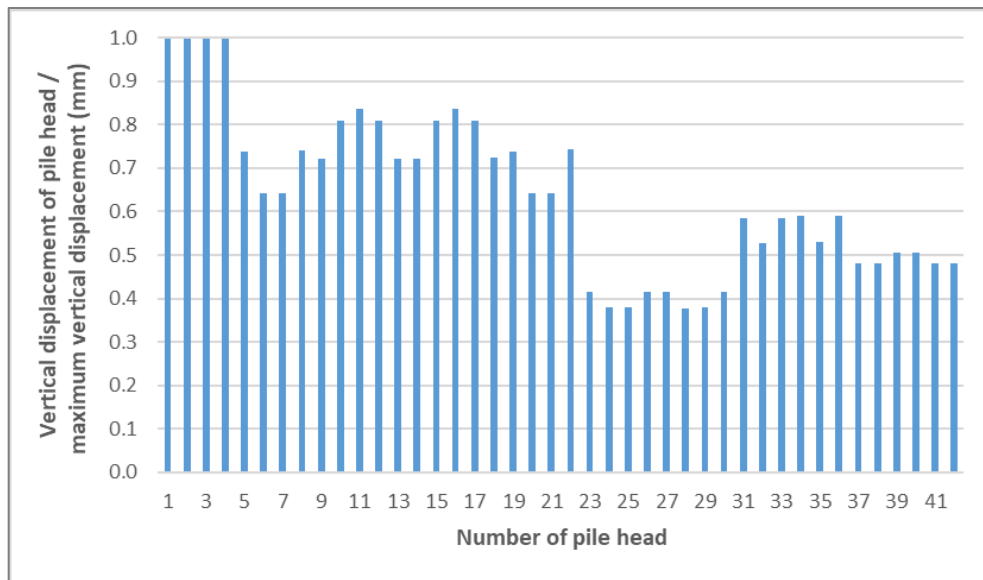
Σχήμα Α'.33 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC19. (Sofistik)



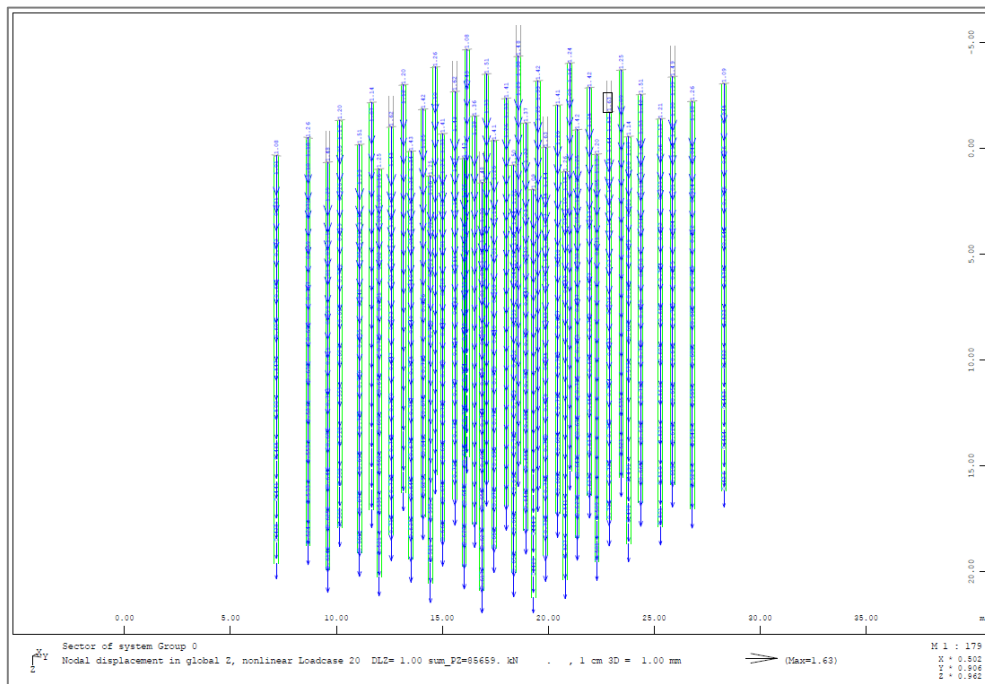
Σχήμα Α'.34 Διαγράμματα καμπτικής ροπής  $M_z$  πασσάλων κατά τη φόρτιση LC20. (Sofistik)



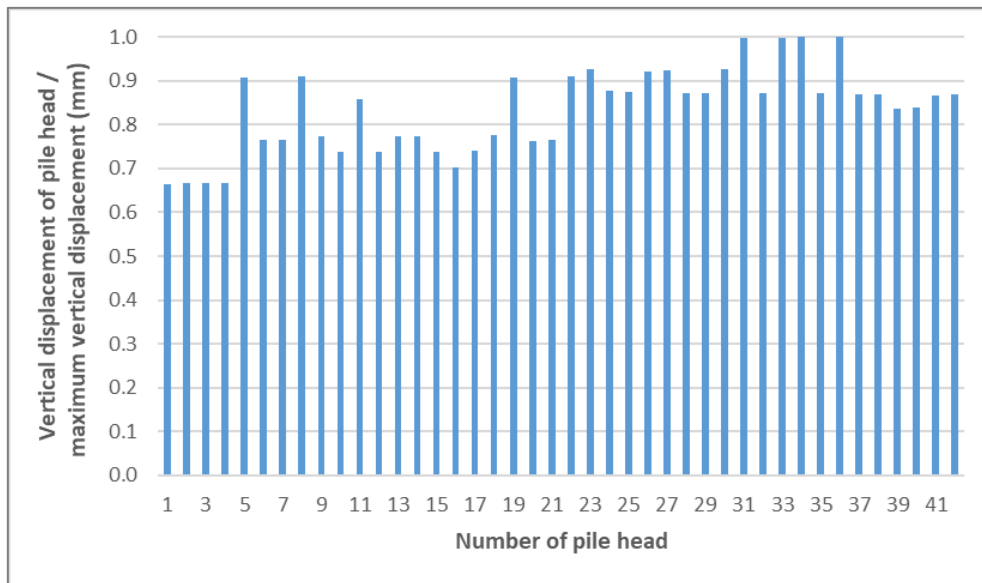
Σχήμα Α'.35 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC19. (Sofistik)



Σχήμα Α'.36 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC19.

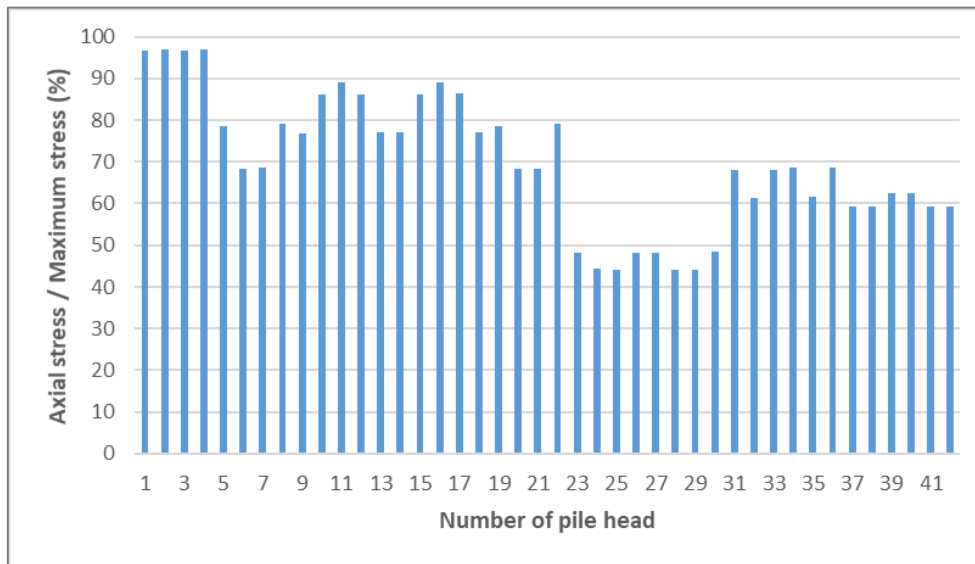


Σχήμα Α'.37 Διανύσματα επικόμβων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC20. (Sofistik)

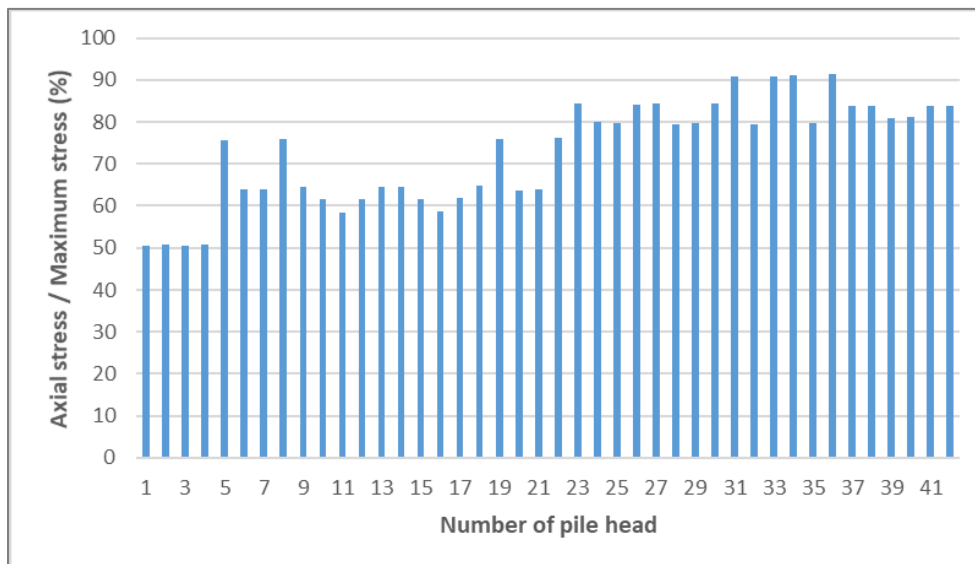


Σχήμα Α'.38 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC20.

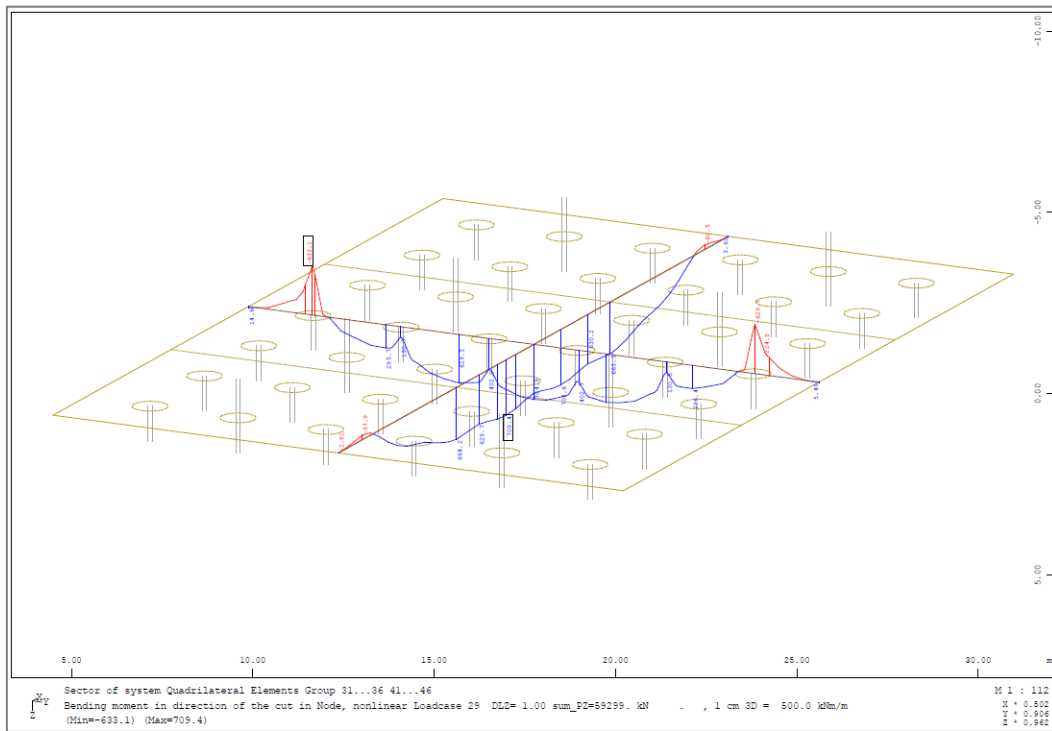




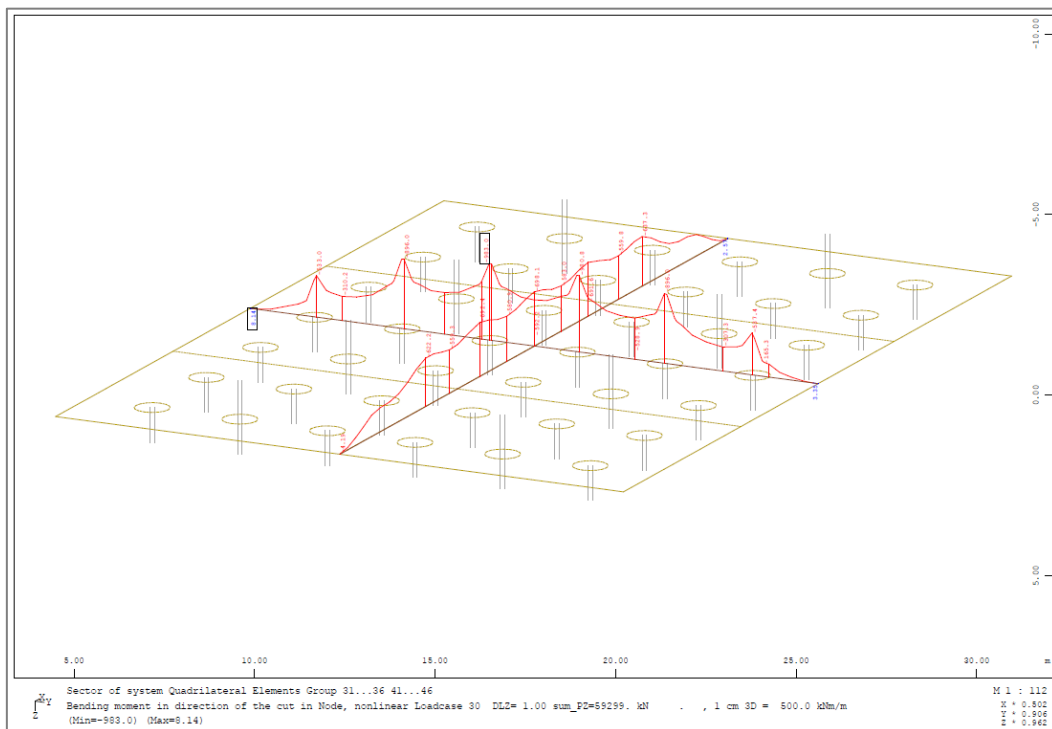
Σχήμα Α'.39 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC19.



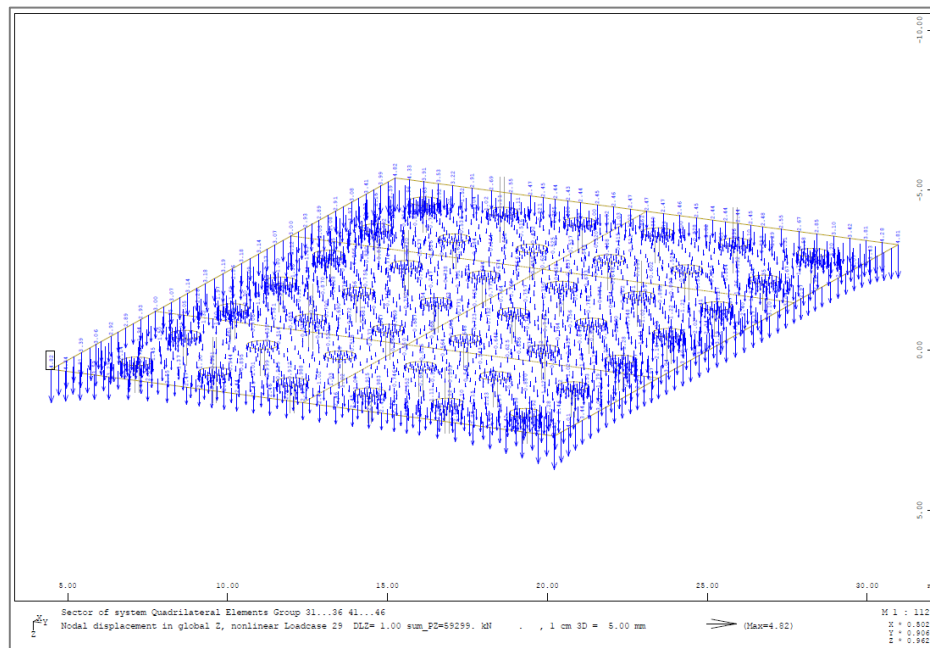
Σχήμα Α'.40 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC20.



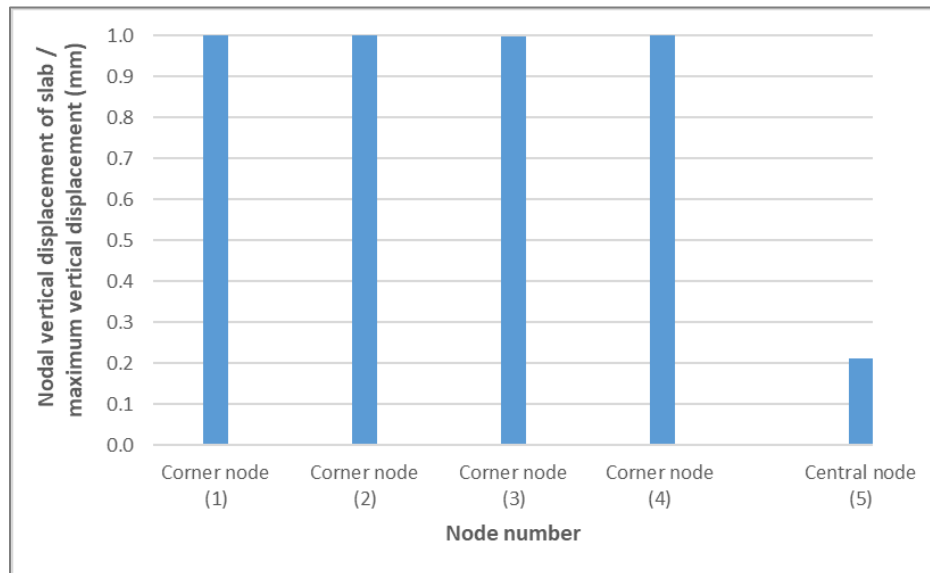
**Σχήμα Α'.41** Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC29. (Sofistik)



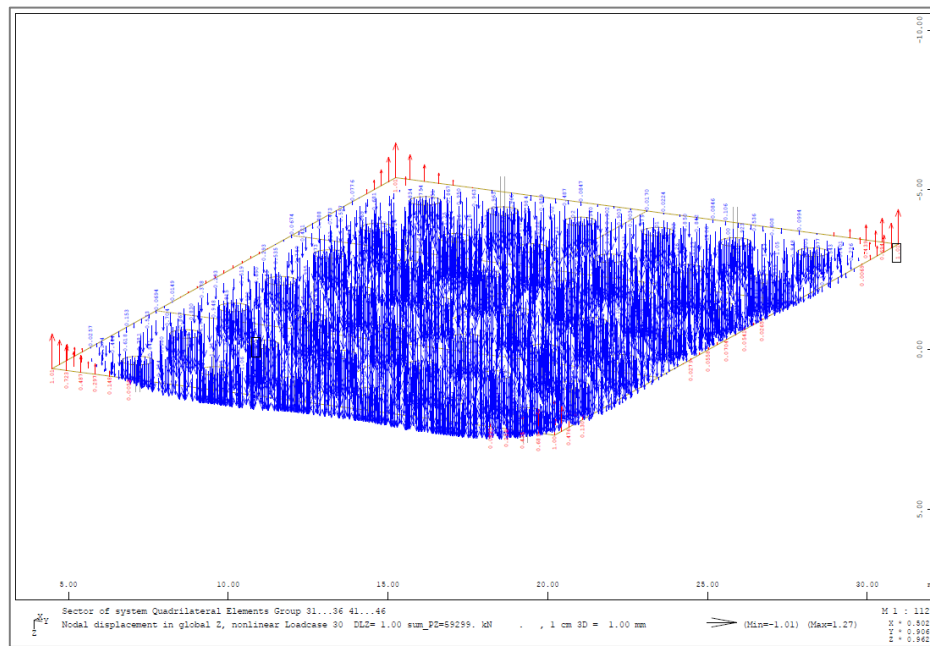
**Σχήμα Α'.42** Καμπτική ροπή κοιτόστρωσης σε τομές στο μέσο κάθε πλευράς κατά τη φόρτιση LC30. (Sofistik)



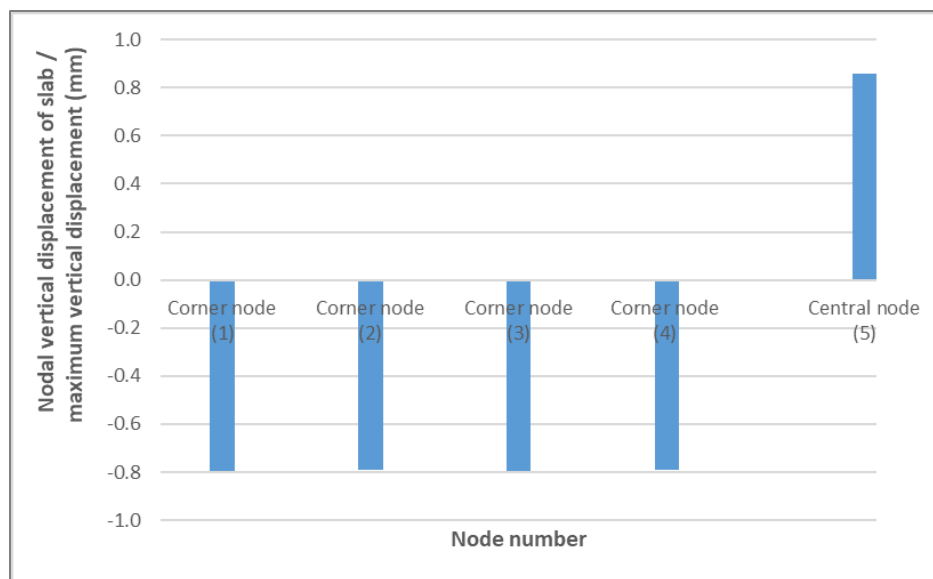
Σχήμα Α'.43 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC29. (Sofistik)



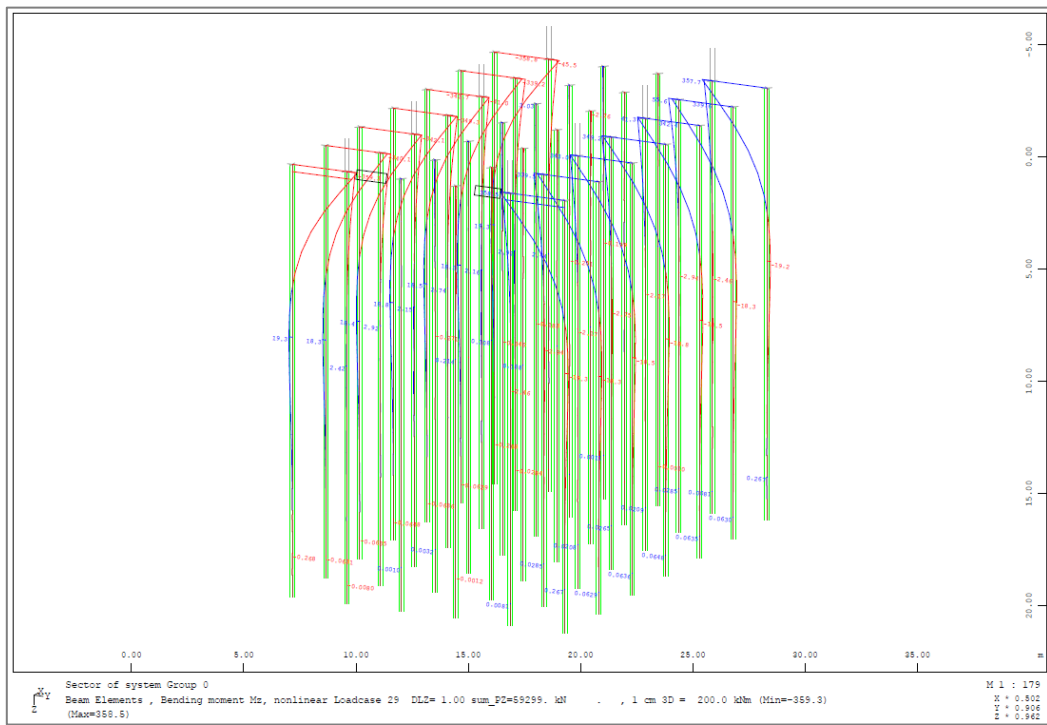
Σχήμα Α'.44 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC29.



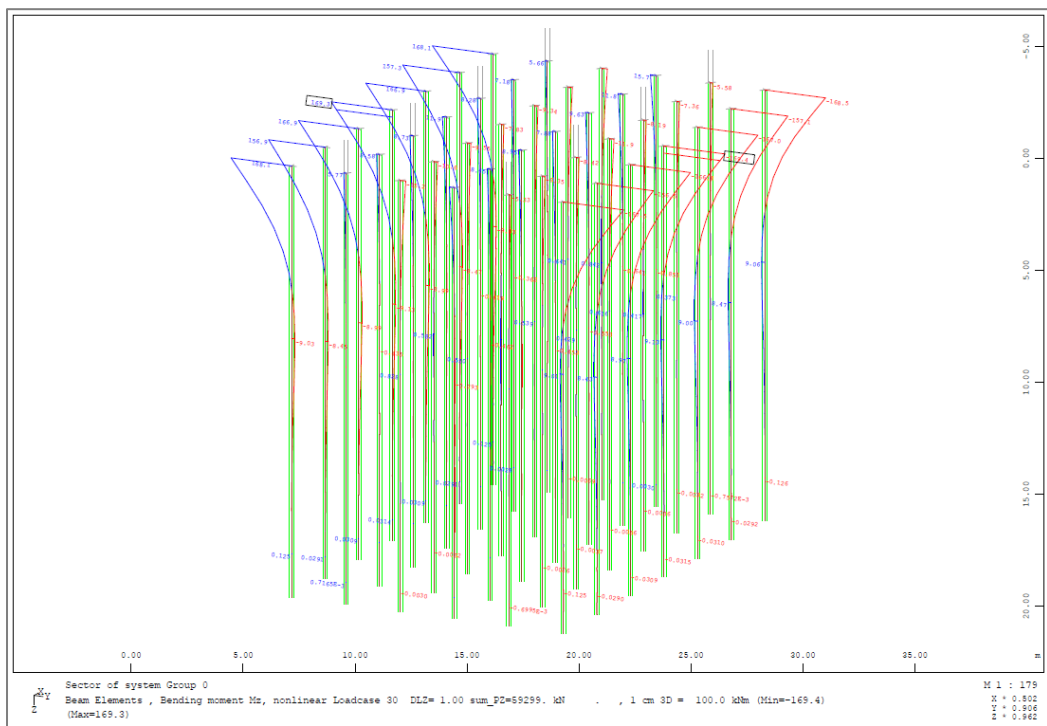
Σχήμα Α'.45 Διανύσματα επικόμβιας μετακίνησης κατά τον άξονα z για φόρτιση LC30. (Sofistik)



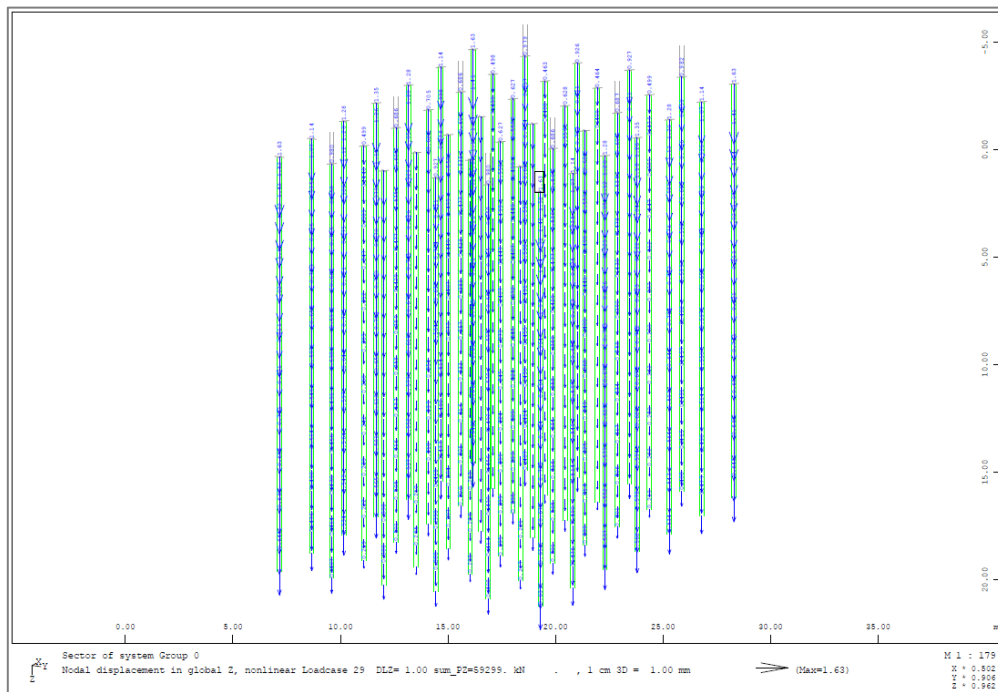
Σχήμα Α'.46 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τη φόρτιση LC30.



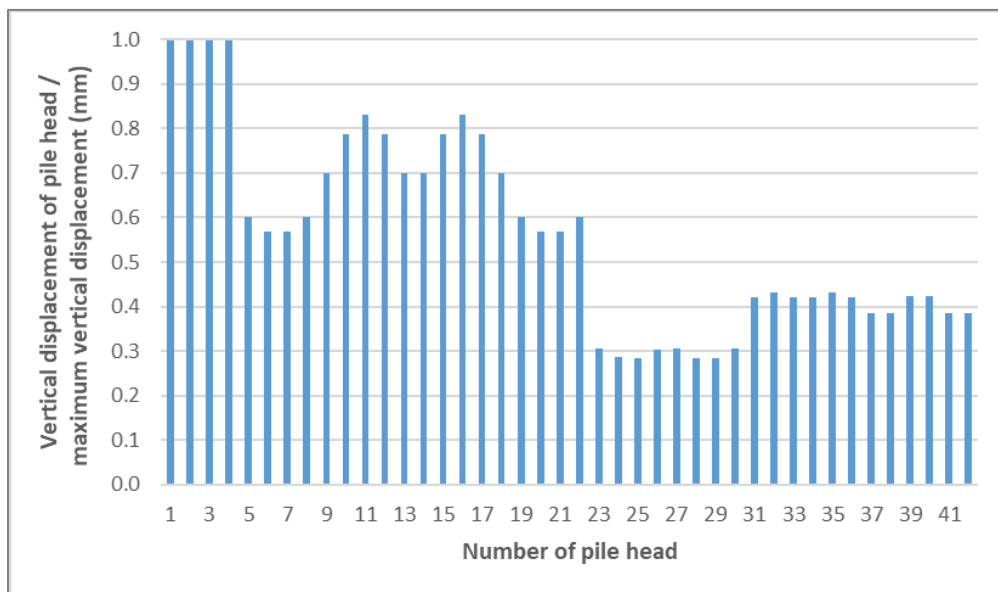
Σχήμα Α'.47 Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC29. (Sofistik)



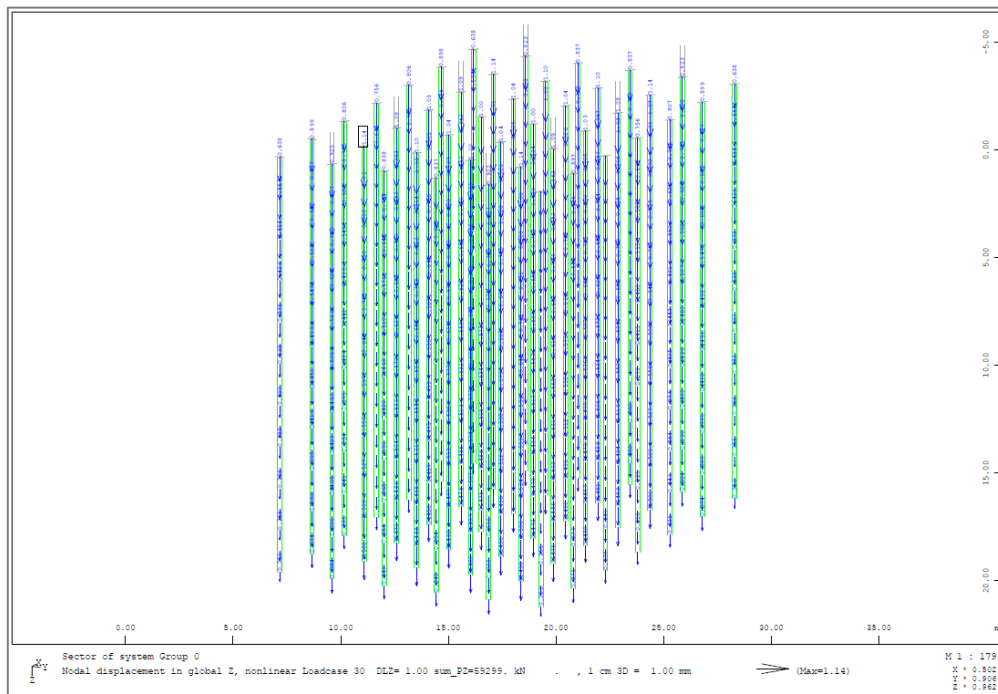
Σχήμα Α'.48 Διαγράμματα καμπτικής ροπής Mz πασσάλων κατά τη φόρτιση LC30. (Sofistik)



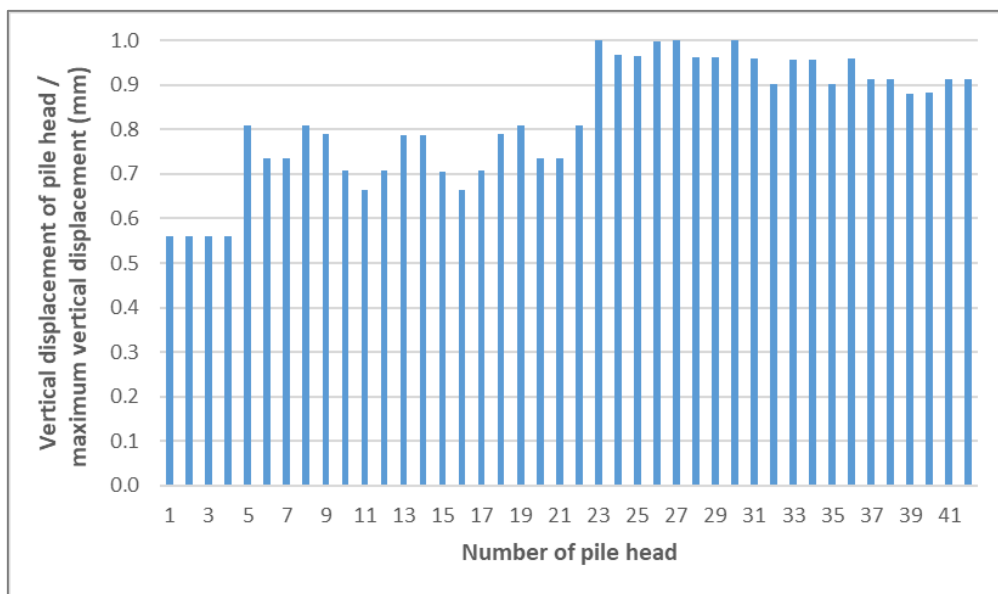
Σχήμα Α'.49 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC29. (Sofistik)



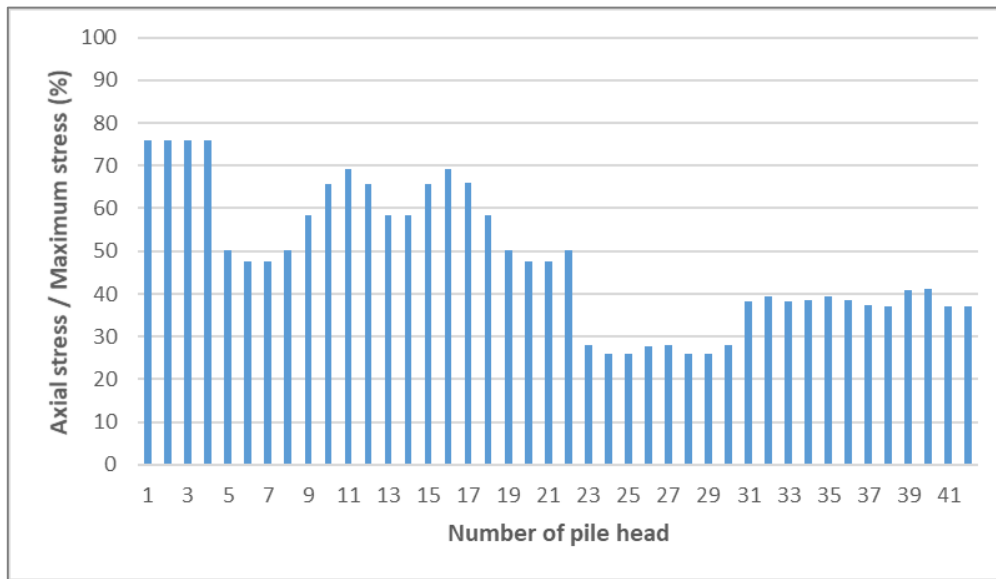
Σχήμα Α'.50 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC29.



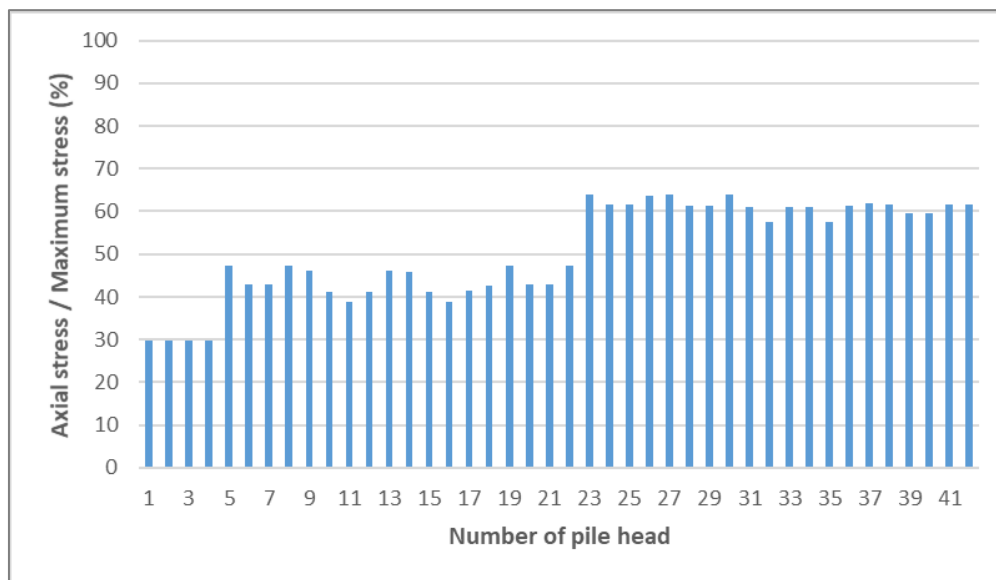
Σχήμα Α'.51 Διανύσματα επικόμβιων κατακόρυφων μετακινήσεων πασσάλων κατά τη φόρτιση LC30. (Sofistik)



Σχήμα Α'.52 Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των κόμβων της κεφαλής των πασσάλων για τη φόρτιση LC30.

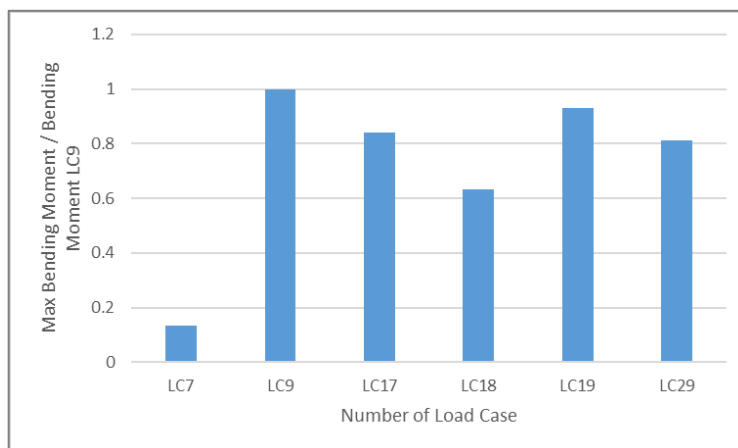


Σχήμα Α'.53 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC29.

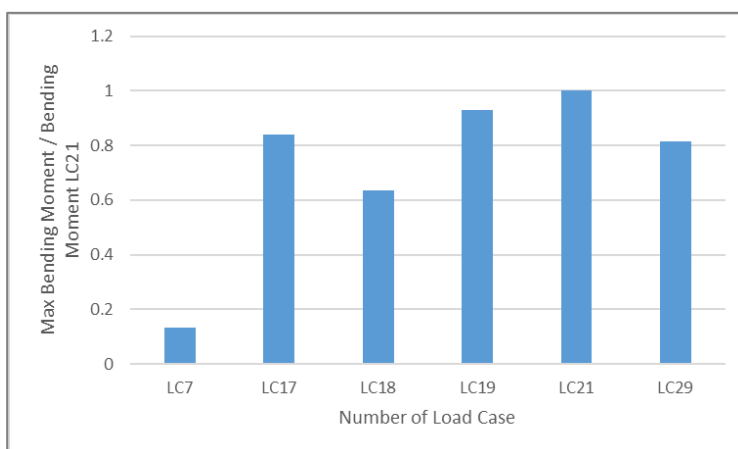


Σχήμα Α'.54 Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας πασσάλων (%) για LC30.

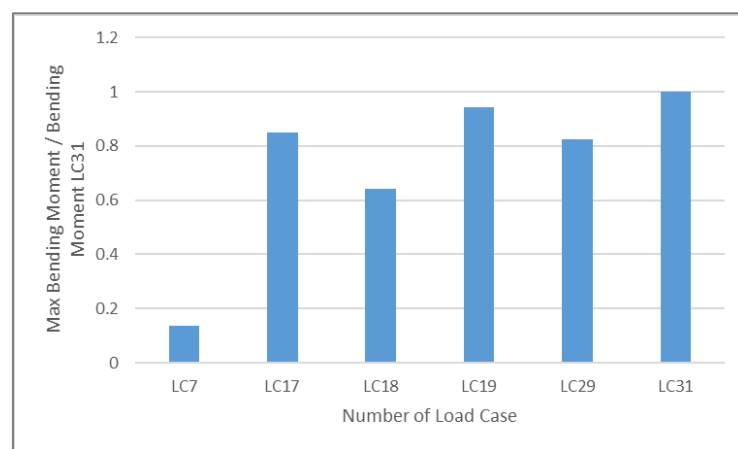




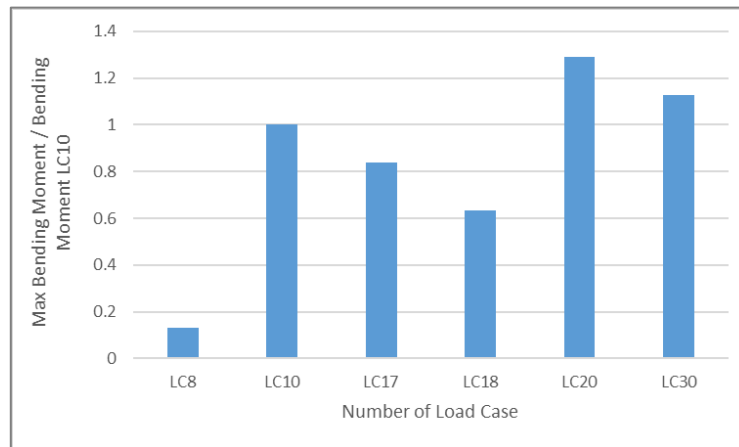
*Σχήμα Α'.55* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



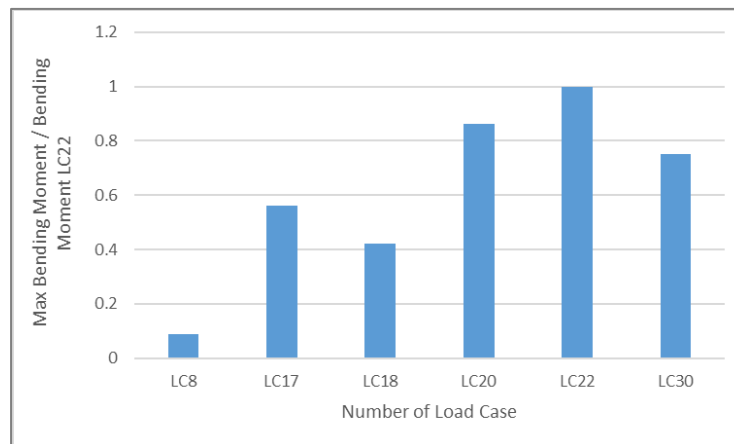
*Σχήμα Α'.56* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



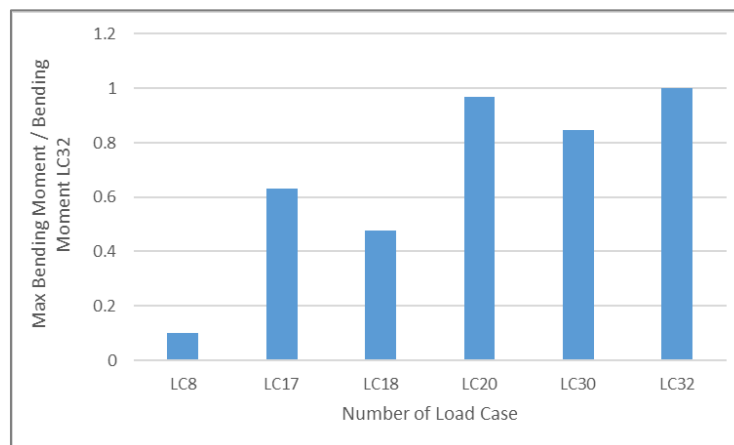
*Σχήμα Α'.57* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



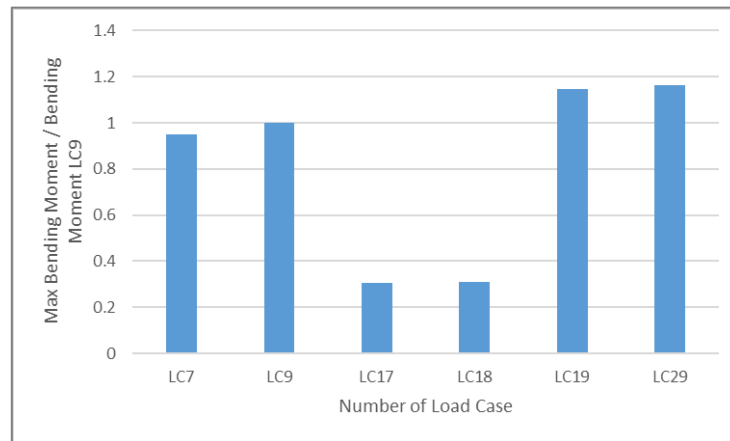
**Σχήμα Α'.58** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



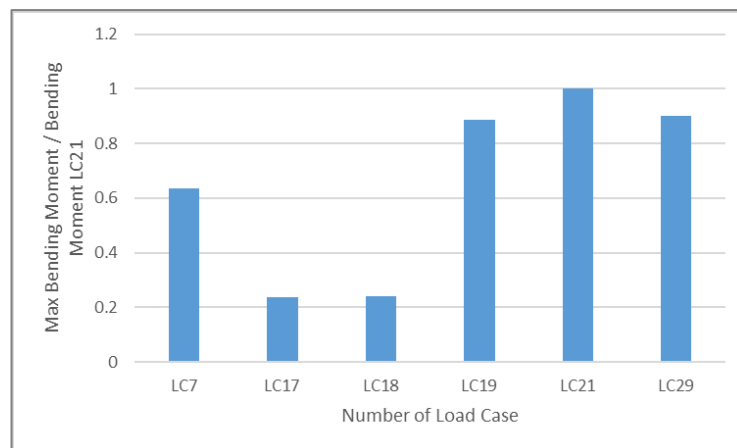
**Σχήμα Α'.59** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



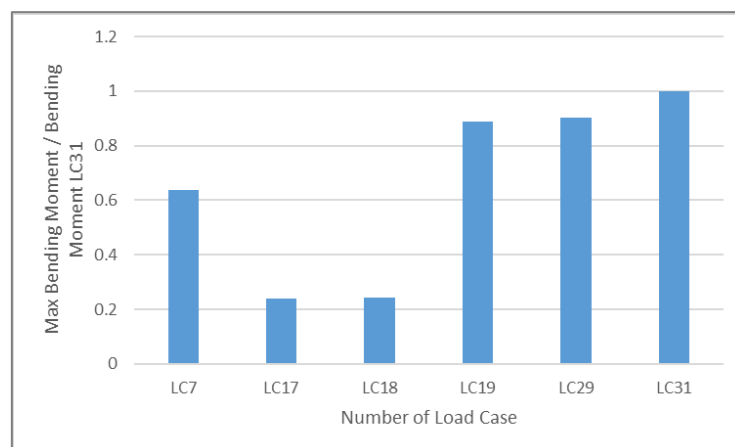
**Σχήμα Α'.60** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



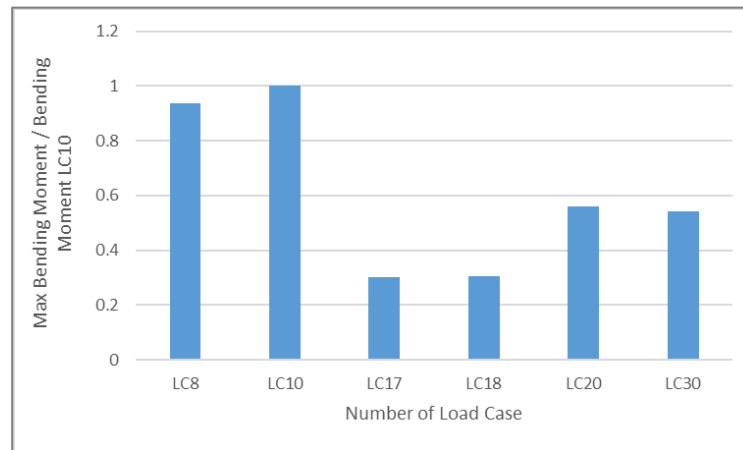
**Σχήμα Α'.61** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



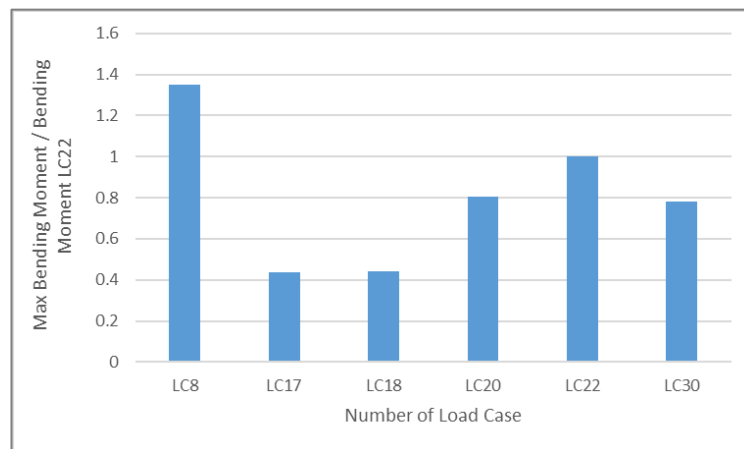
**Σχήμα Α'.62** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



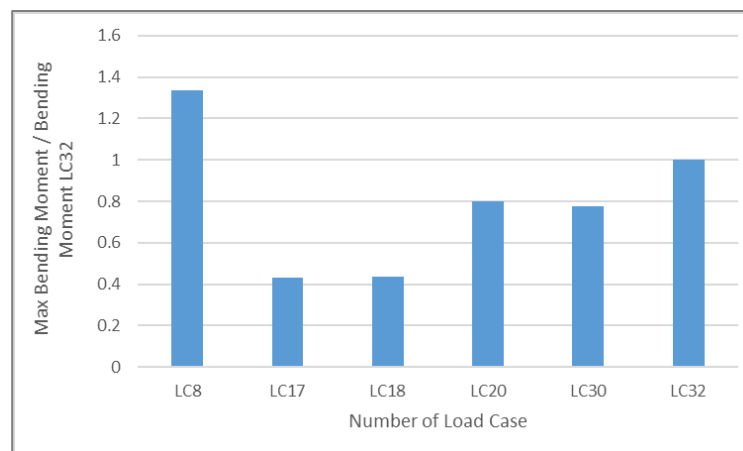
**Σχήμα Α'.63** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



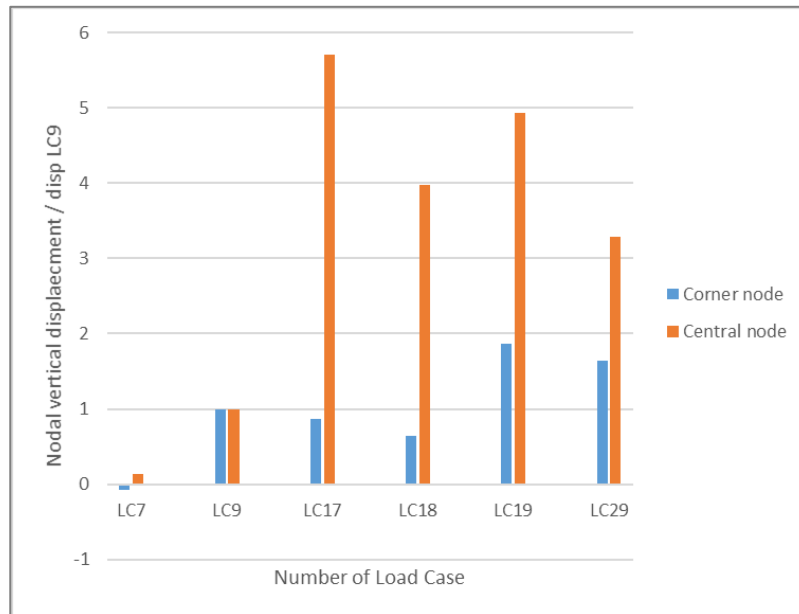
**Σχήμα Α'.64** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



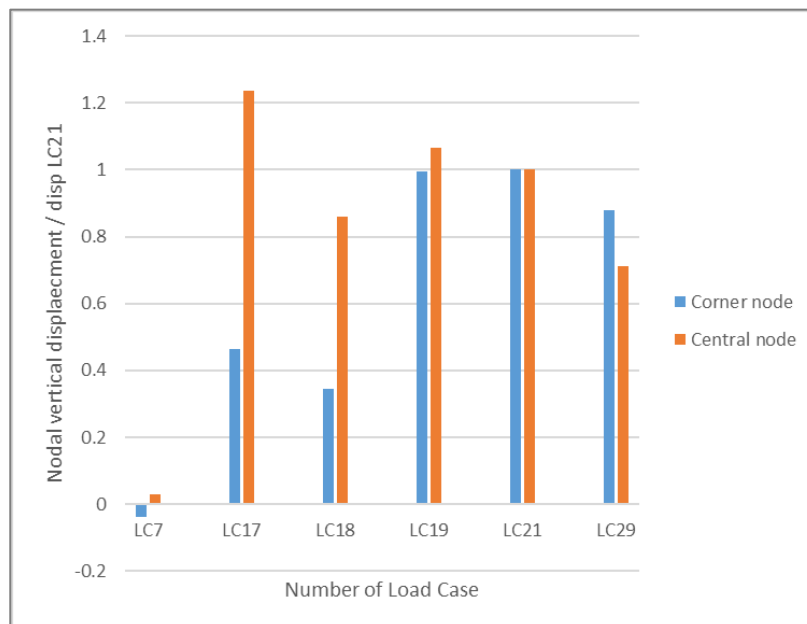
**Σχήμα Α'.65** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



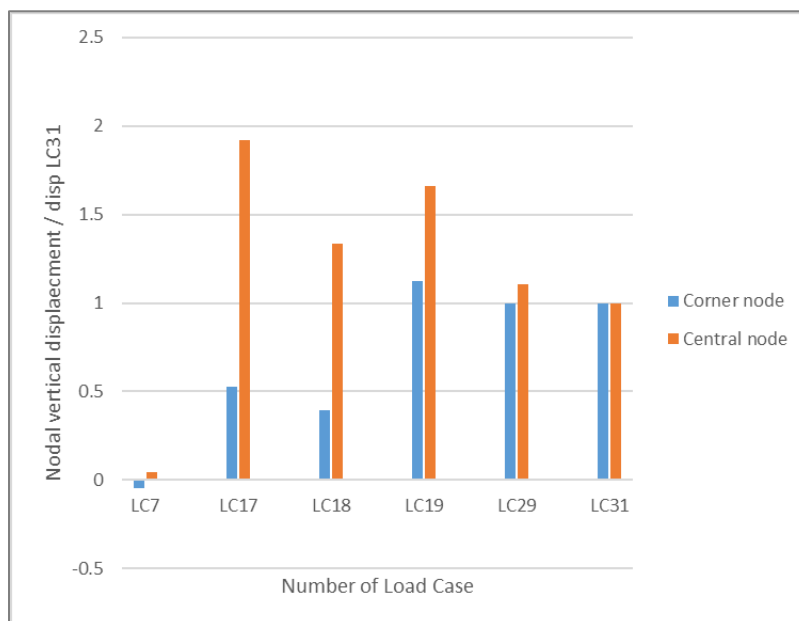
**Σχήμα Α'.66** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής φορτίσεων προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



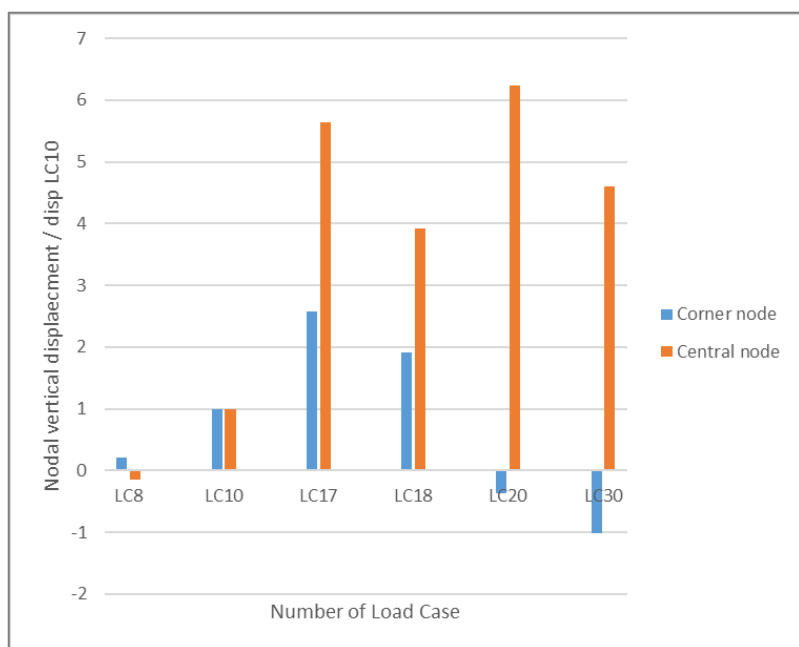
**Σχήμα Α'.67** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



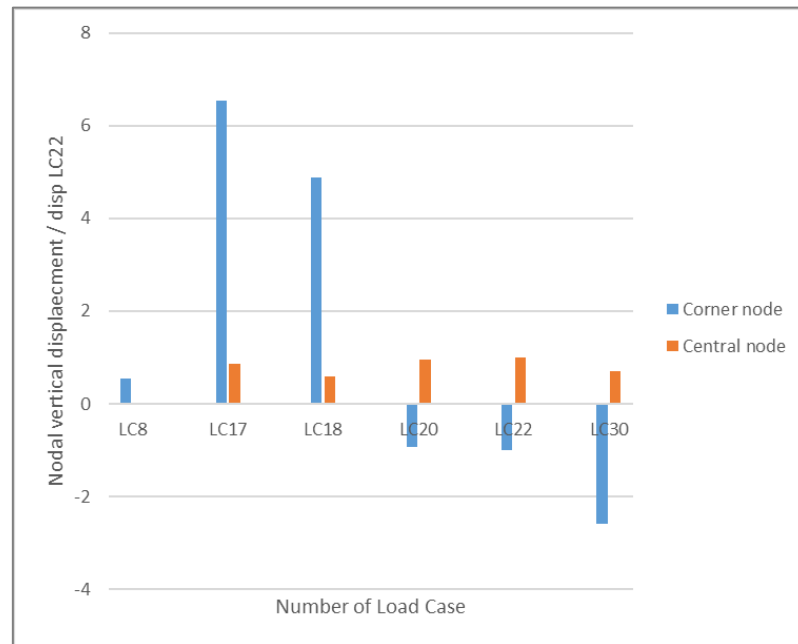
**Σχήμα Α'.68** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



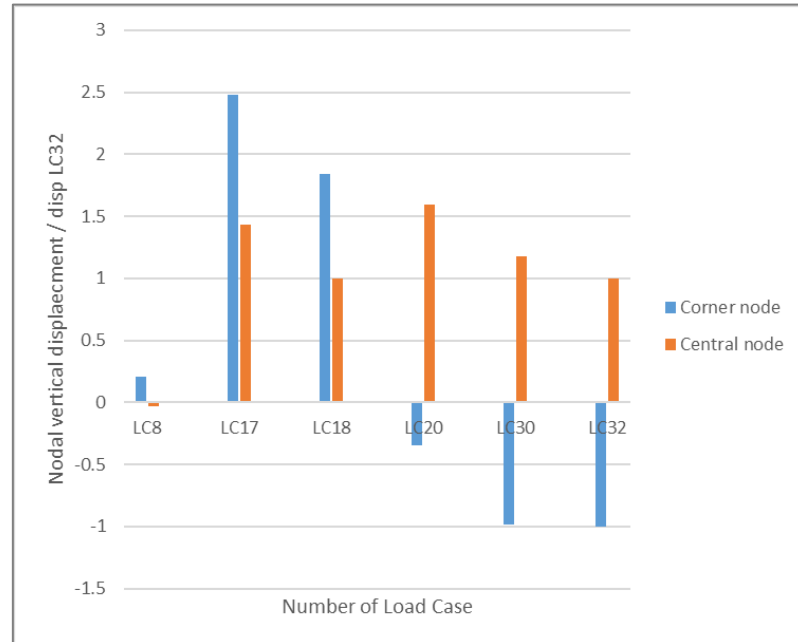
**Σχήμα Α'.69** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



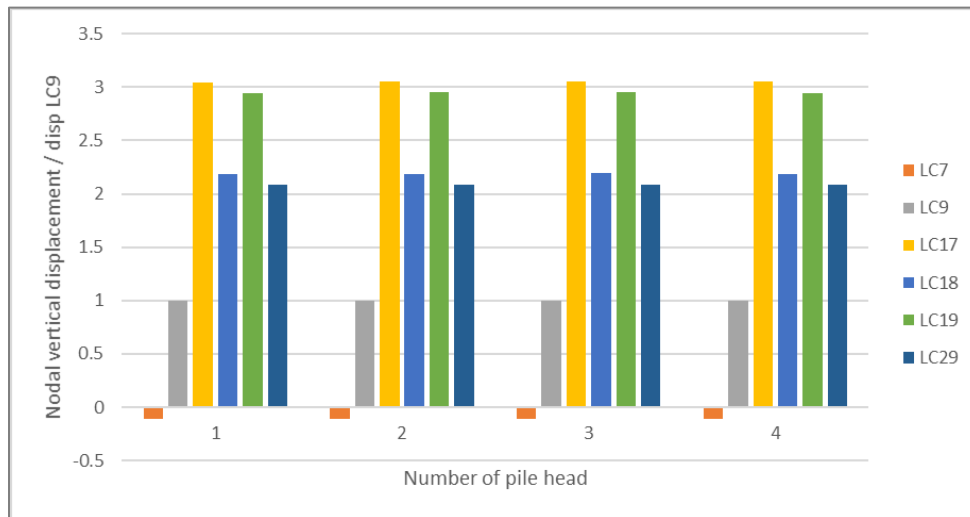
**Σχήμα Α'.70** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



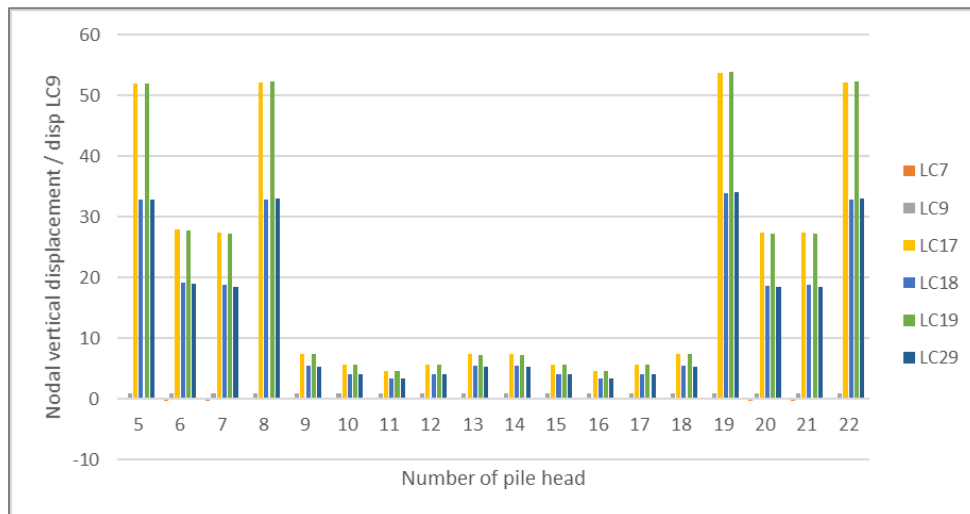
*Σχήμα Α'.71* Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



*Σχήμα Α'.72* Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

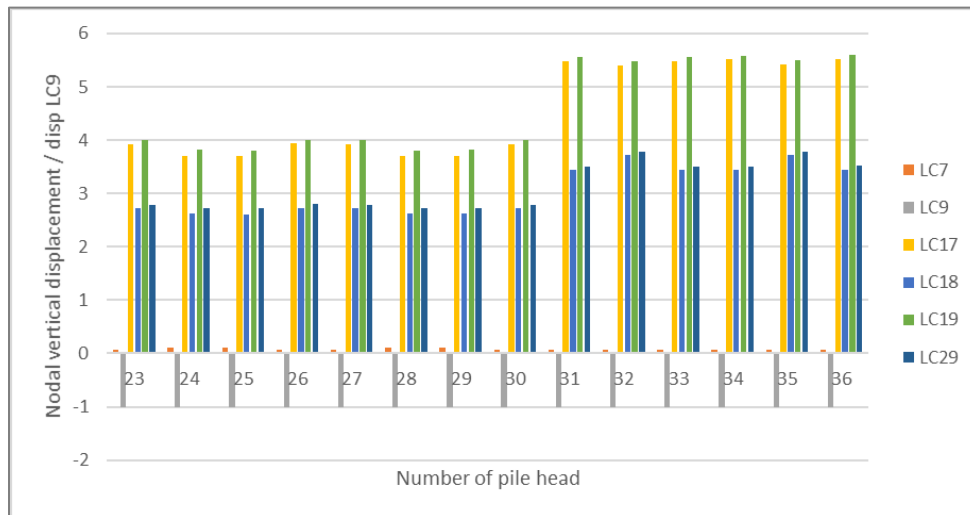


**Σχήμα Α'.73** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.

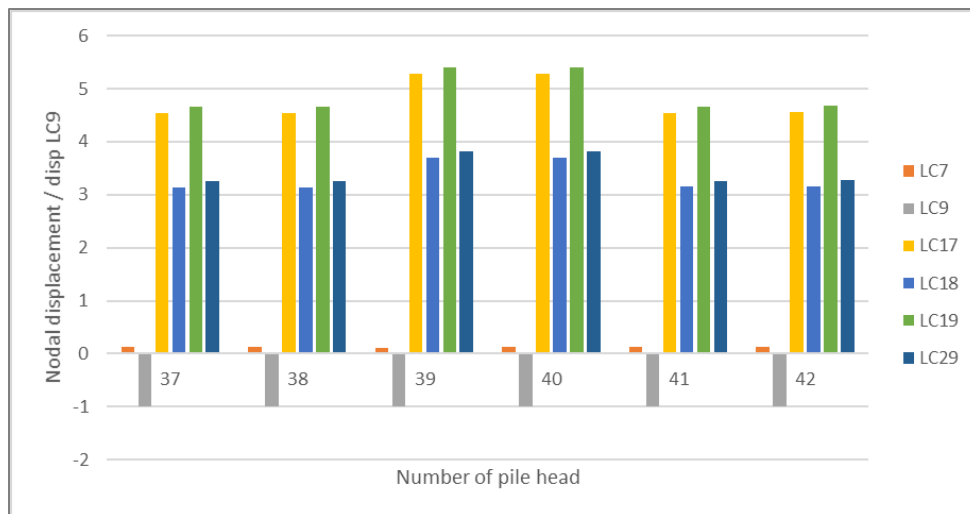


**Σχήμα Α'.74** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.

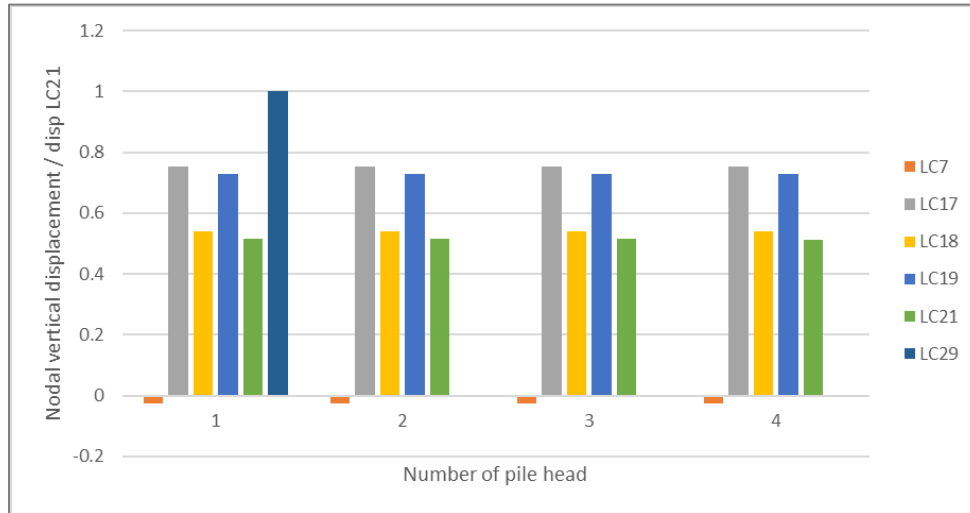




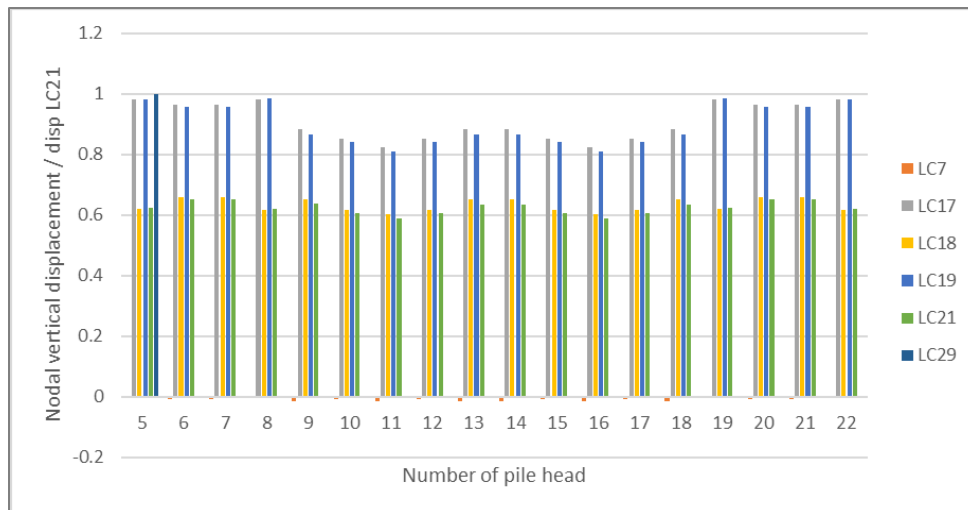
**Σχήμα Α'.75** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



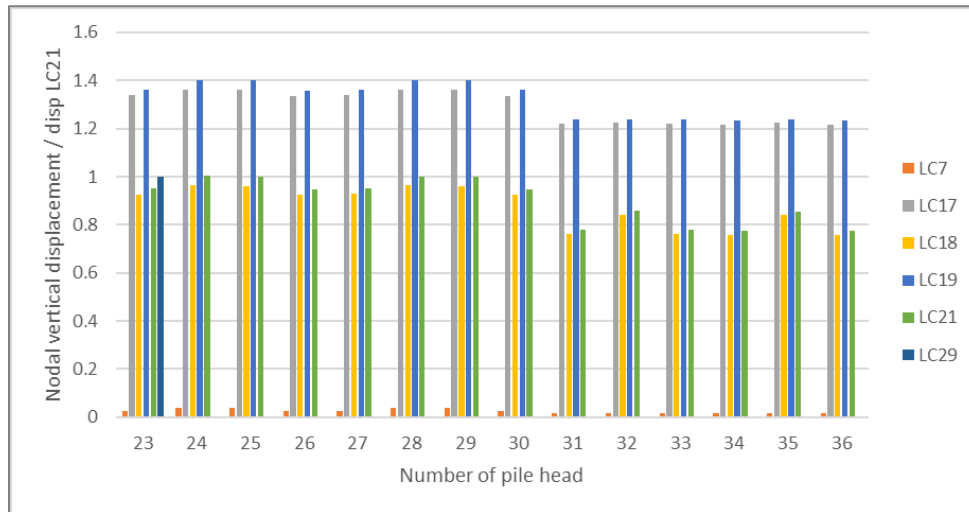
**Σχήμα Α'.76** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



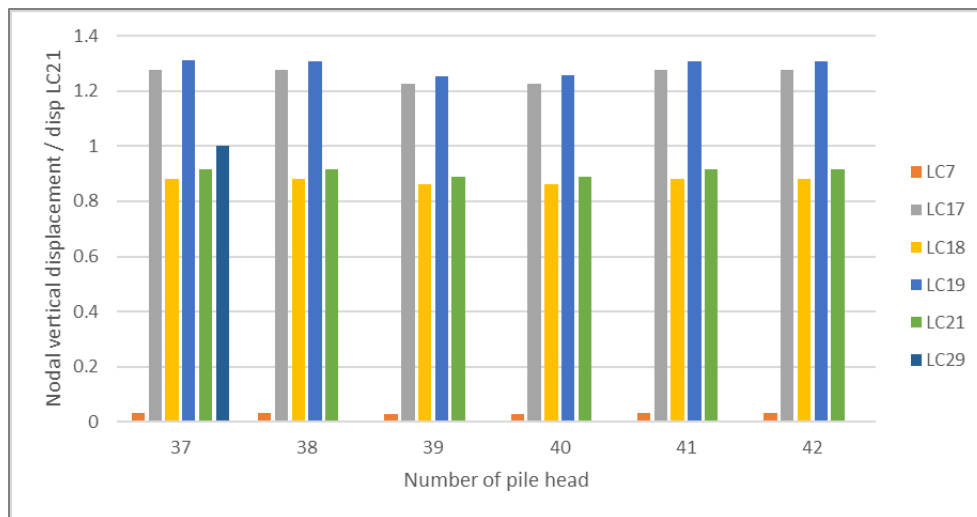
**Σχήμα Α'.77** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



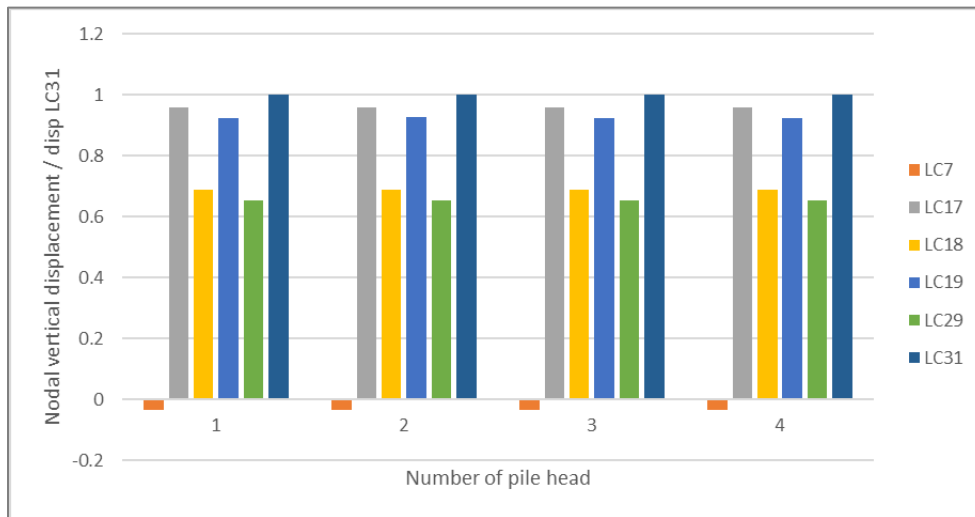
**Σχήμα Α'.78** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



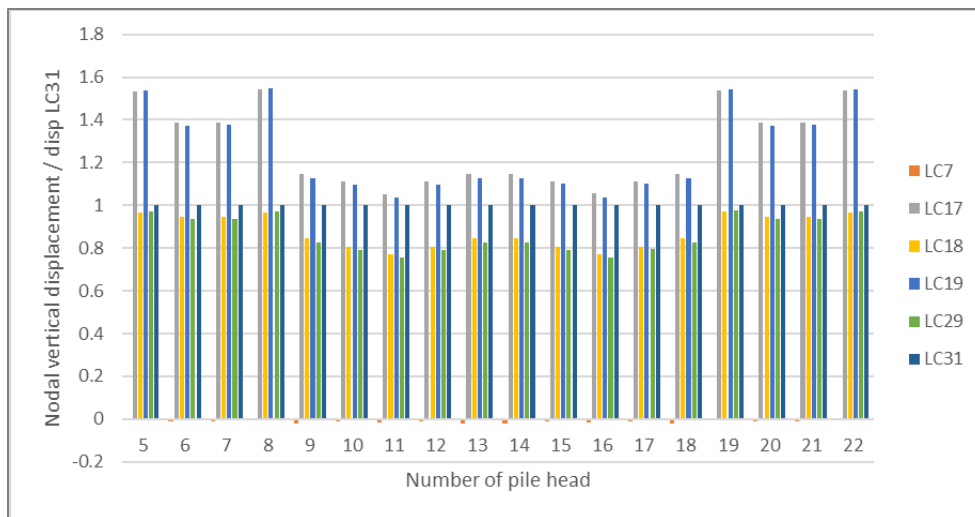
**Σχήμα Α'.79** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



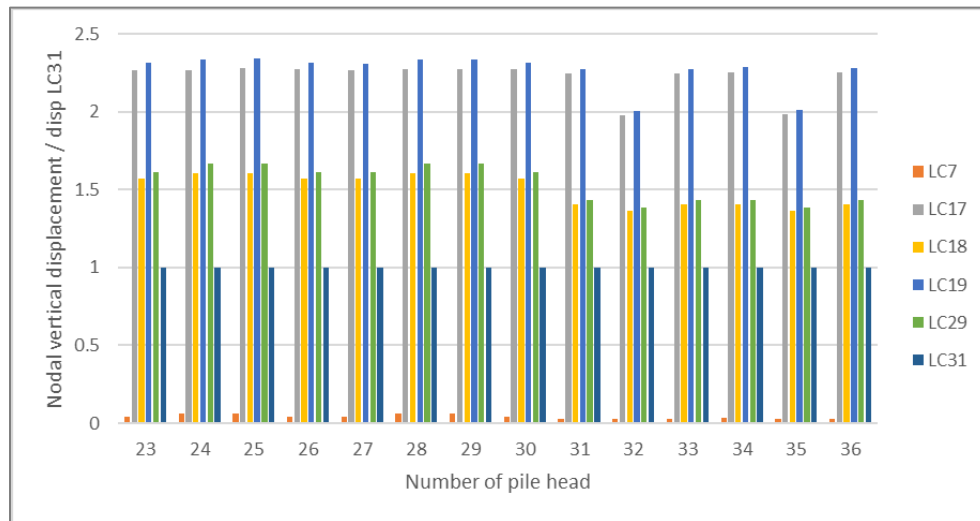
**Σχήμα Α'.80** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC21 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



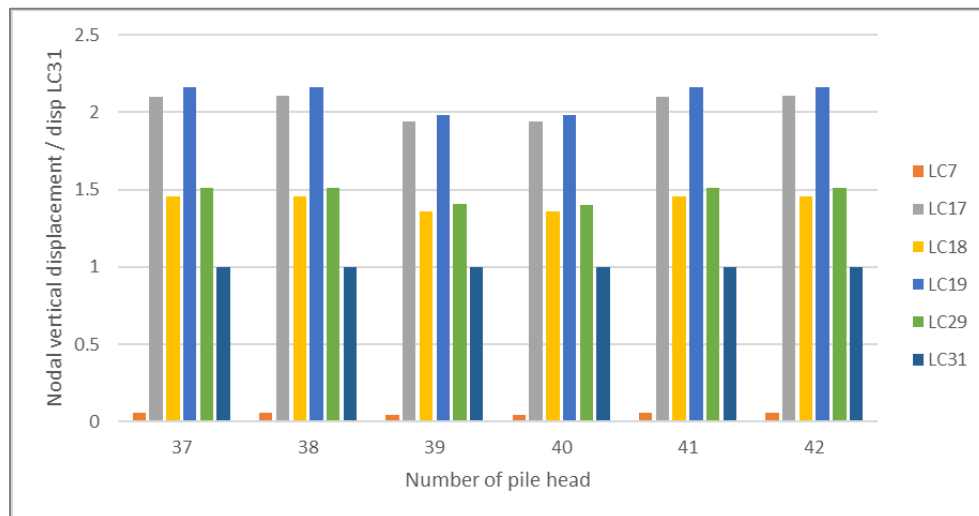
**Σχήμα Α'.81** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



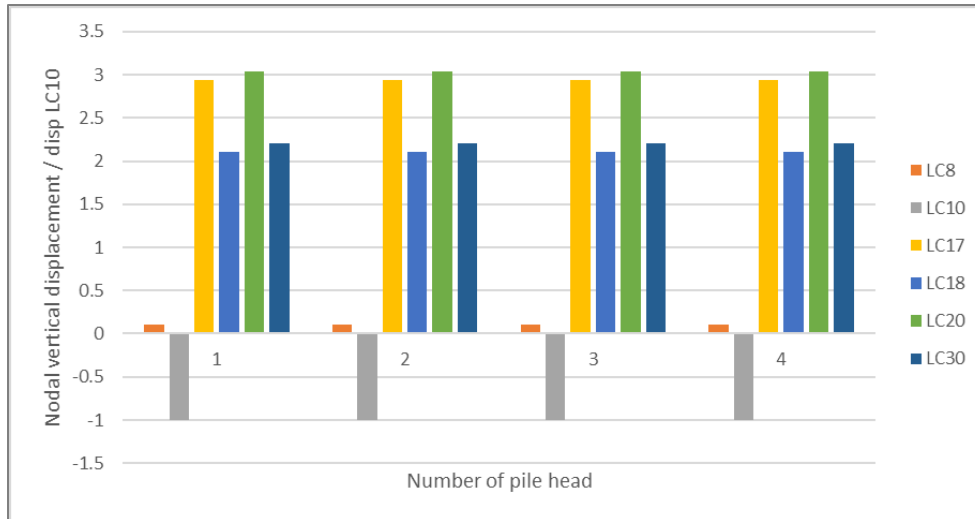
**Σχήμα Α'.82** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



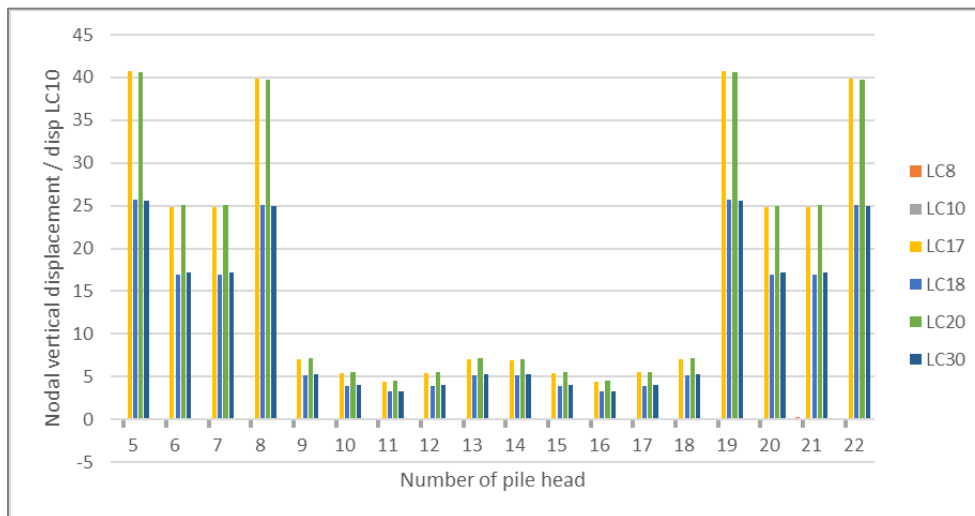
**Σχήμα Α'.83** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



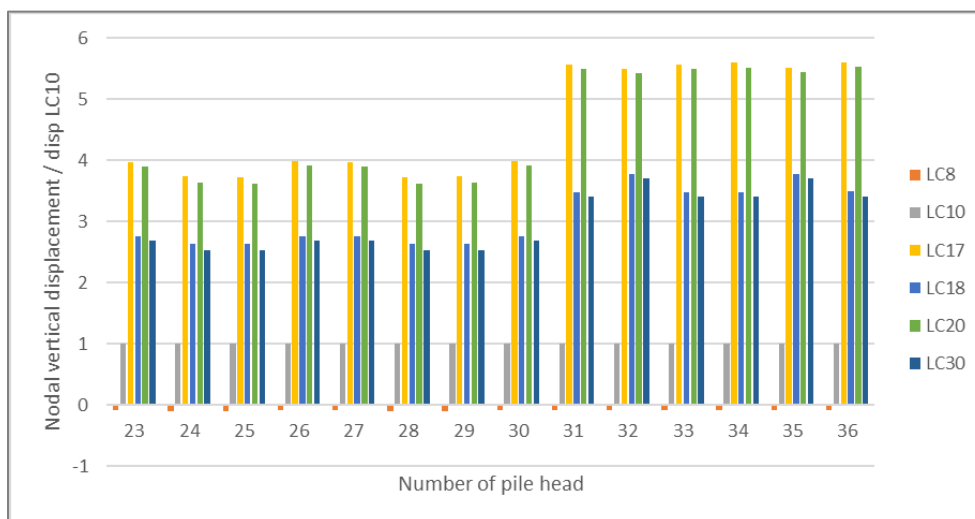
**Σχήμα Α'.84** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC31 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους χειμερινούς μήνες.



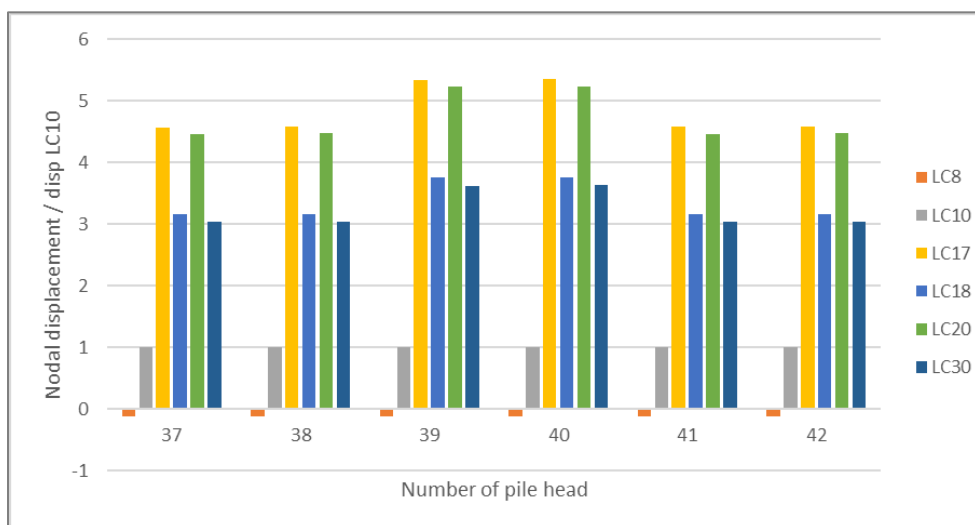
**Σχήμα Α'.85** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



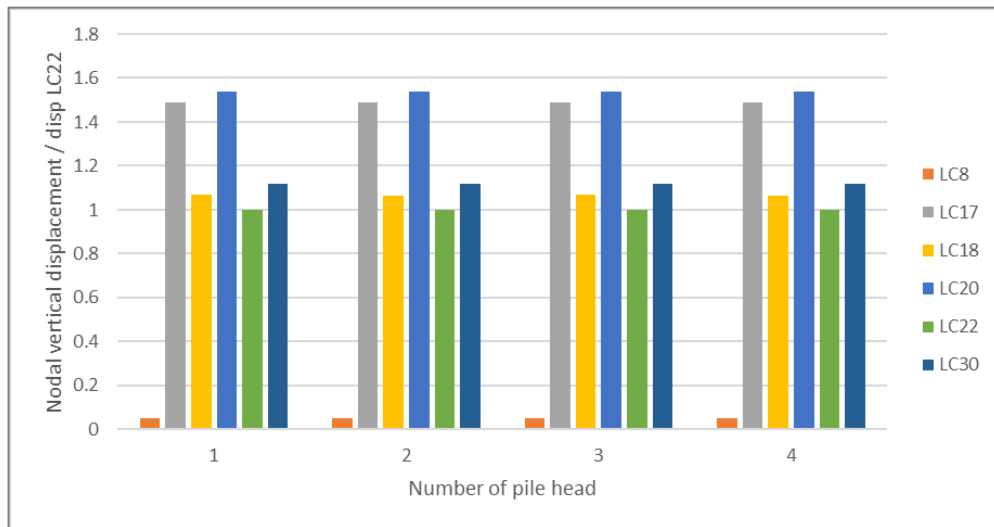
**Σχήμα Α'.86** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



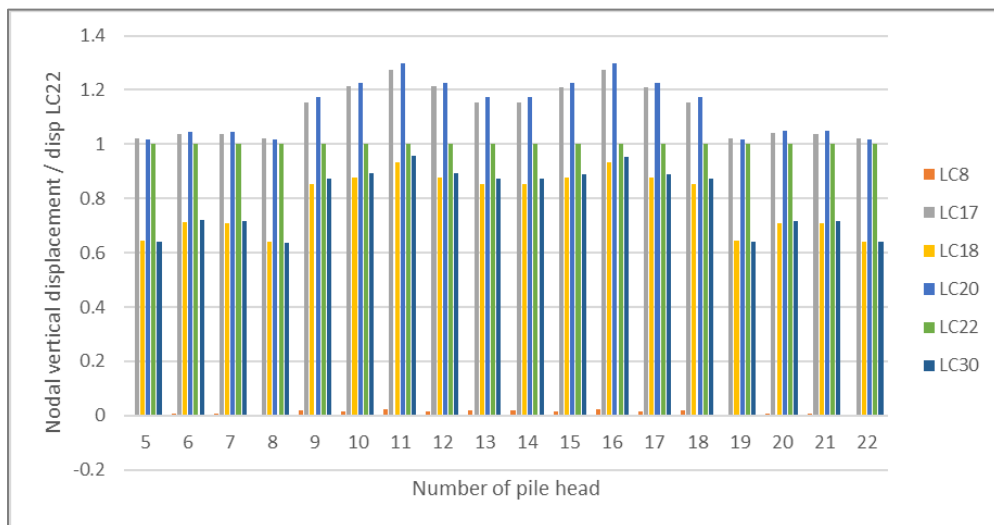
**Σχήμα Α'.87** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα Α'.88** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC10 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

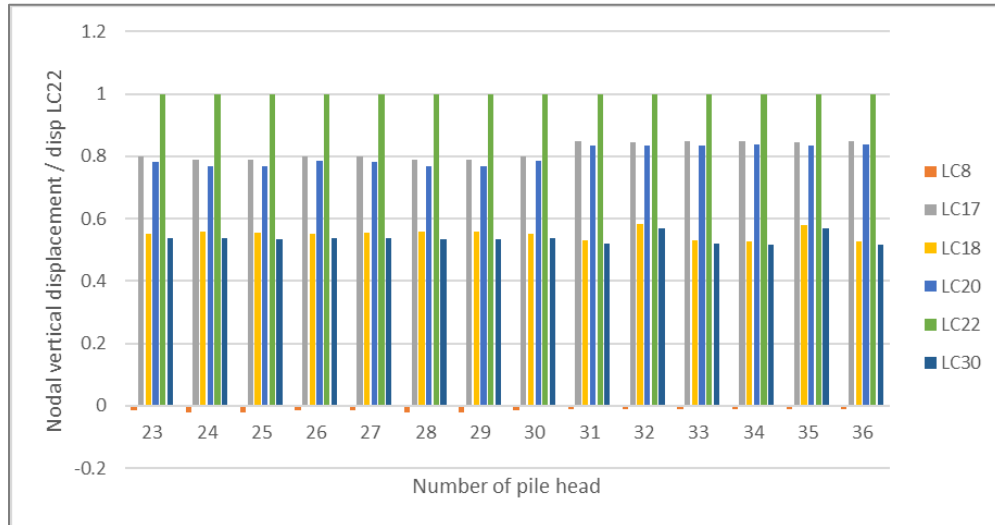


**Σχήμα Α'.89** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

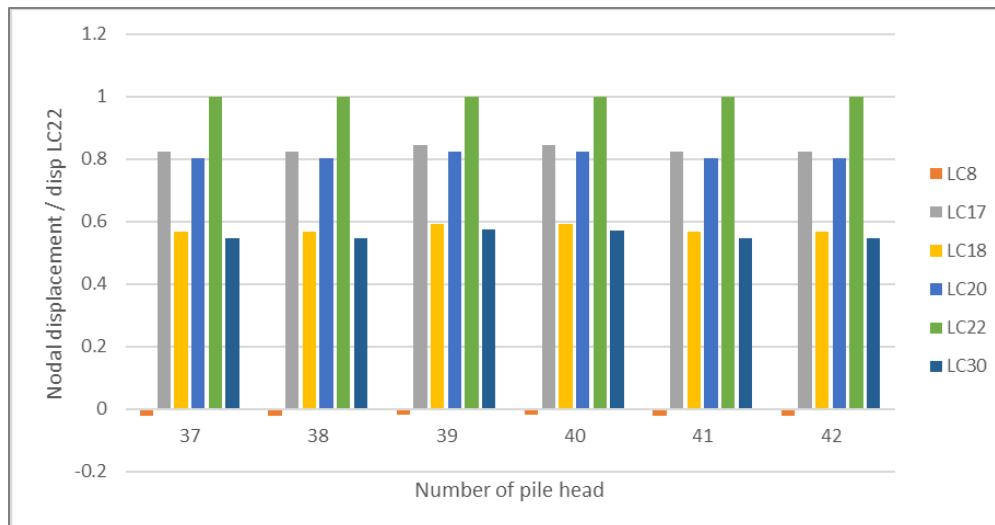


**Σχήμα Α'.90** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

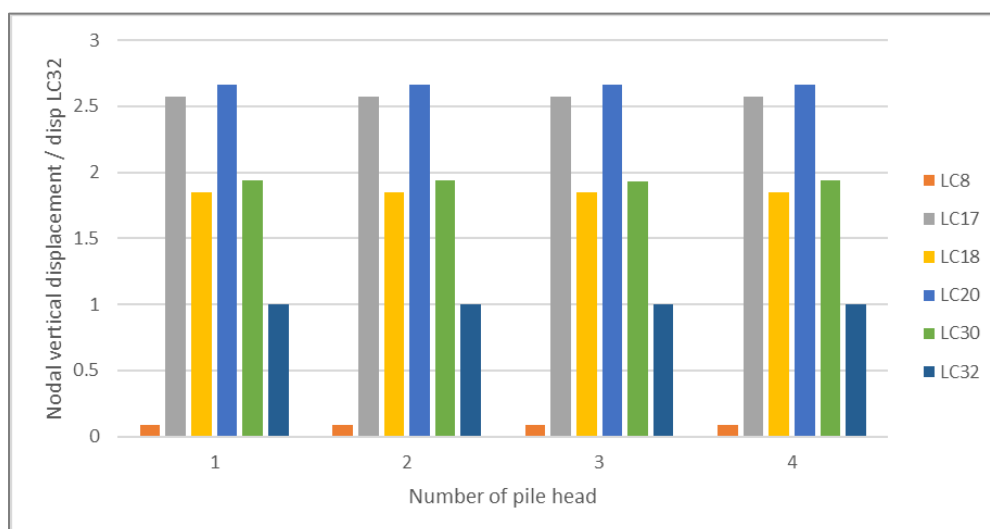




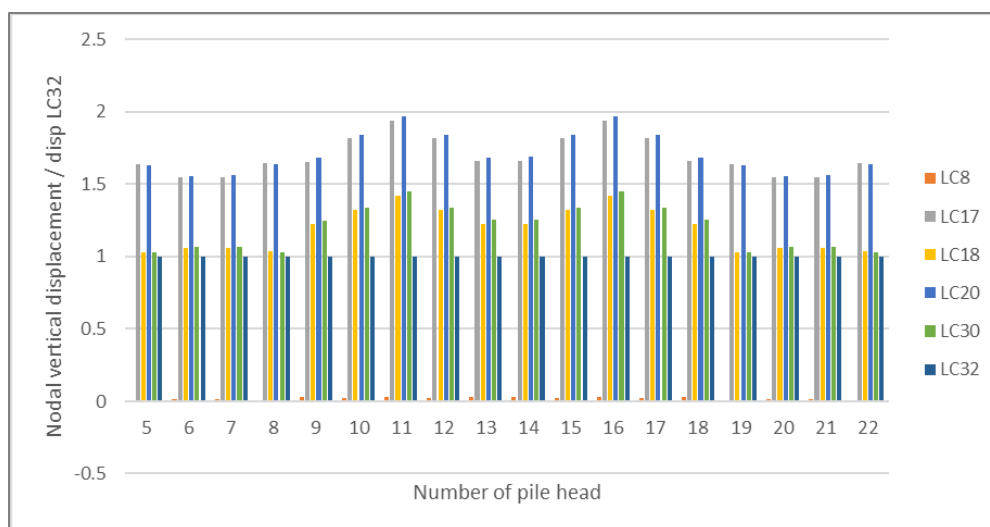
**Σχήμα Α'.91** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



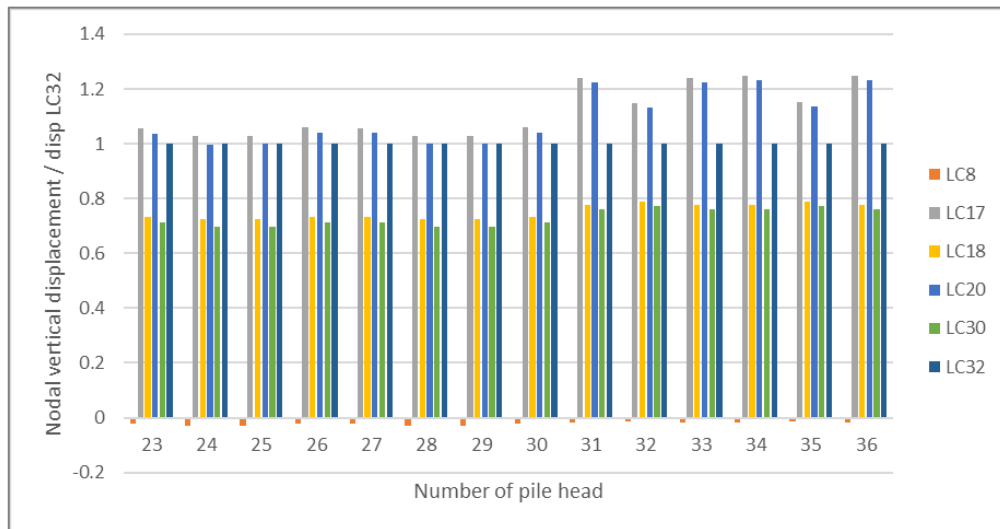
**Σχήμα Α'.92** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC9 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



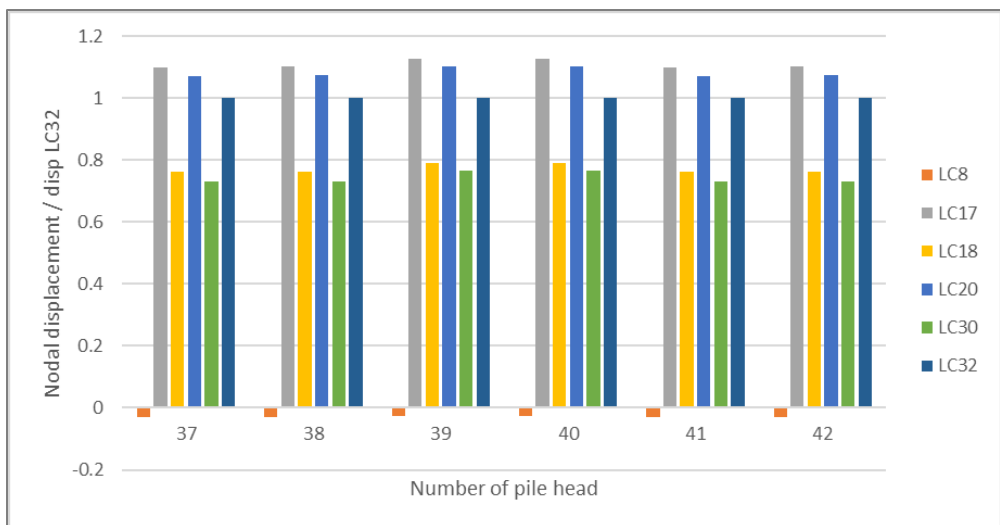
**Σχήμα Α'.93** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 για γωνιακούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



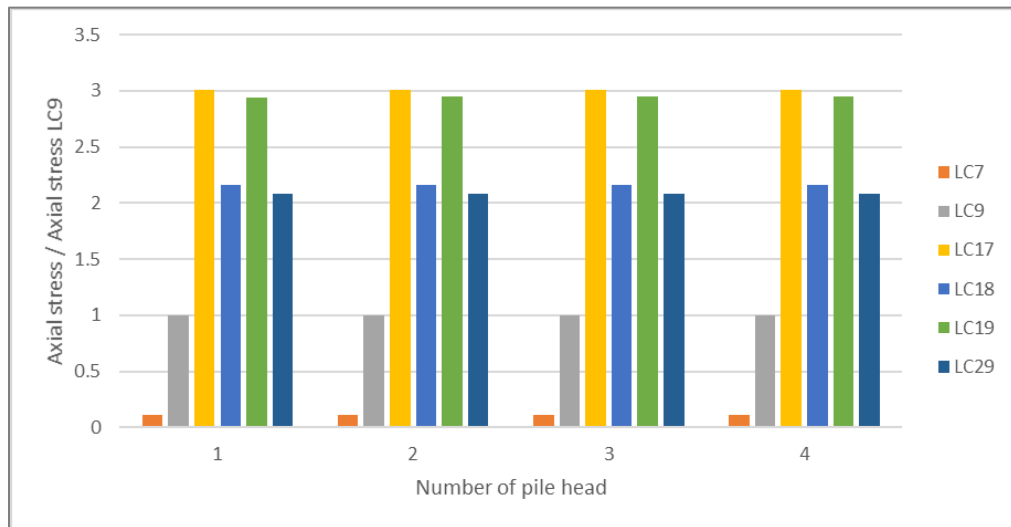
**Σχήμα Α'.94** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 για εξωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



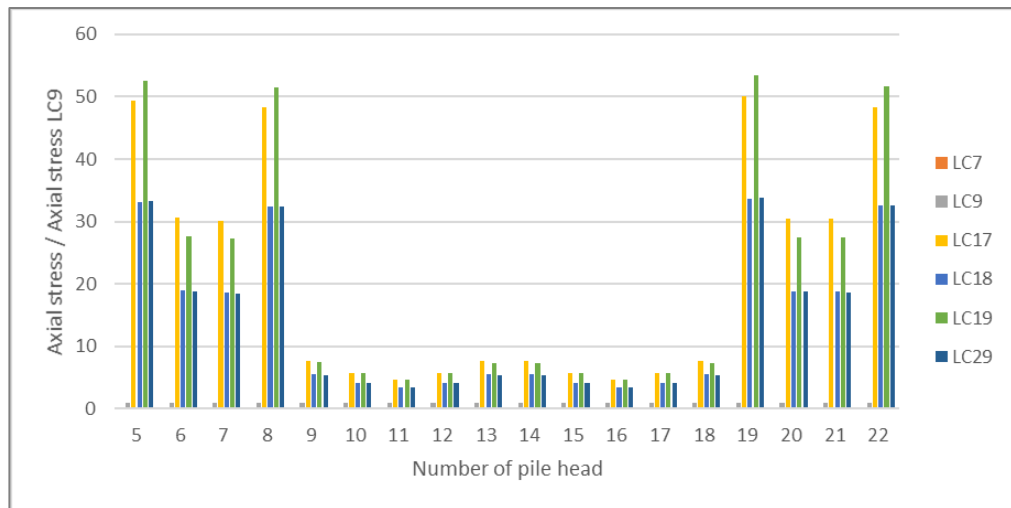
**Σχήμα Α'.95** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 για ενδιάμεσους πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



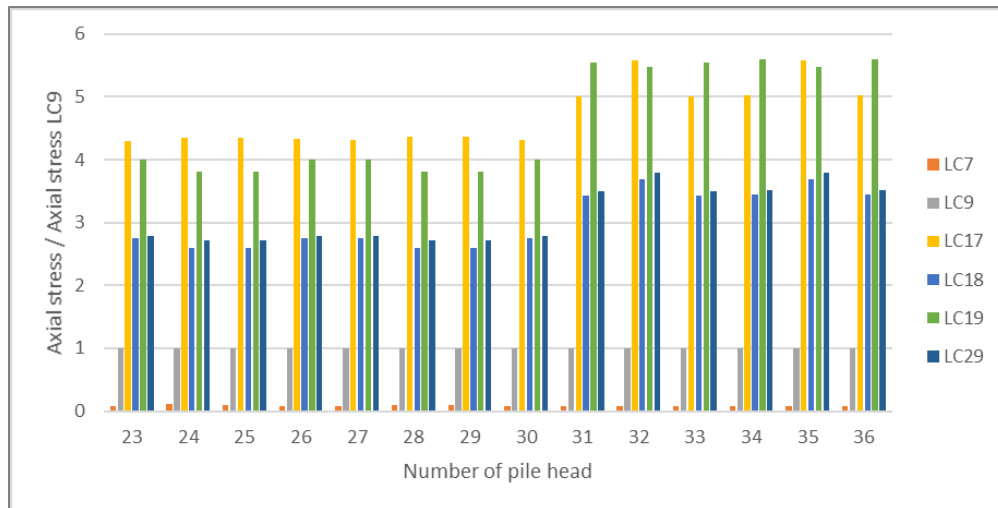
**Σχήμα Α'.96** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης φορτίσεων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC32 για εσωτερικούς πασσάλους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



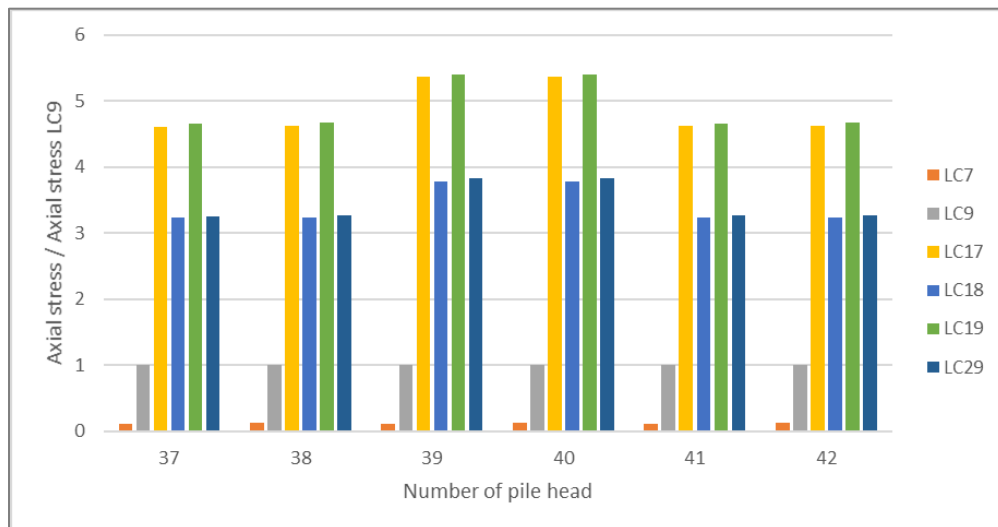
**Σχήμα Α'.97** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



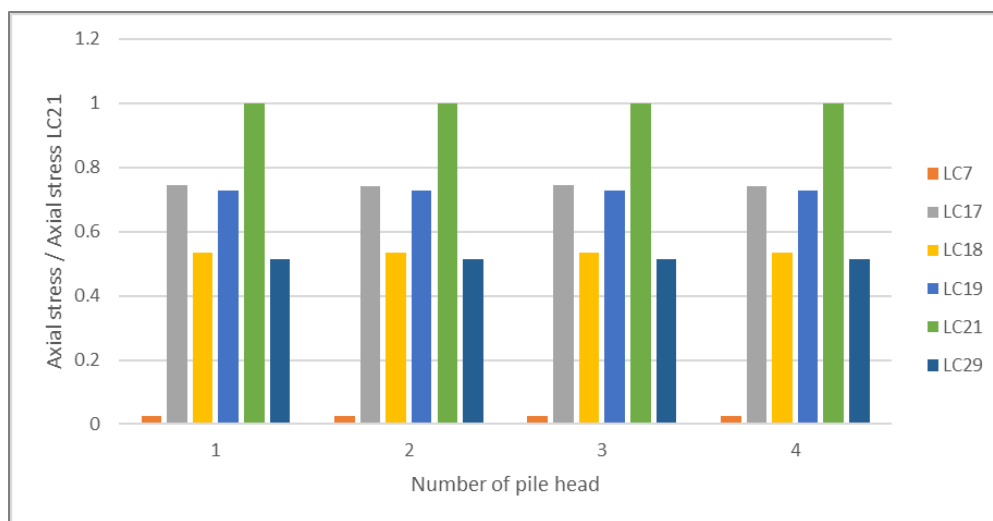
**Σχήμα Α'.98** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



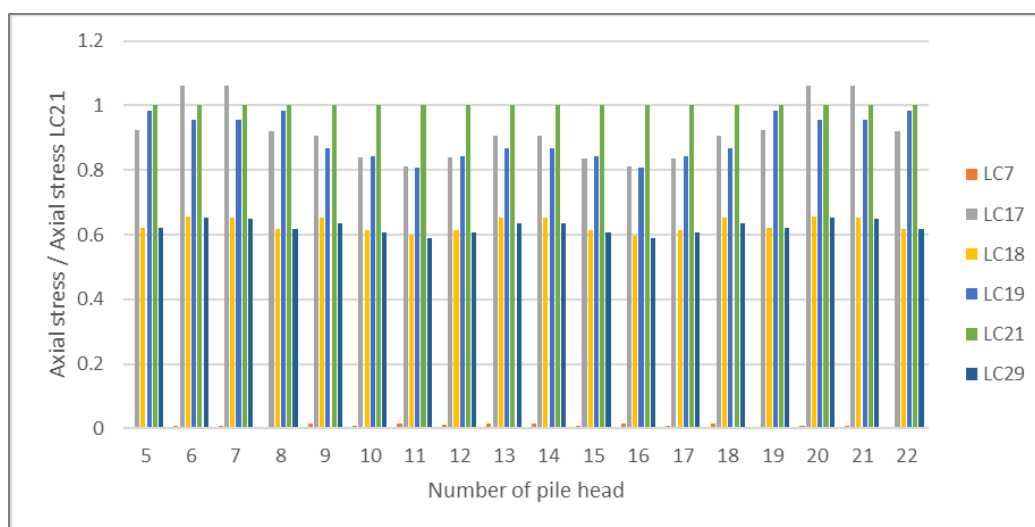
Σχήμα Α'.99 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



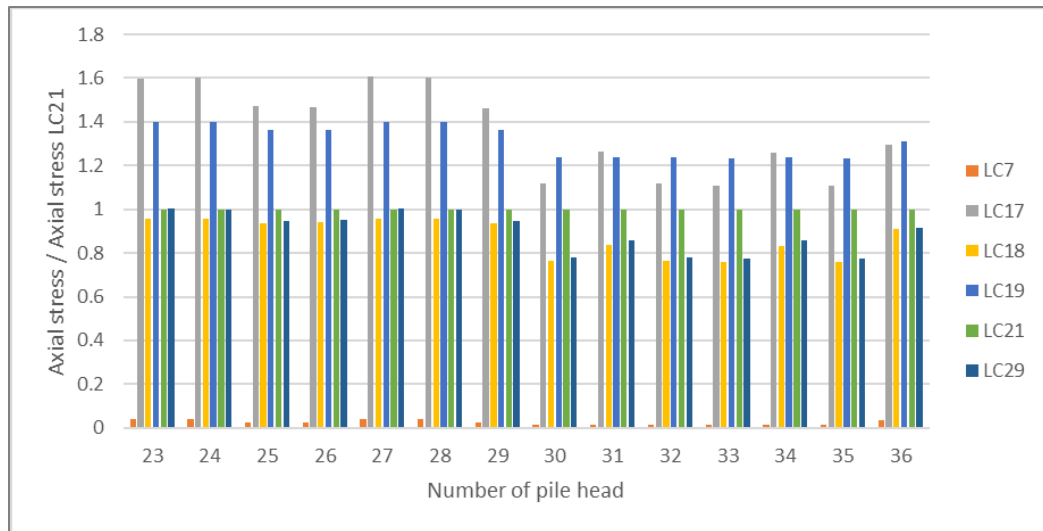
Σχήμα Α'.100 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC9 κατά τους χειμερινούς μήνες.



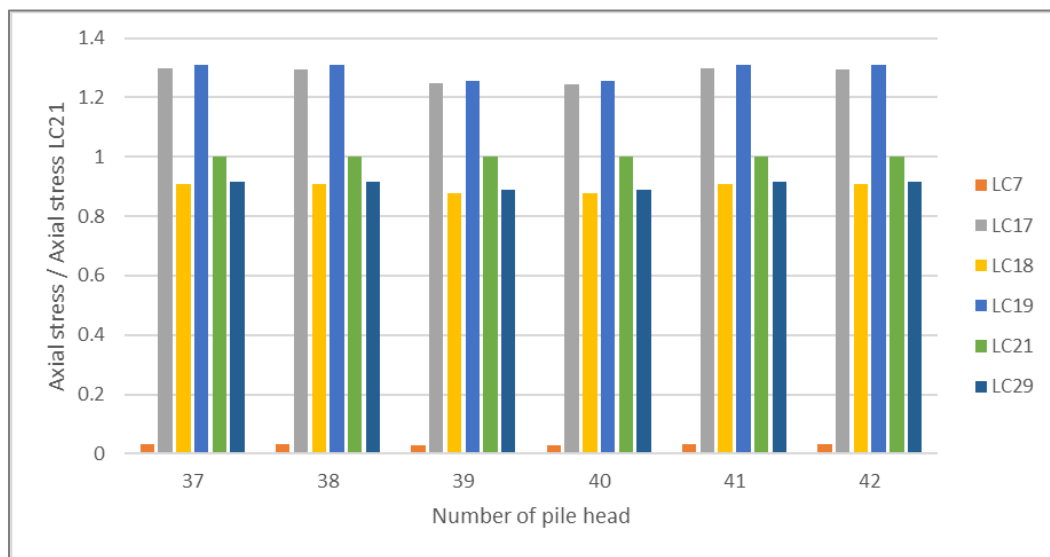
*Σχήμα Α'.101* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



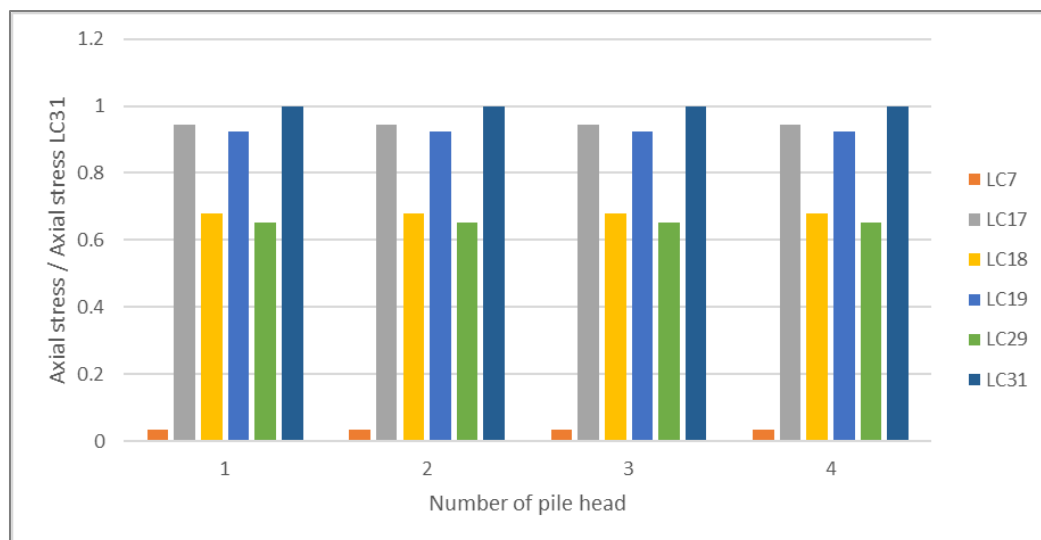
*Σχήμα Α'.102* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



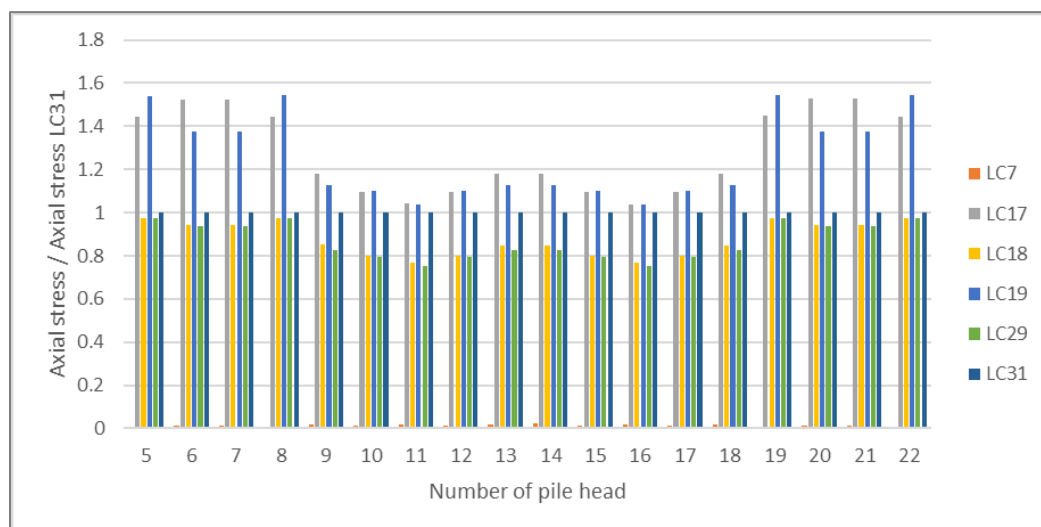
*Σχήμα Α'.103* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



*Σχήμα Α'.104* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.

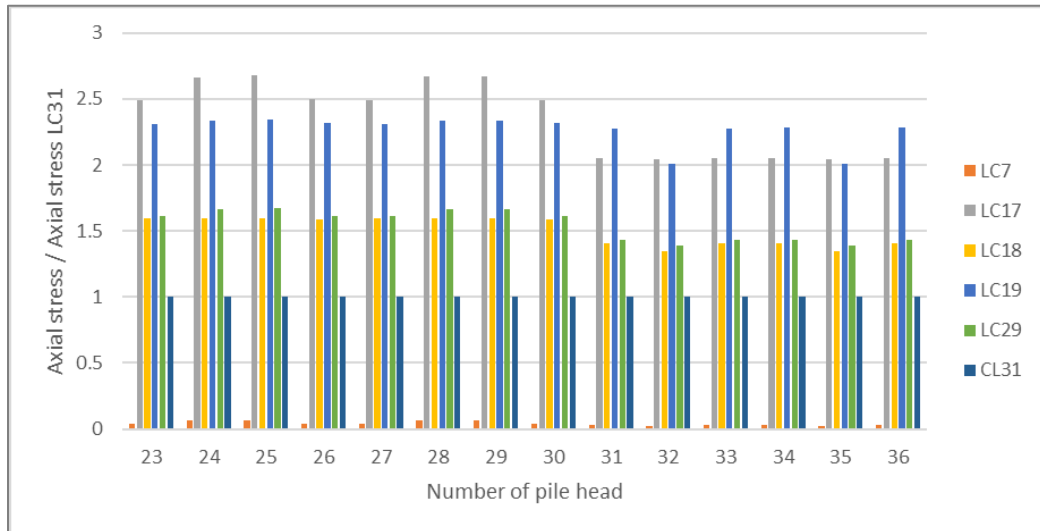


**Σχήμα Α'.105** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.

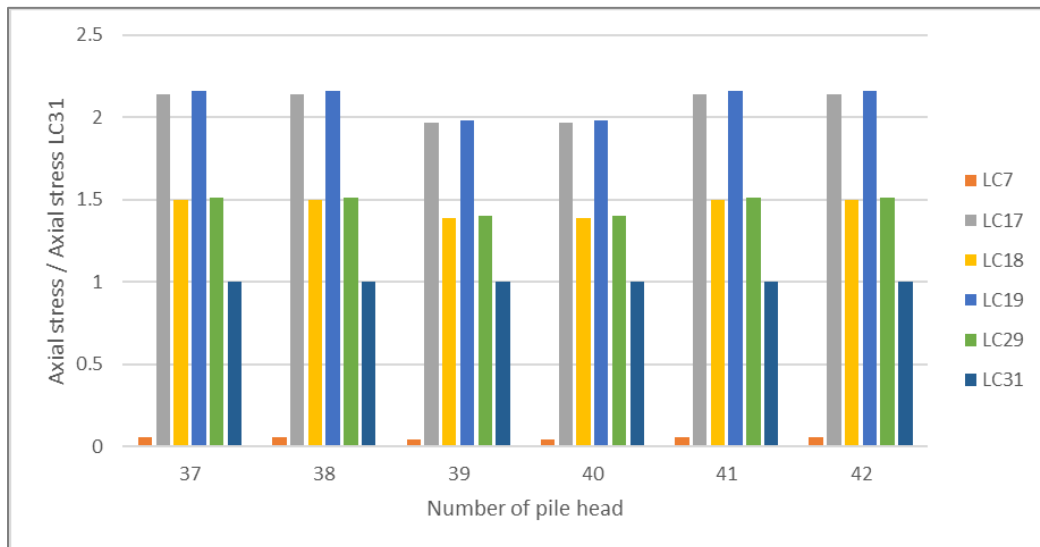


**Σχήμα Α'.106** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.

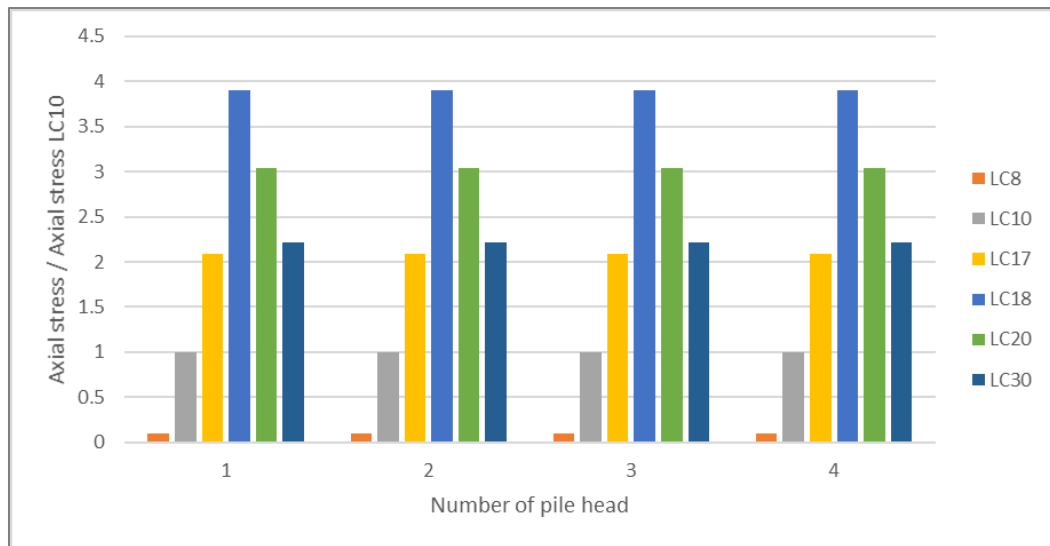




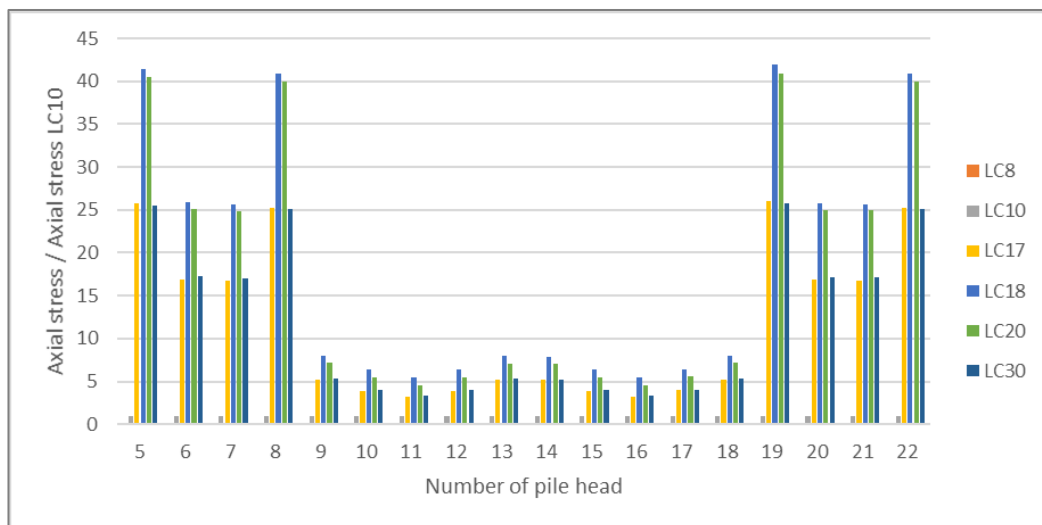
*Σχήμα Α'.107* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



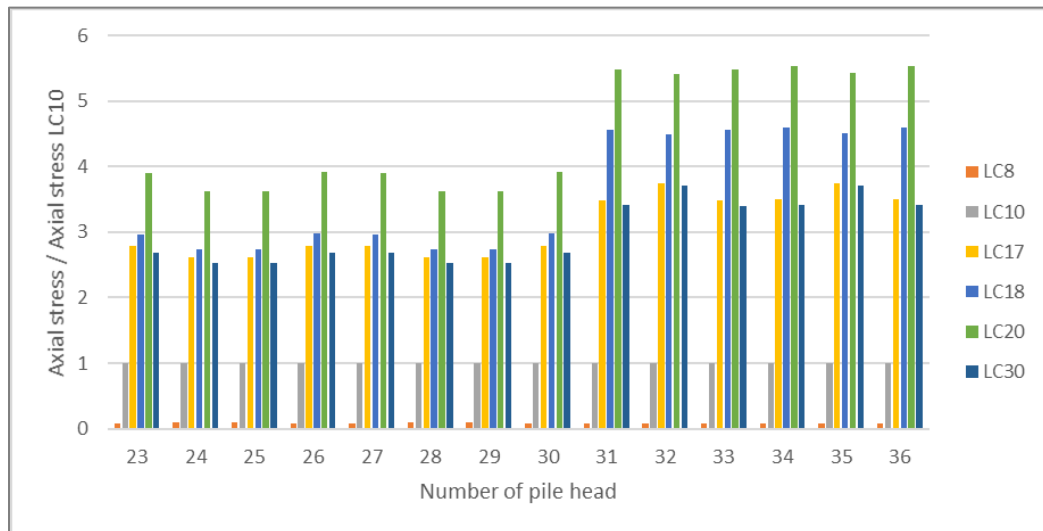
*Σχήμα Α'.108* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC31 κατά τους χειμερινούς μήνες.



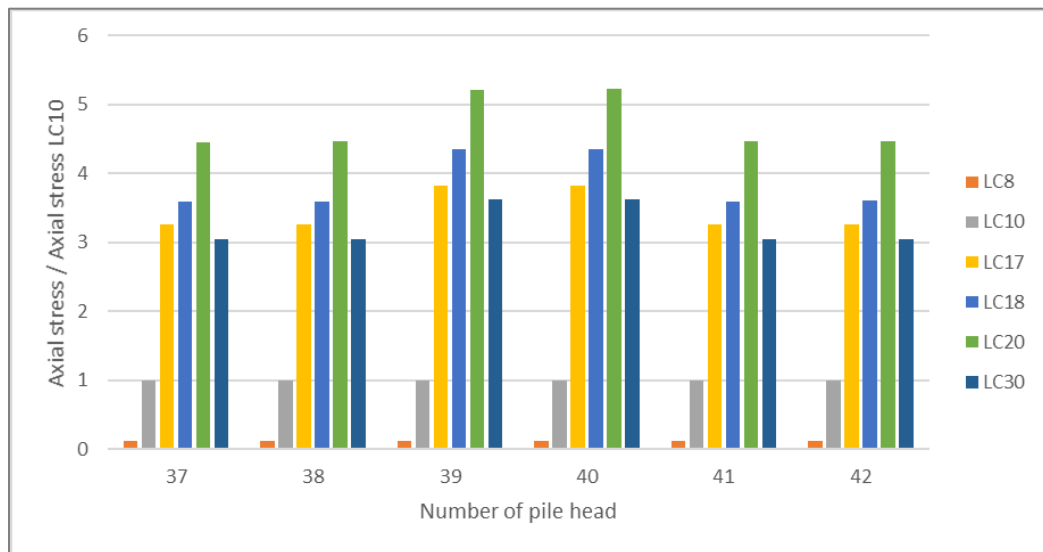
**Σχήμα Α'.109** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



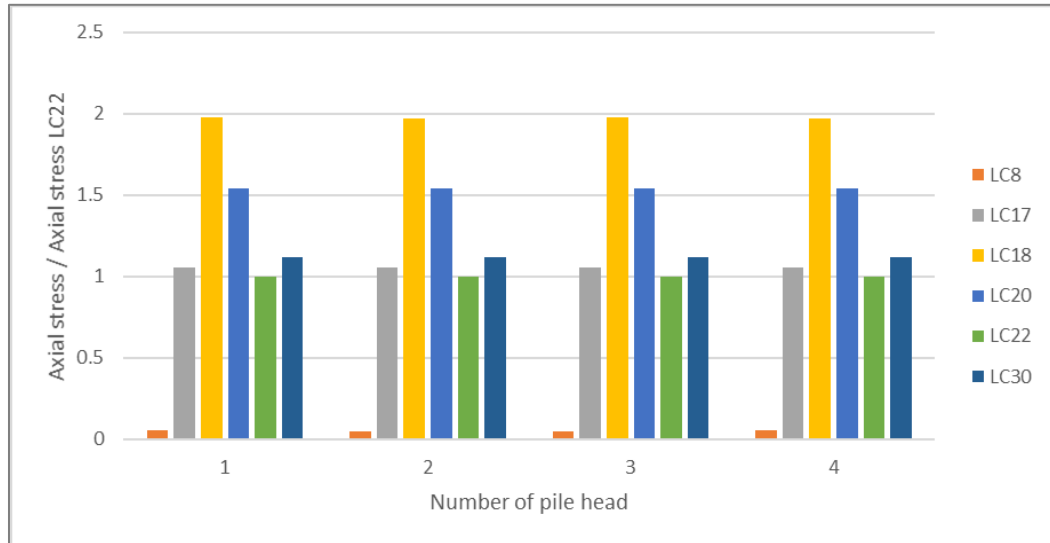
**Σχήμα Α'.110** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



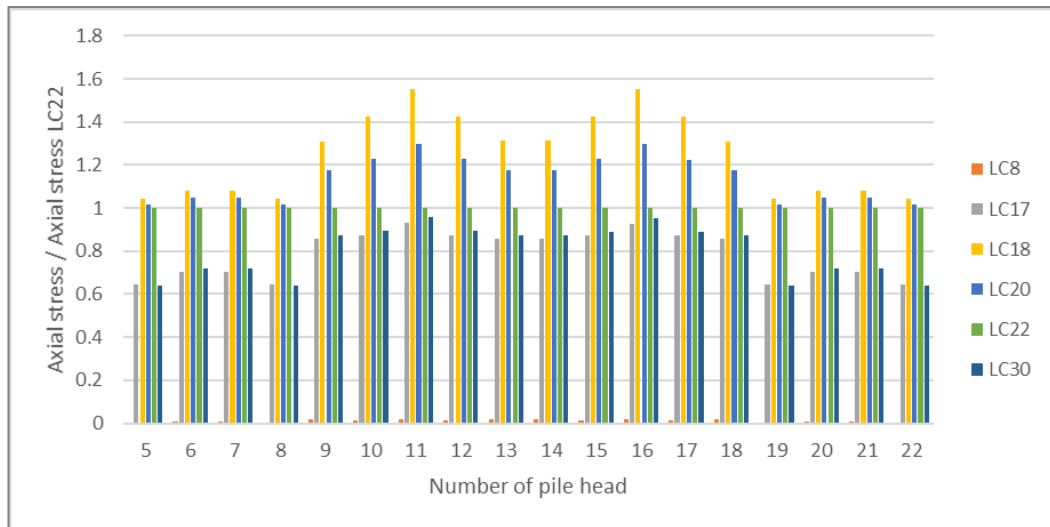
*Σχήμα Α'.111* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσους πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



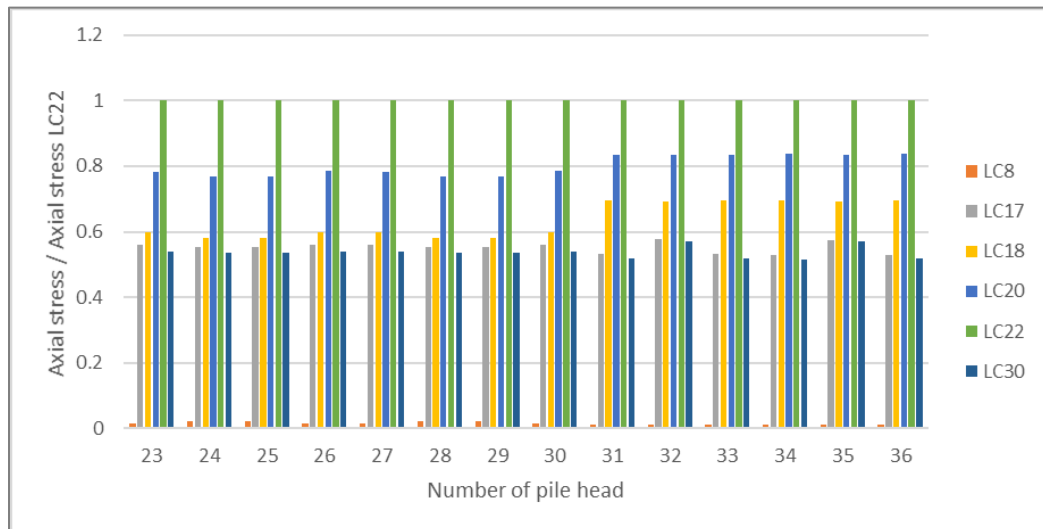
*Σχήμα Α'.112* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικούς πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC10 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



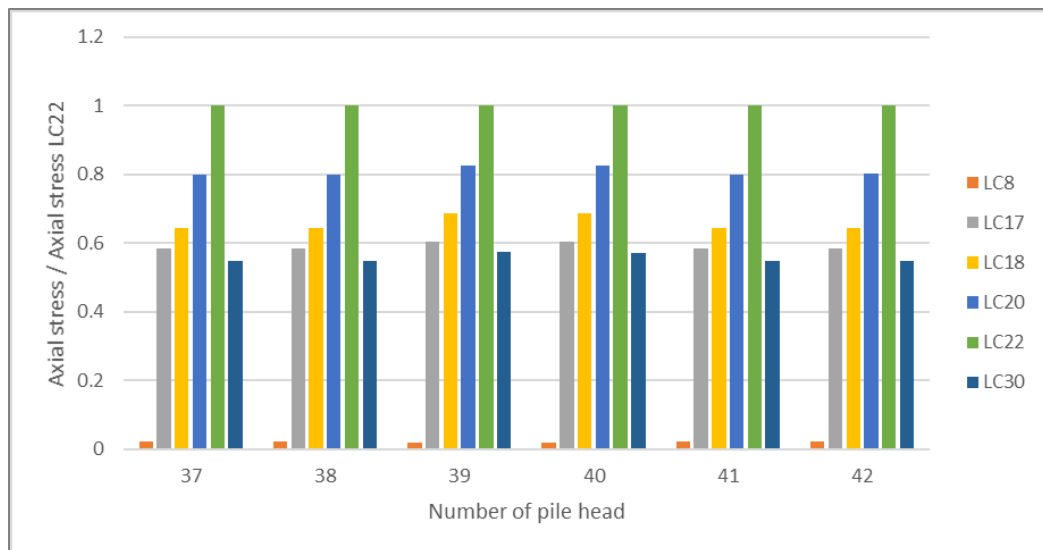
**Σχήμα Α'.113** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



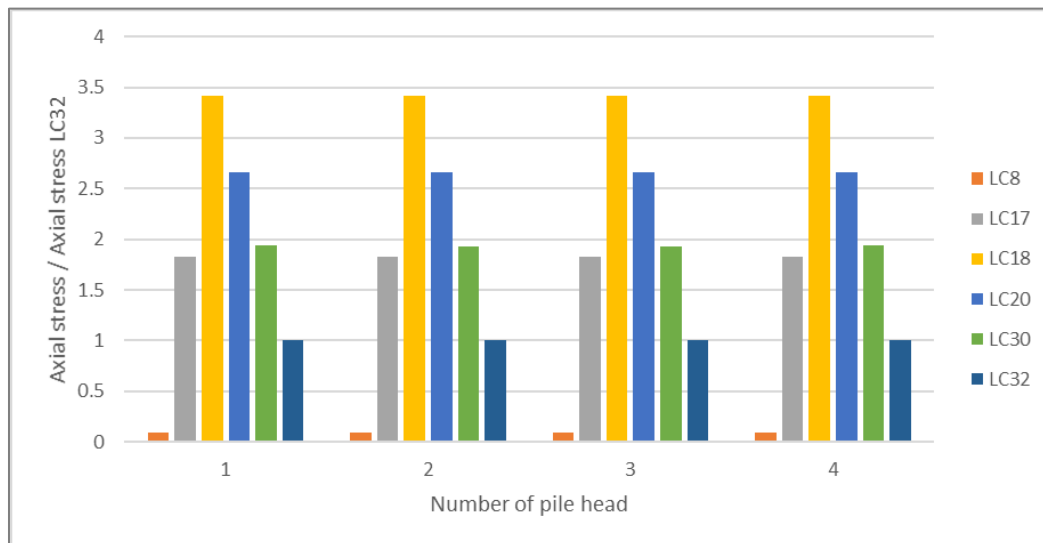
**Σχήμα Α'.114** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



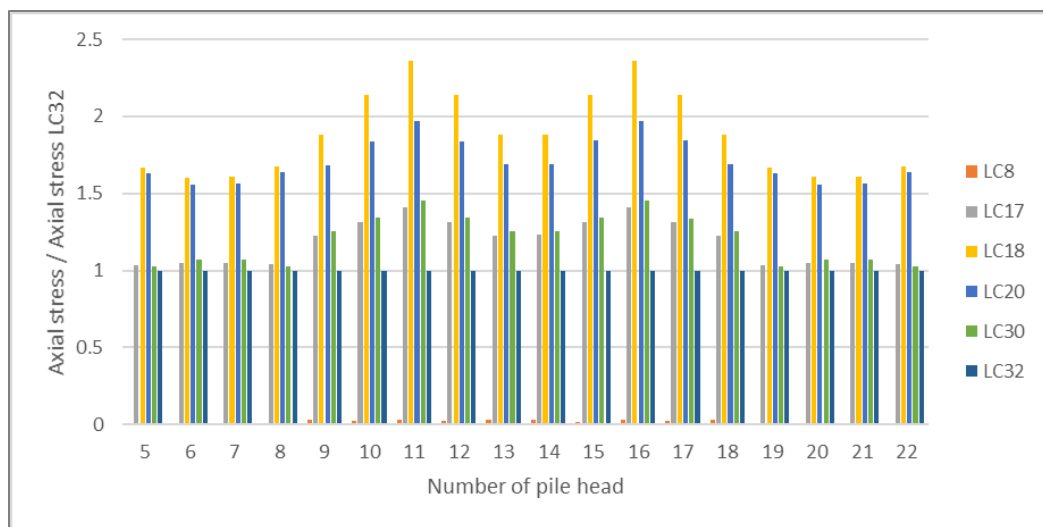
*Σχήμα Α'.115* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



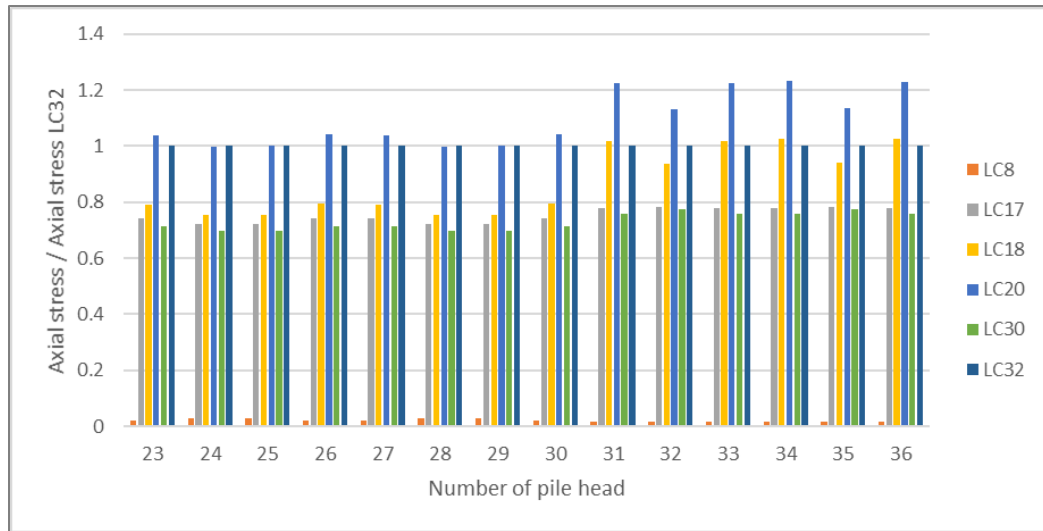
*Σχήμα Α'.116* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC22 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



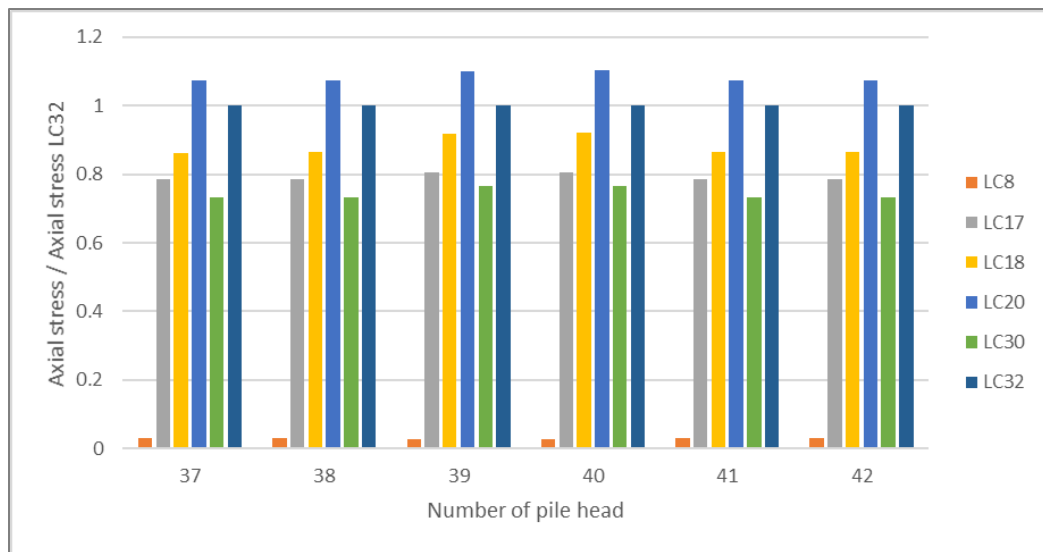
*Σχήμα Α'.117* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



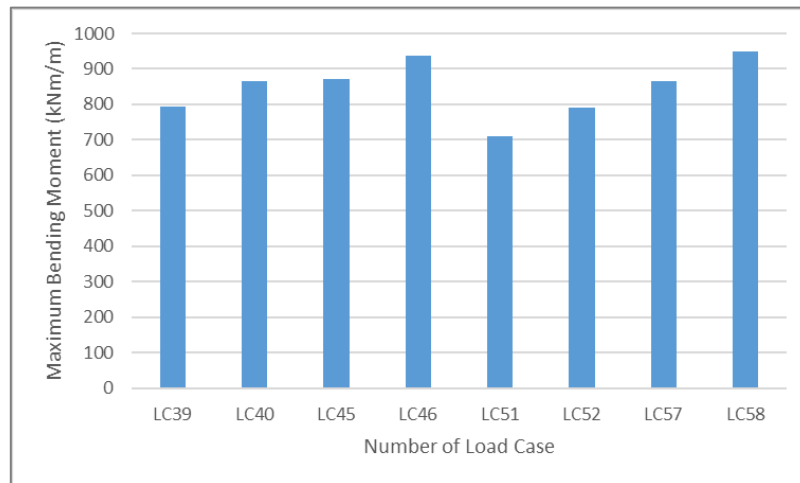
*Σχήμα Α'.118* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



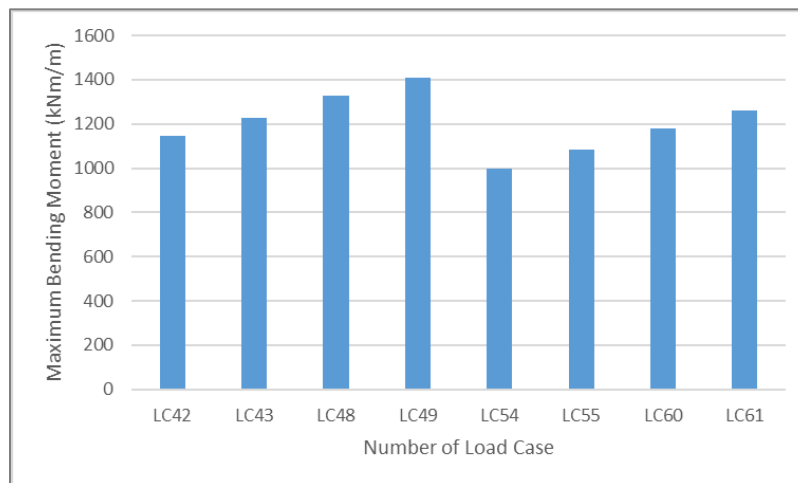
*Σχήμα Α'.119* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



*Σχήμα Α'.120* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τον αντίστοιχο βαθμό λειτουργίας για φόρτιση LC32 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

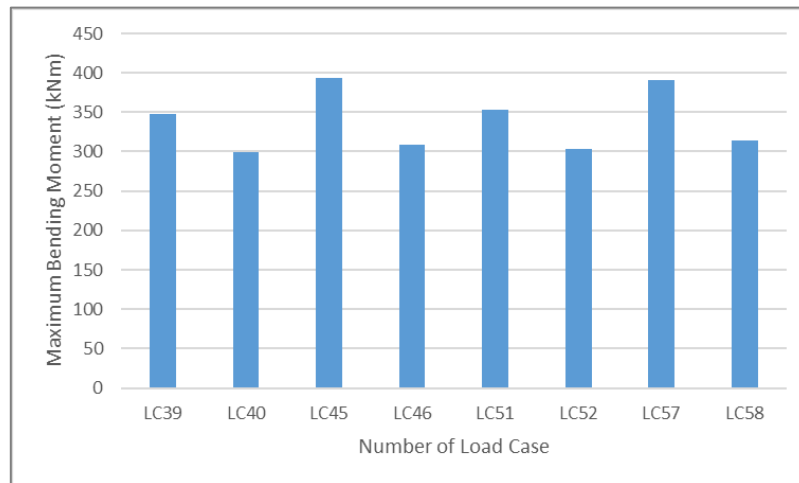


*Σχήμα Α'.121* Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση κατά τις φορτίσεις τους χειμερινούς μήνες.

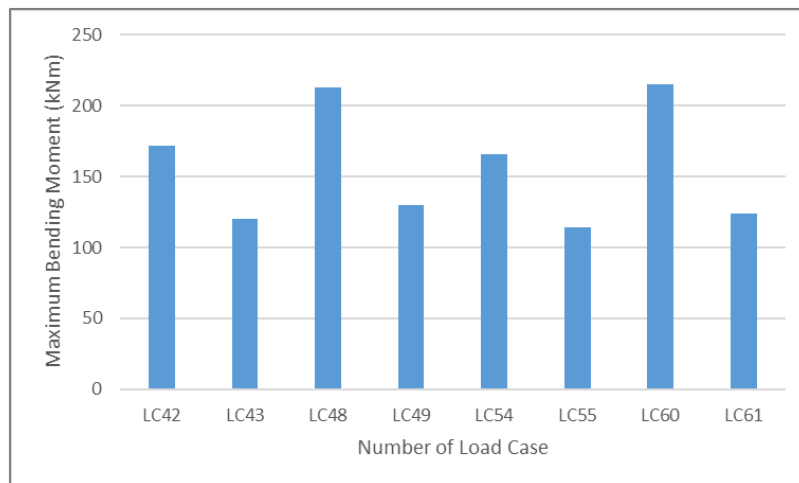


*Σχήμα Α'.122* Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση κατά τις φορτίσεις τους καλοκαιρινούς μήνες.

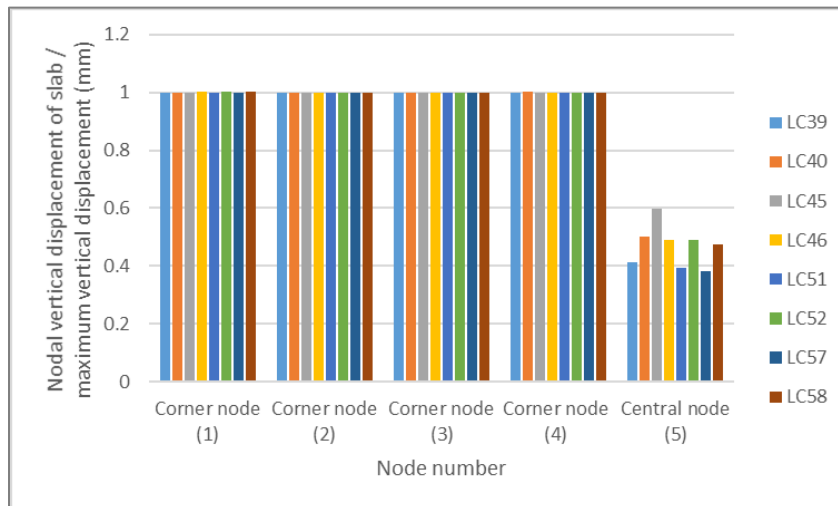




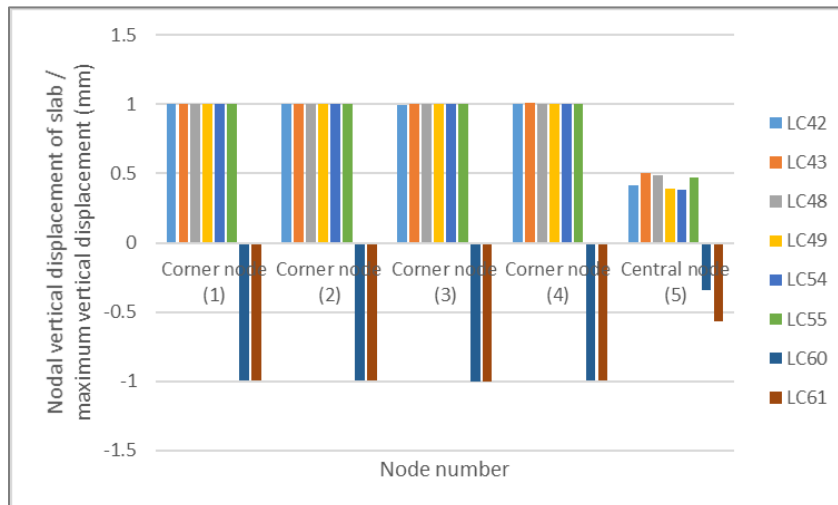
**Σχήμα Α'.123** Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής πασσάλων κατά τις φορτίσεις τους χειμερινούς μήνες.



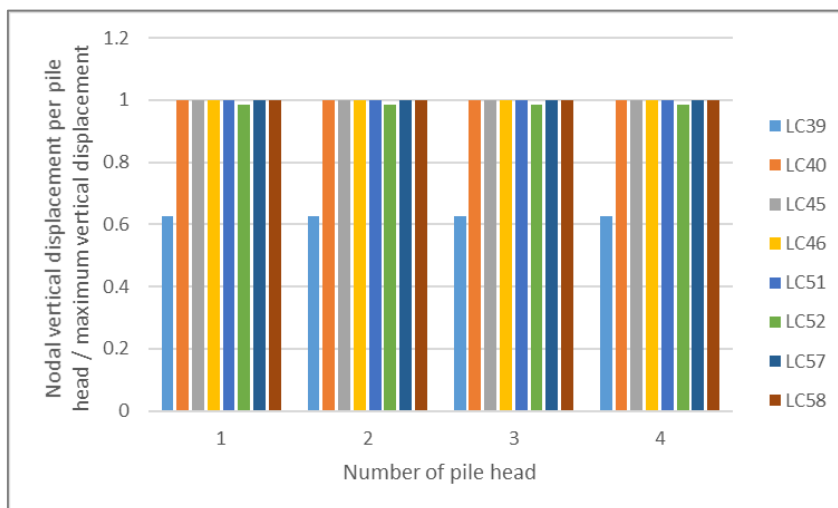
**Σχήμα Α'.124** Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής πασσάλων κατά τις φορτίσεις τους καλοκαιρινούς μήνες.



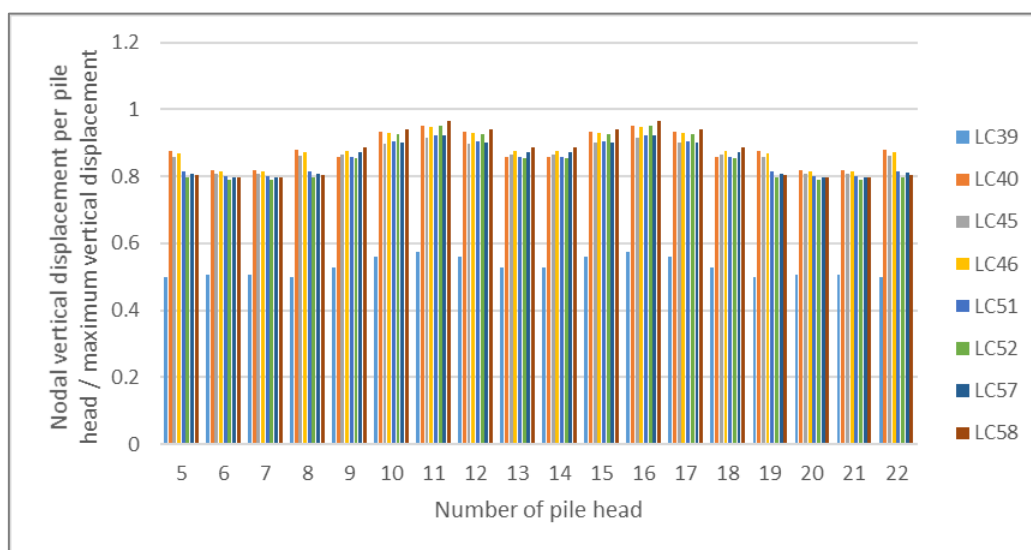
**Σχήμα Α'.125** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.



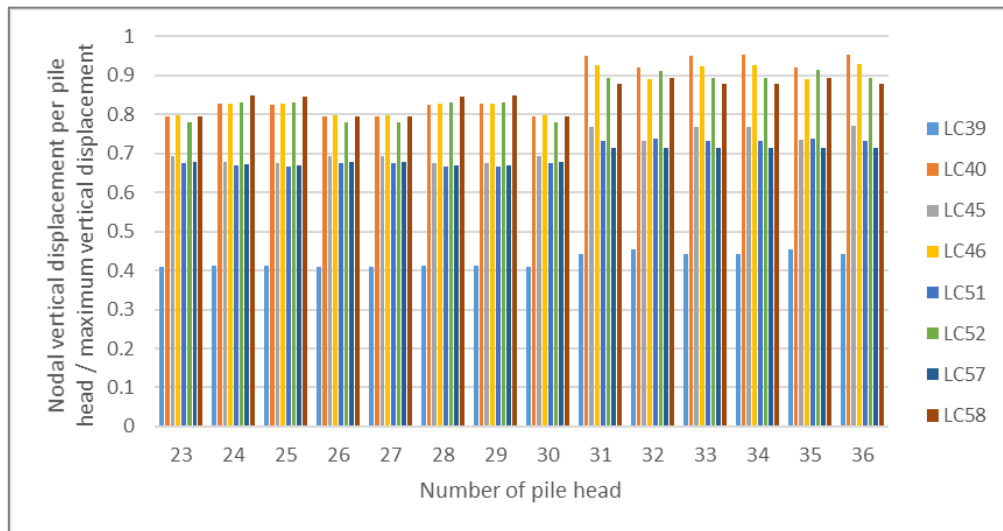
**Σχήμα Α'.126** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών και του κεντρικού κόμβου της κοιτόστρωσης για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



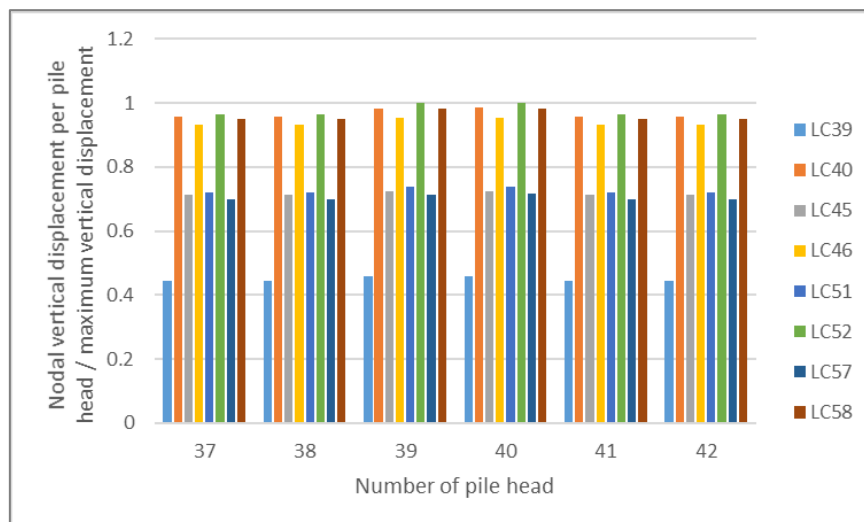
**Σχήμα Α'.127** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.



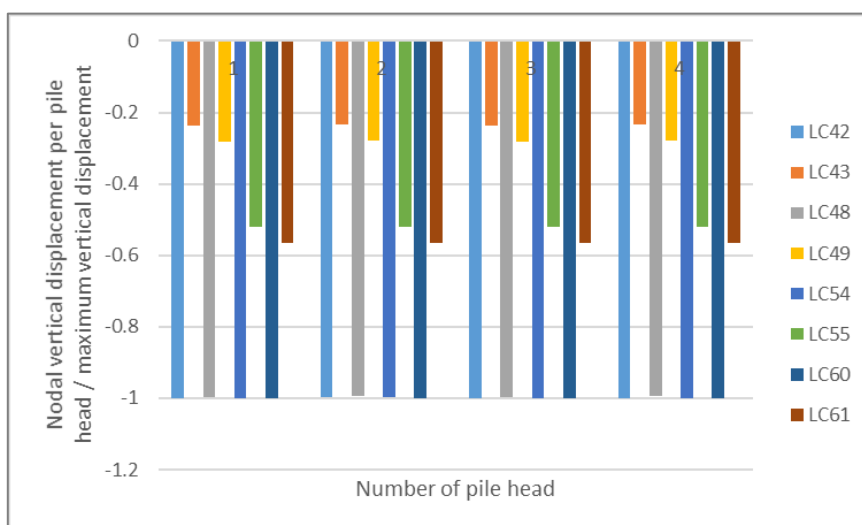
**Σχήμα Α'.128** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των εξωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.



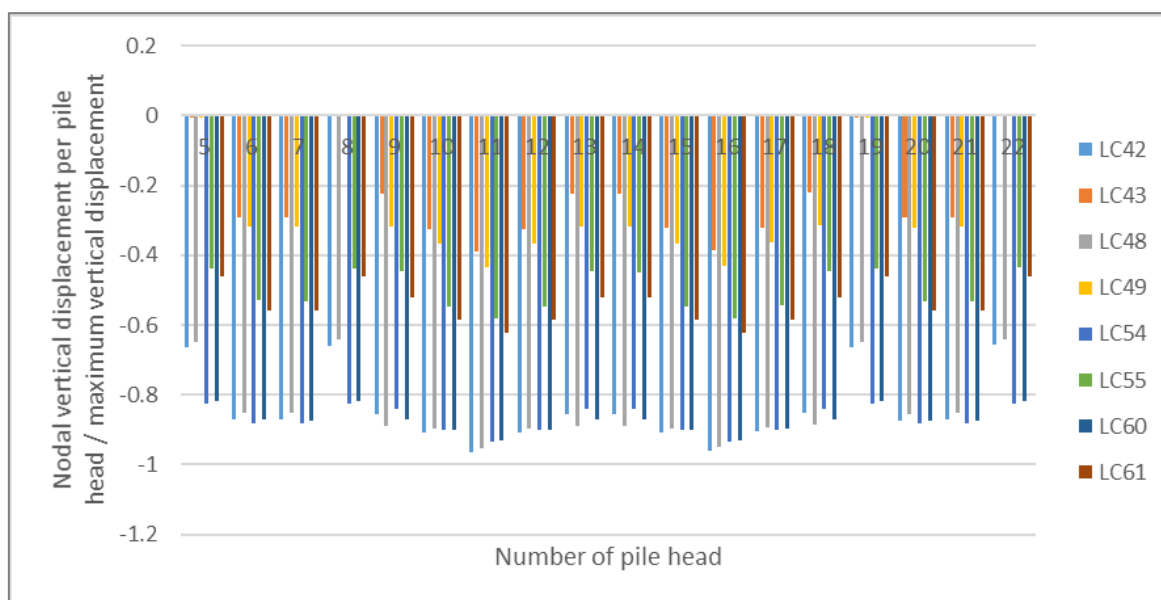
**Σχήμα Α'.129** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των ενδιάμεσων πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.



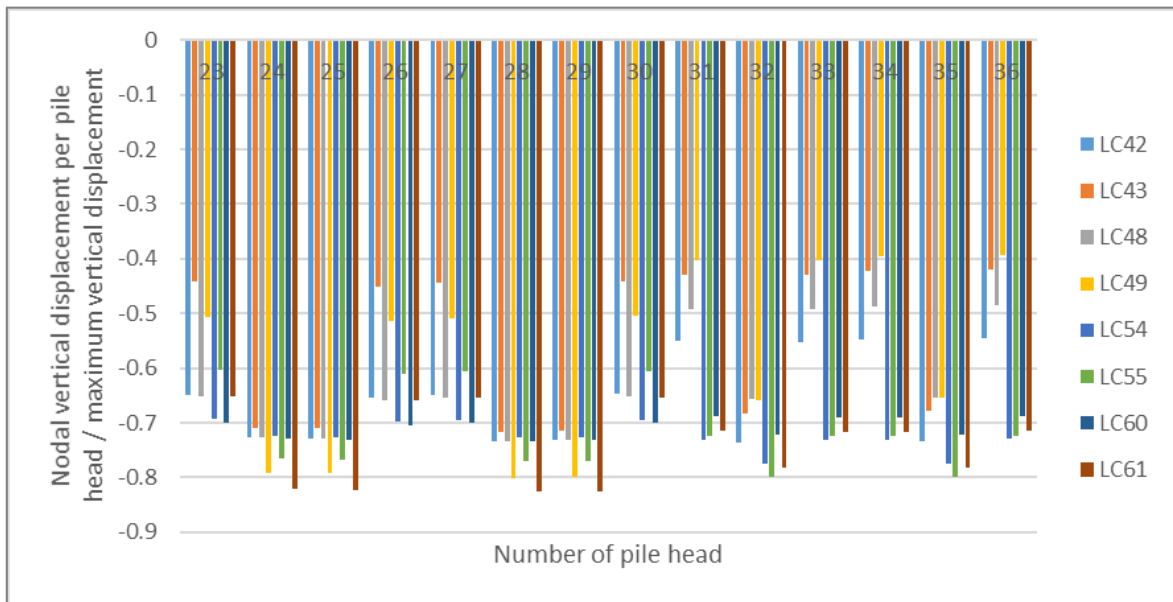
**Σχήμα Α'.130** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των εσωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.



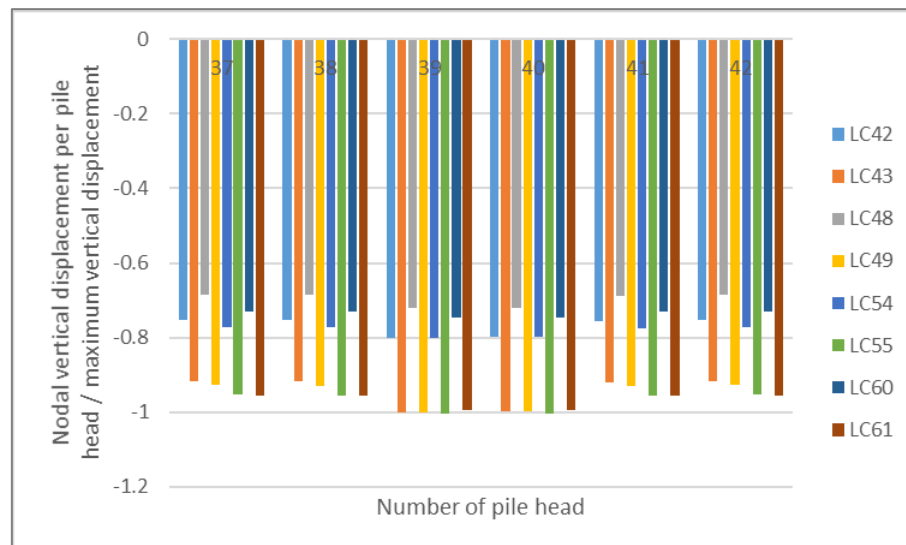
**Σχήμα Α'.131** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των γωνιακών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



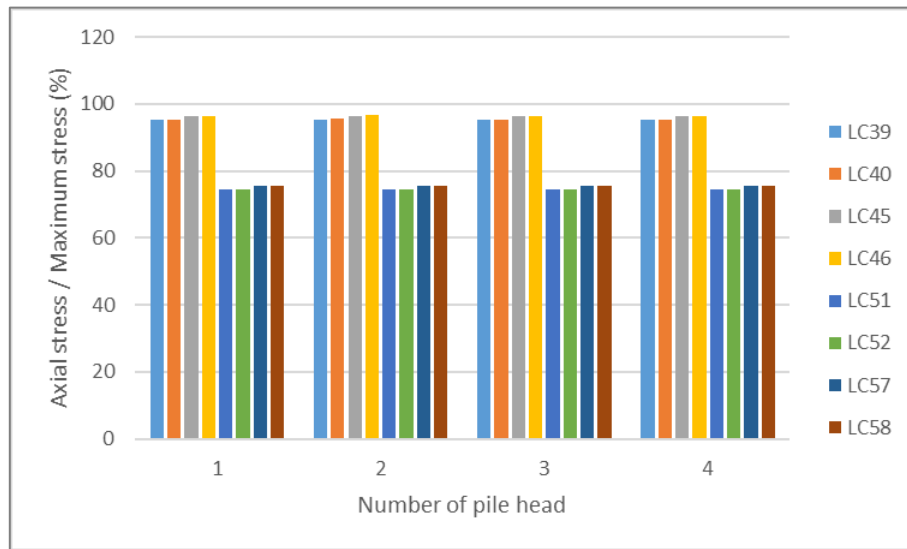
**Σχήμα Α'.132** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των εξωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



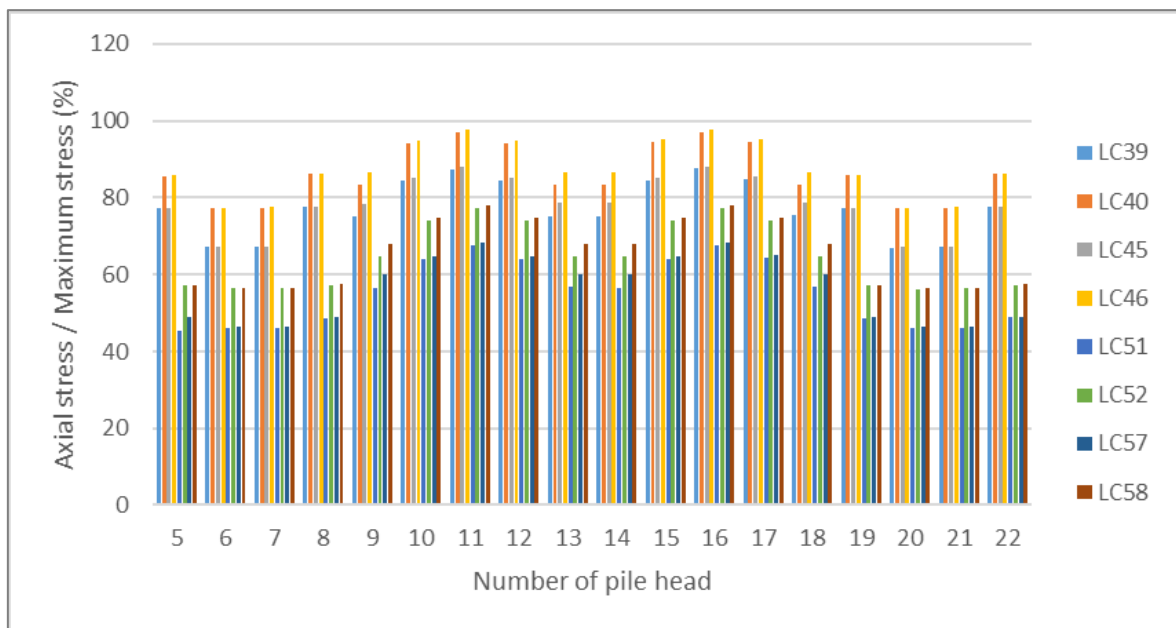
**Σχήμα Α'.133** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των ενδιάμεσων πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



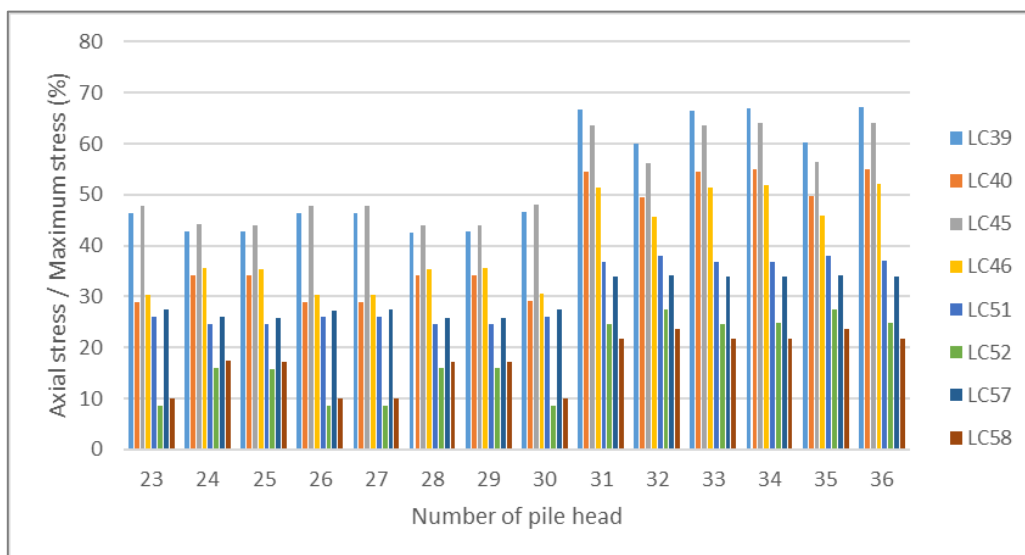
**Σχήμα Α'.134** Κανονικοποιημένο διάγραμμα επικόμβιας κατακόρυφης μετατόπισης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (mm) των εσωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



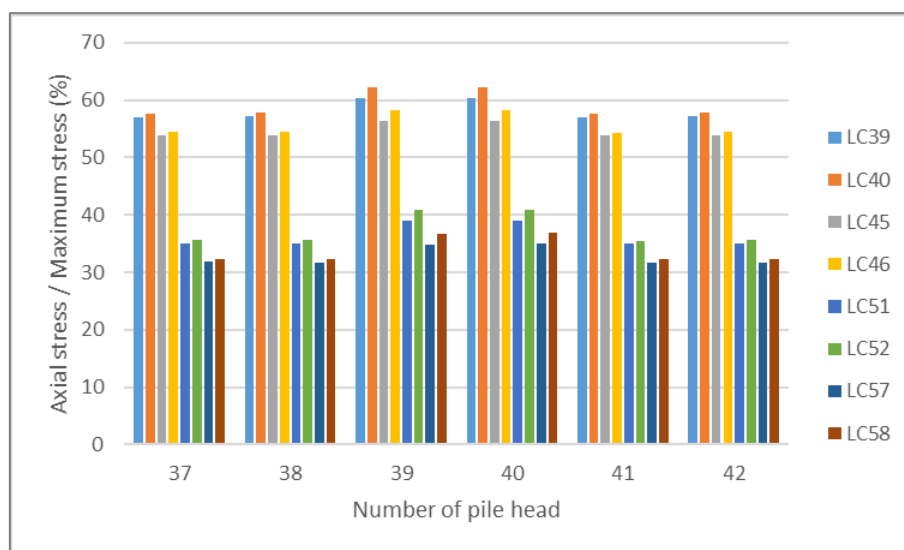
**Σχήμα Α'.135** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) γωνιακών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.



**Σχήμα Α'.136** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) εξωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.

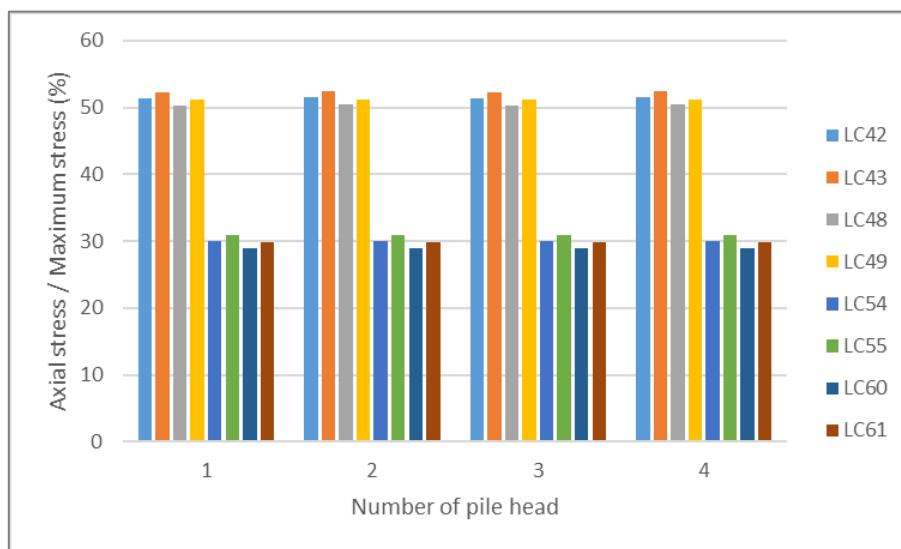


**Σχήμα Α'.137** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) ενδιάμεσων πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.

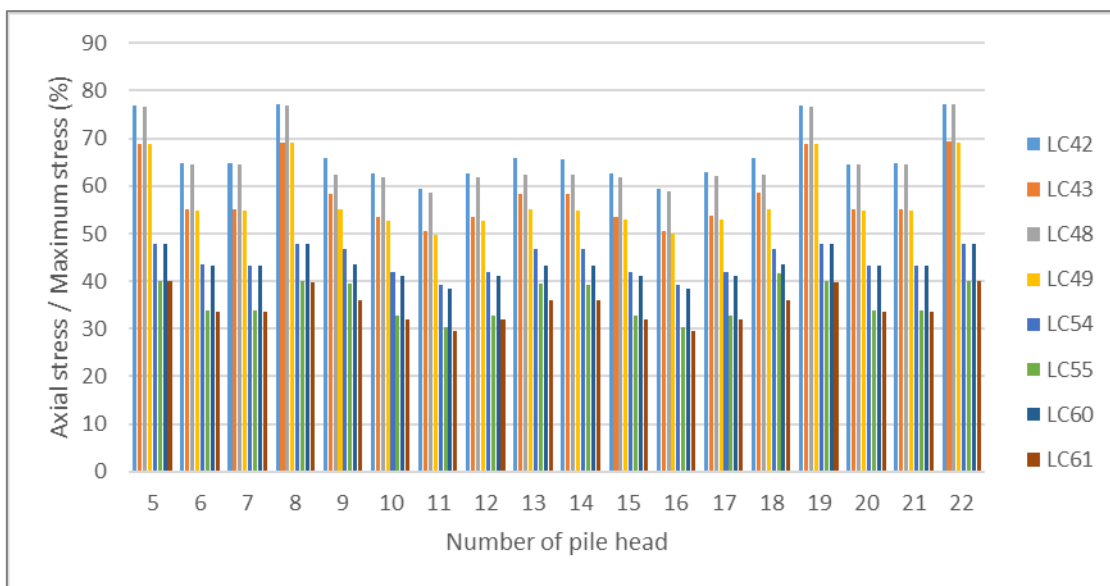


**Σχήμα Α'.138** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) εσωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους χειμερινούς μήνες.

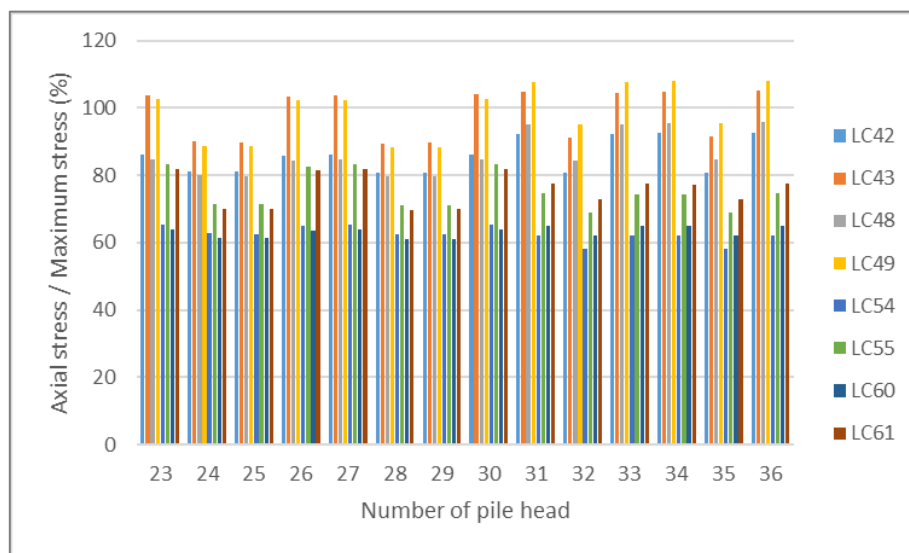




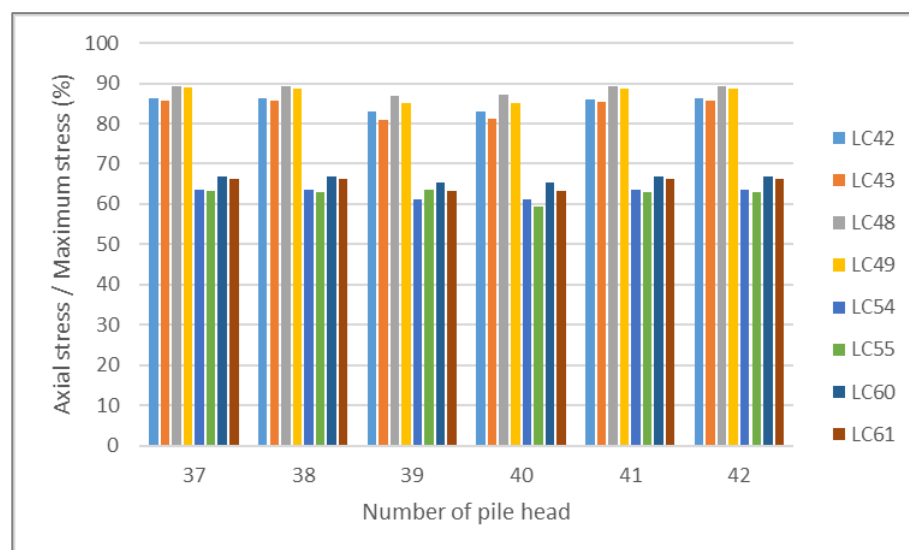
**Σχήμα Α'.139** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) γωνιακών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



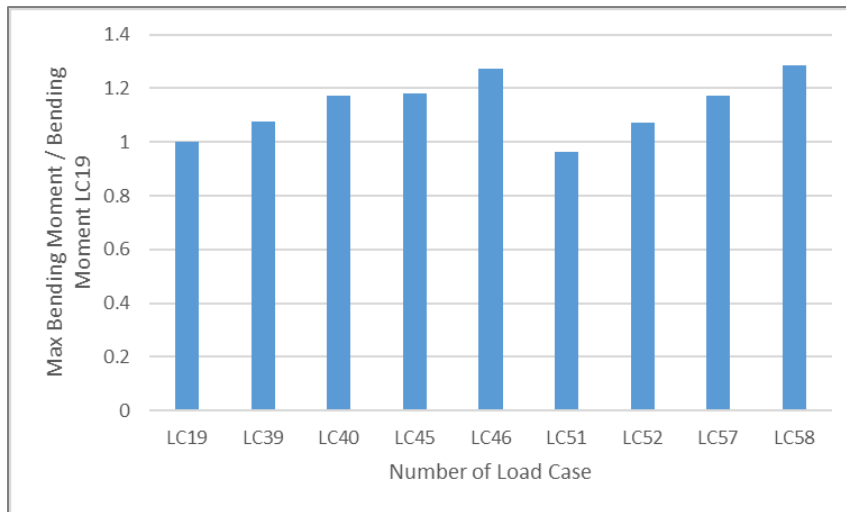
**Σχήμα Α'.140** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) εξωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



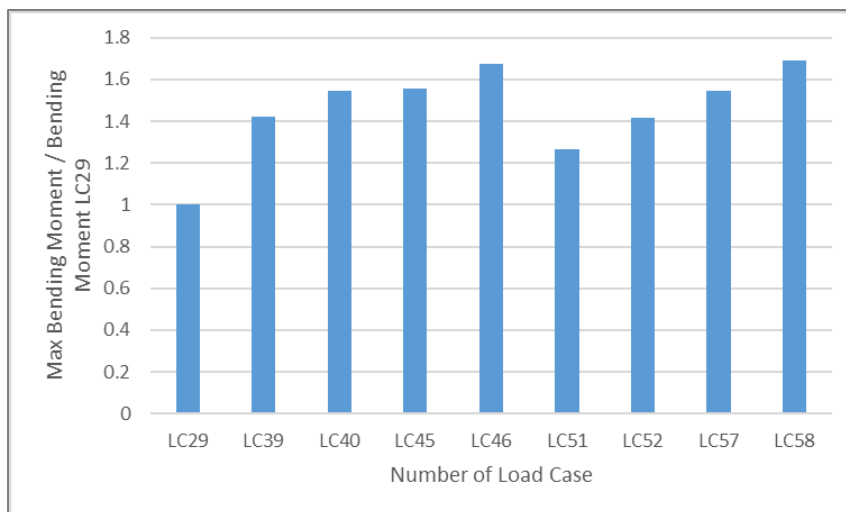
**Σχήμα Α'.141** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) ενδιάμεσων πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



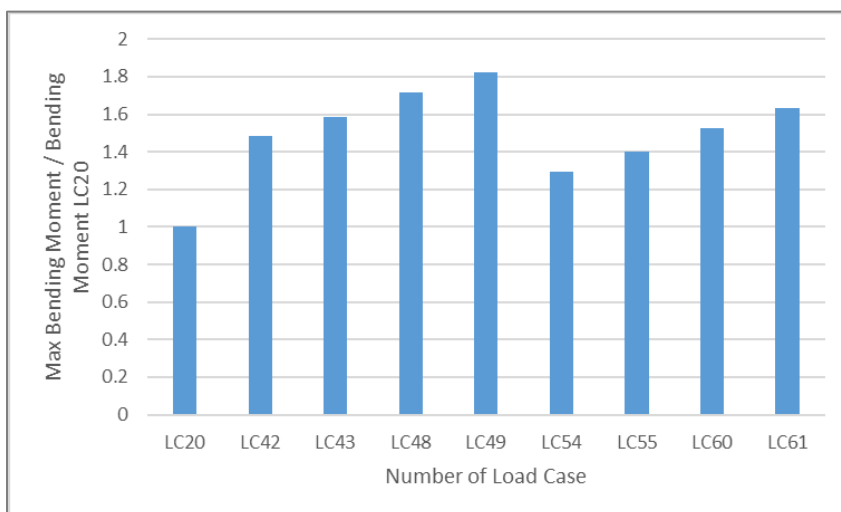
**Σχήμα Α'.142** Κανονικοποιημένο διάγραμμα βαθμού λειτουργίας (%) εσωτερικών πασσάλων για τις φορτίσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



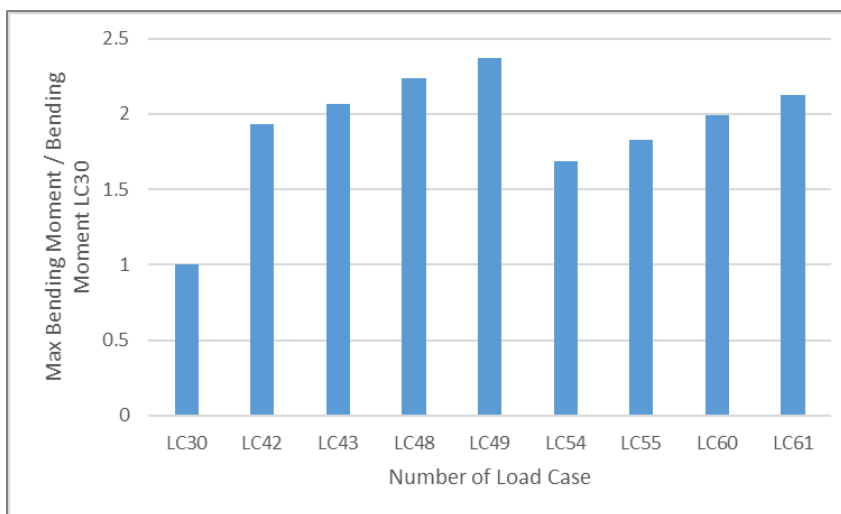
**Σχήμα Α'.143** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



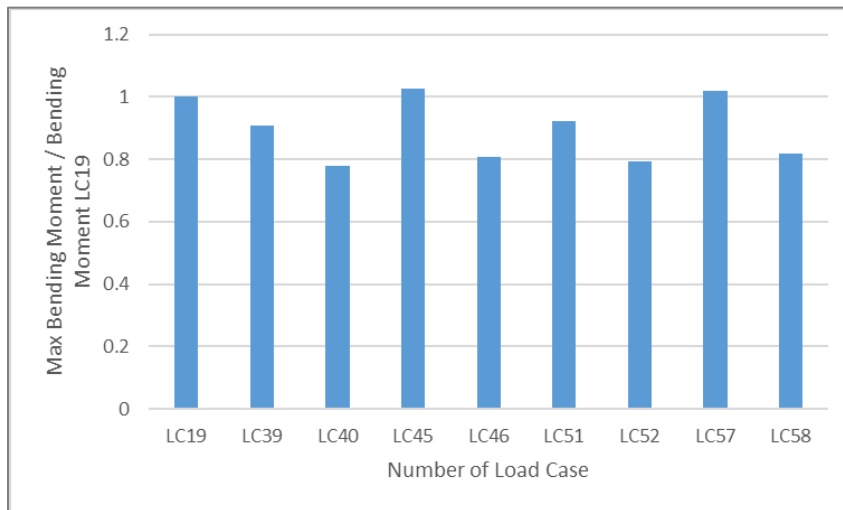
**Σχήμα Α'.144** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC21 κατά τους χειμερινούς μήνες.



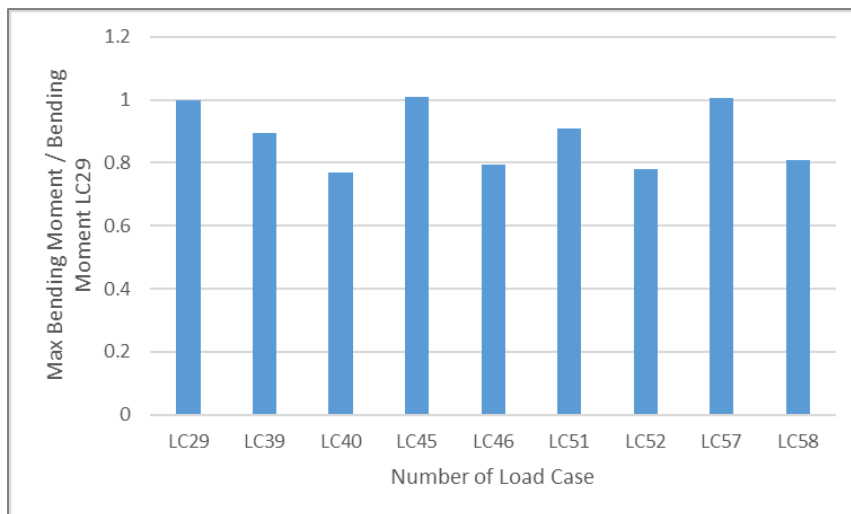
**Σχήμα Α'.145** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC20 κατά τους χειμερινούς μήνες.



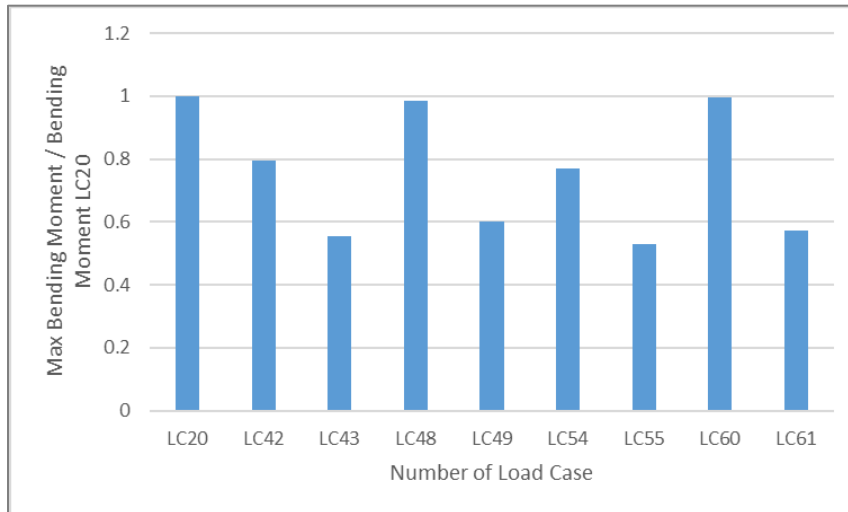
**Σχήμα Α'.146** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στην κοιτόστρωση προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



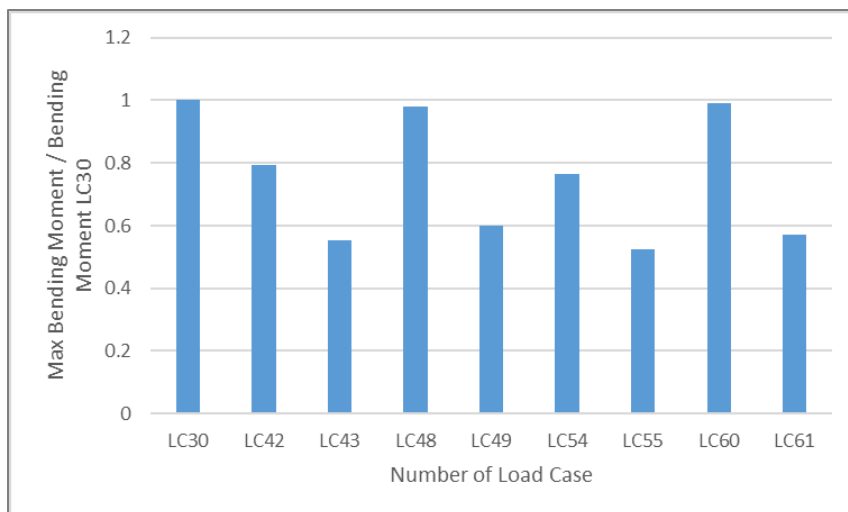
*Σχήμα Α'.147* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



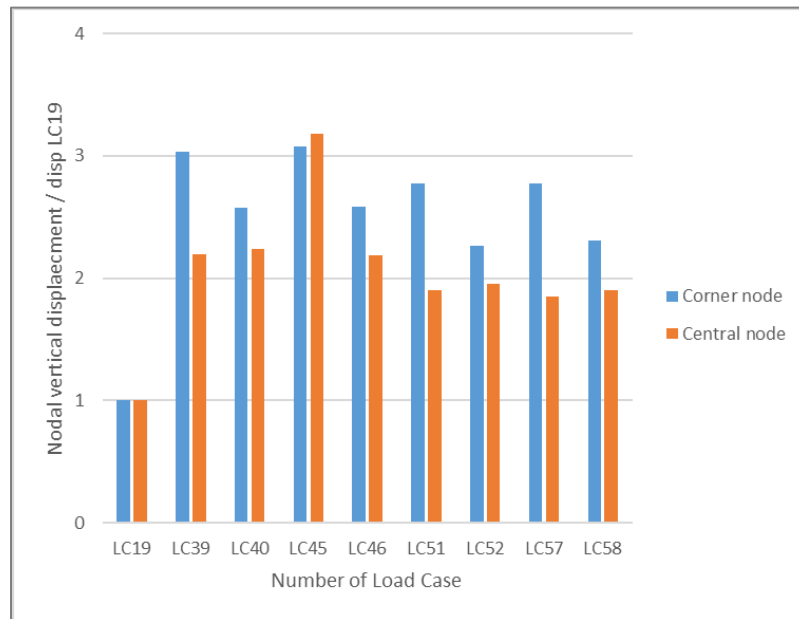
*Σχήμα Α'.148* Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



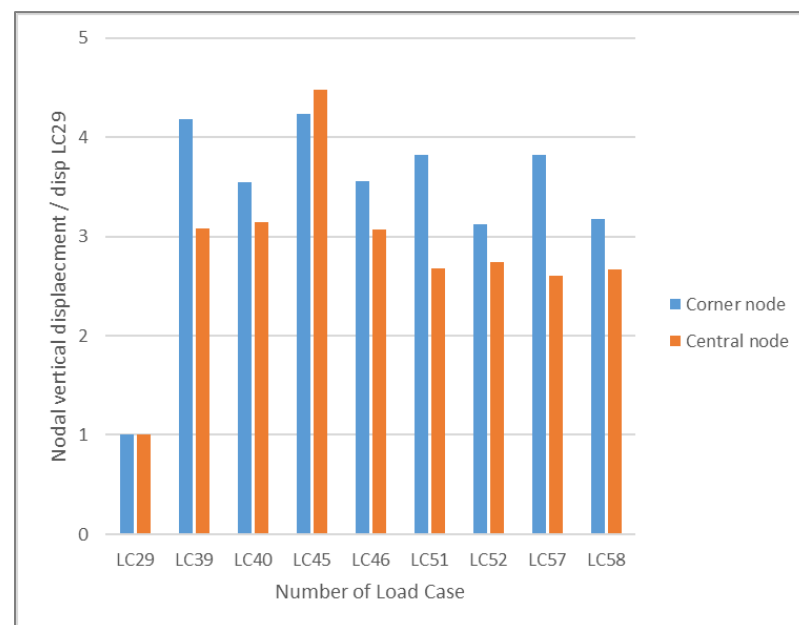
**Σχήμα Α'.149** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



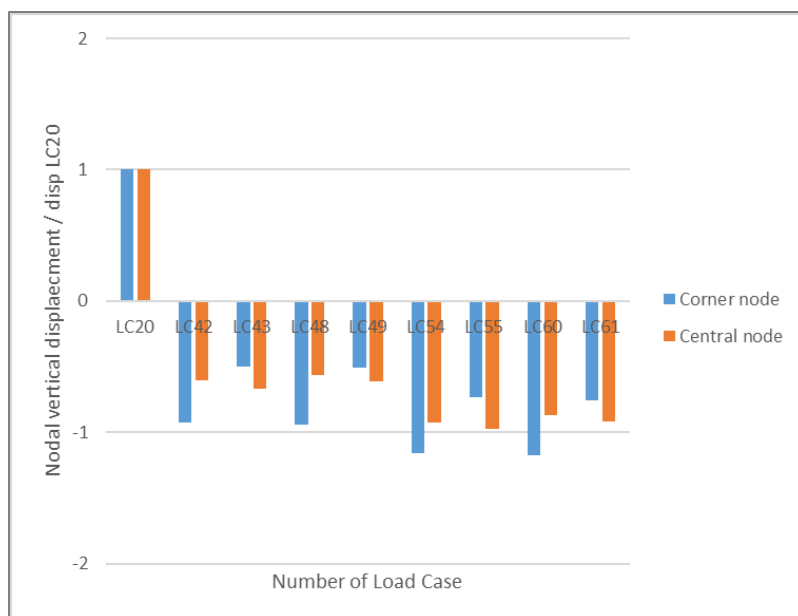
**Σχήμα Α'.150** Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης καμπτικής ροπής στους πασσάλους προς τη μέγιστη καμπτική ροπή της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



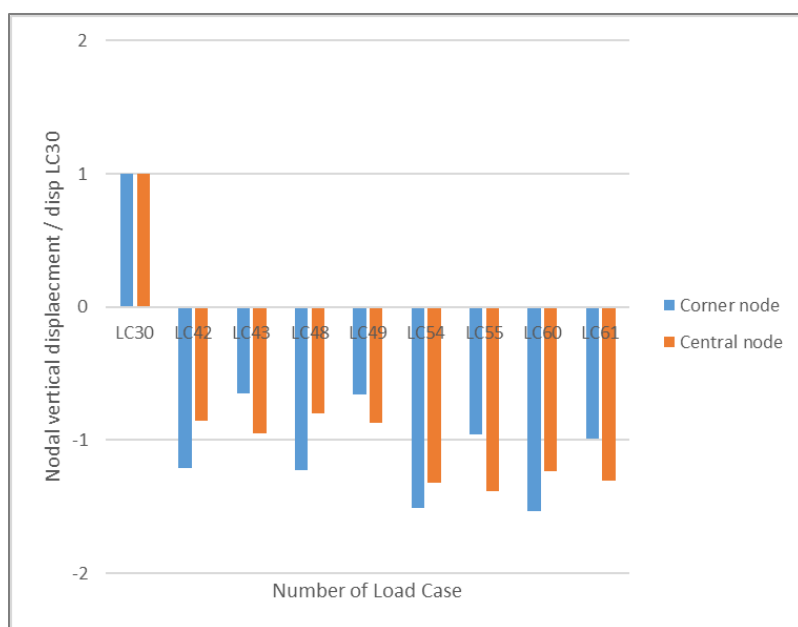
**Σχήμα Α'.151** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



**Σχήμα Α'.152** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.

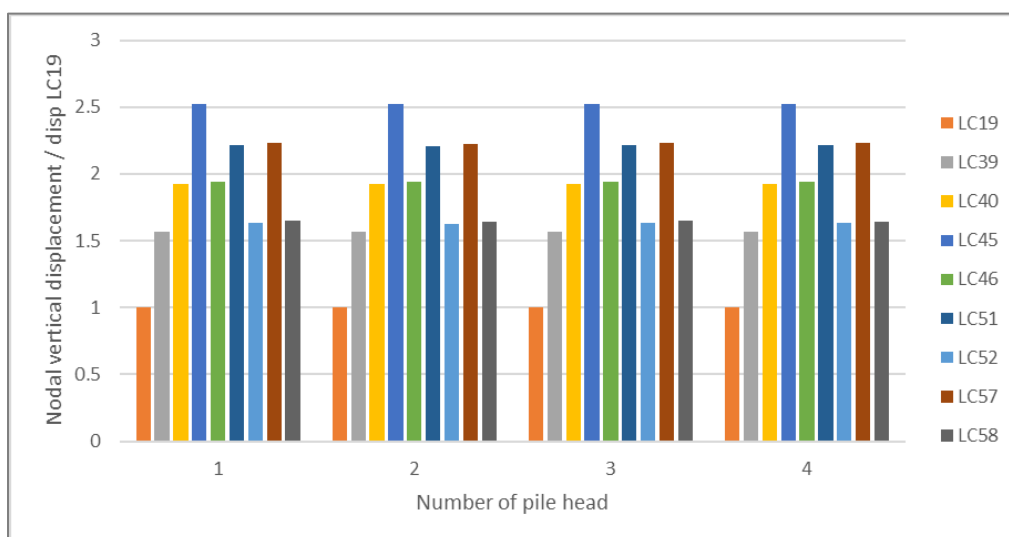


**Σχήμα Α'.153** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

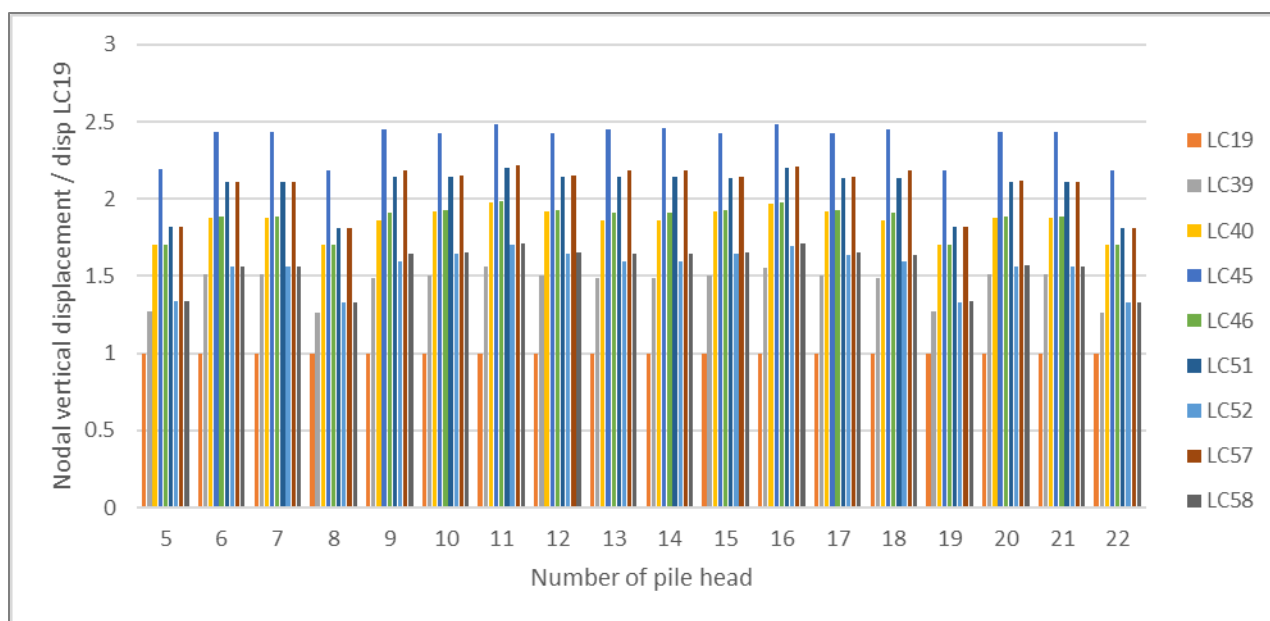


**Σχήμα Α'.154** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης γωνιακών και κεντρικού κόμβου κοιτόστρωσης προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

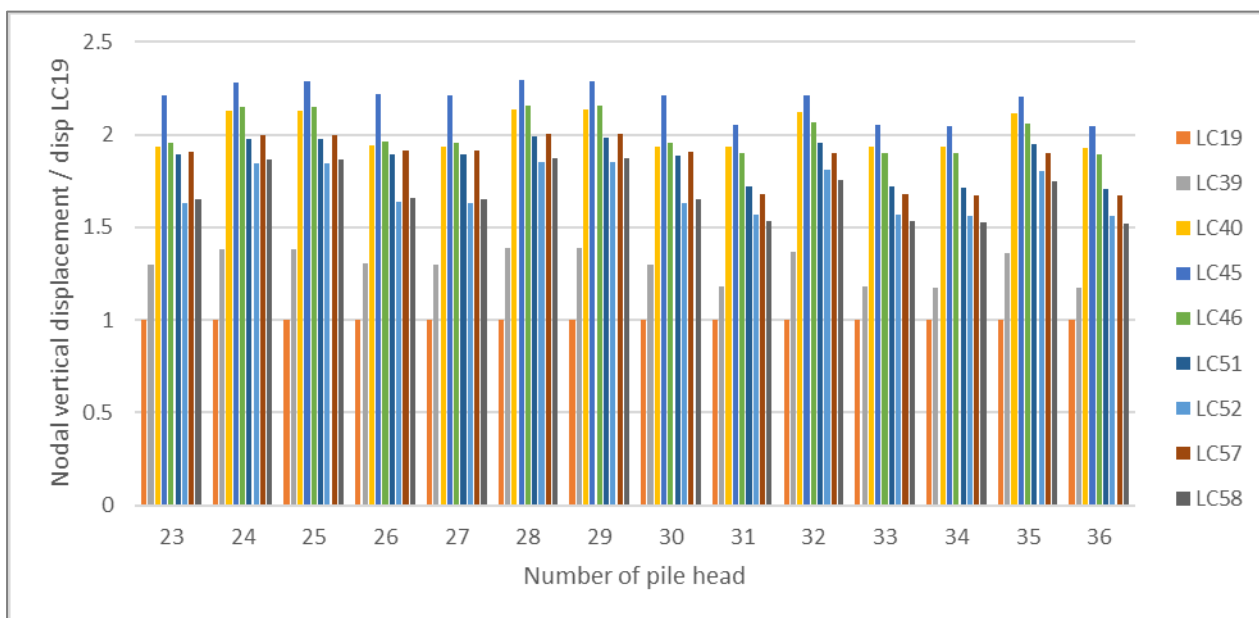




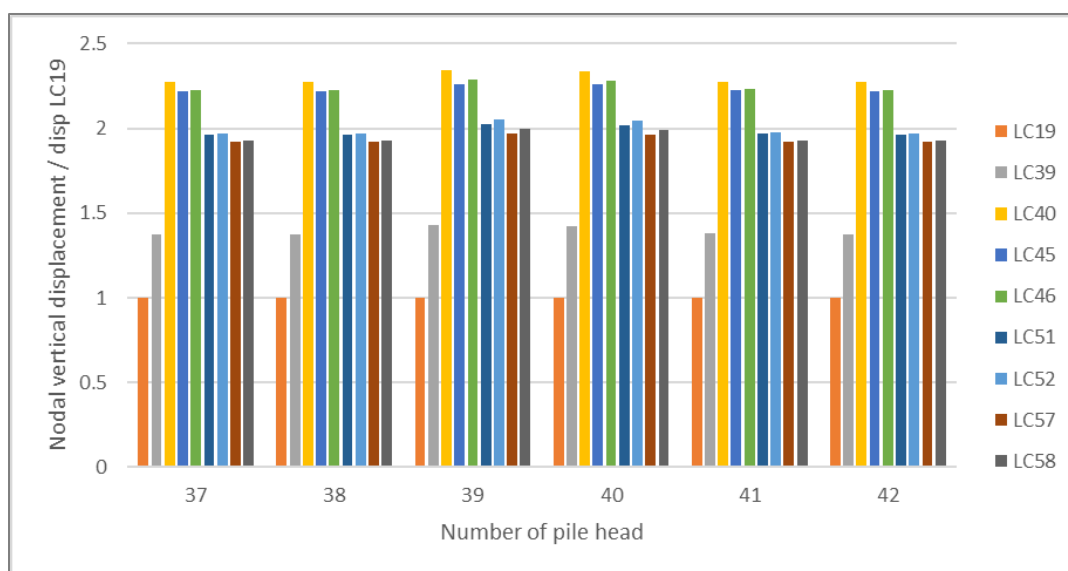
Σχήμα Α'.155 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



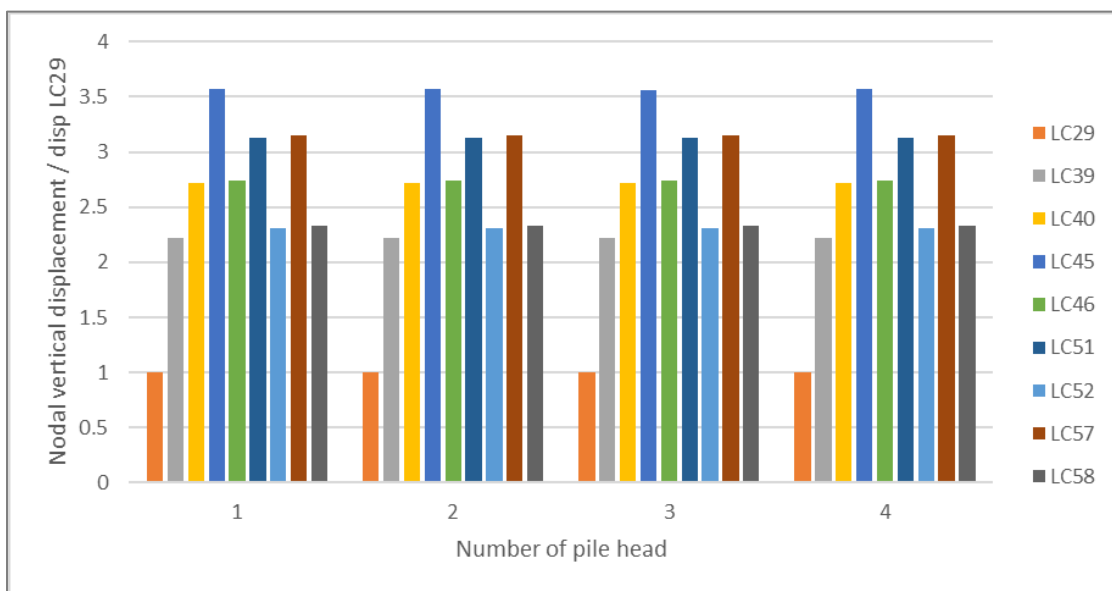
Σχήμα Α'.156 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



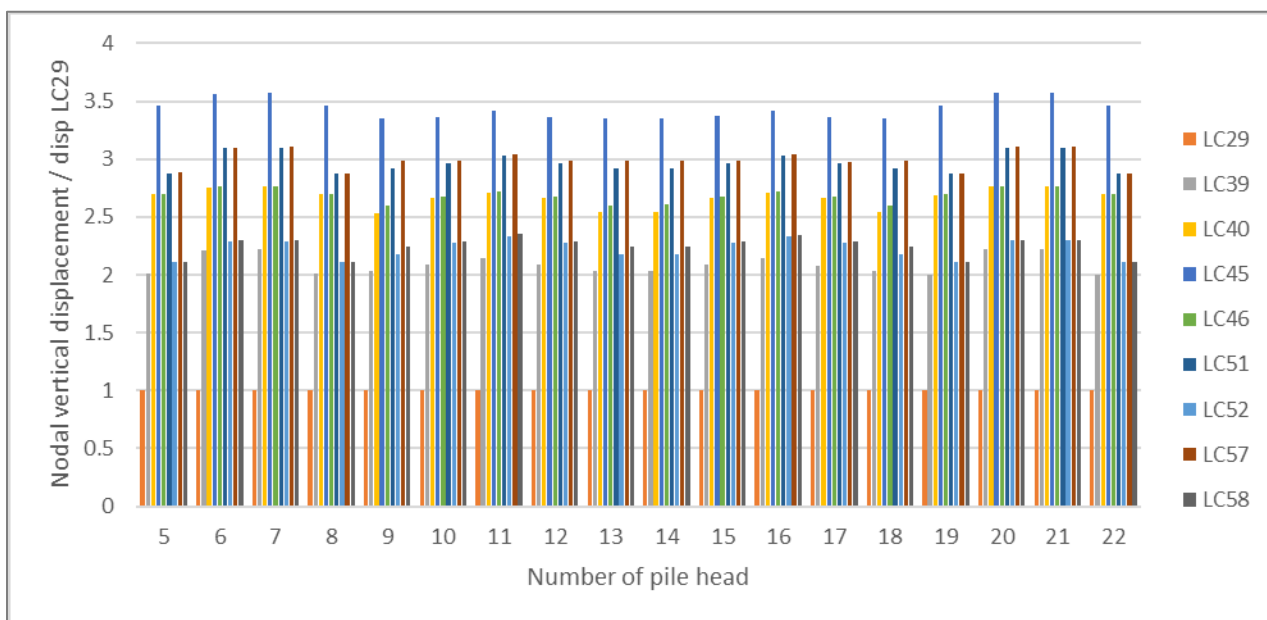
*Σχήμα Α'.157* Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



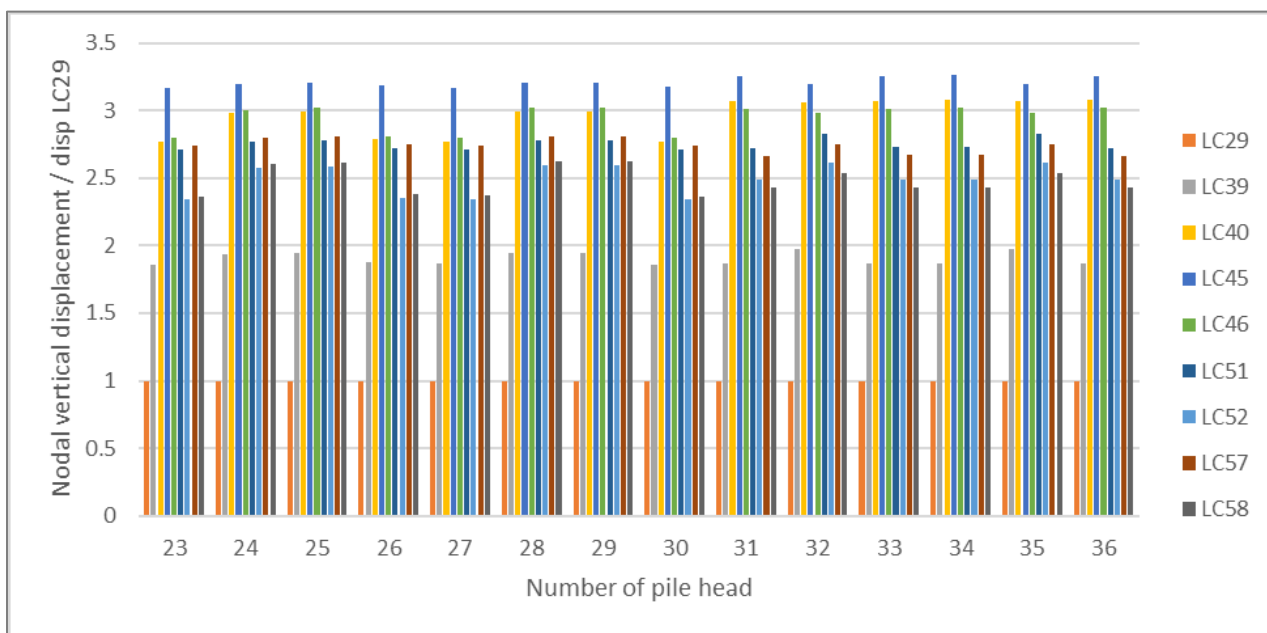
*Σχήμα Α'.158* Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



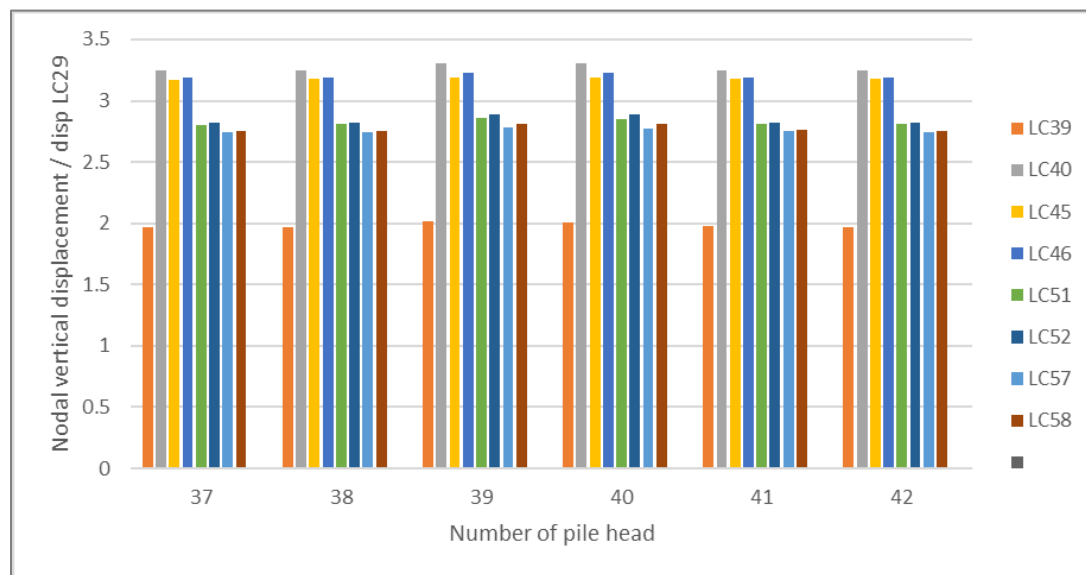
**Σχήμα Α'.159** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



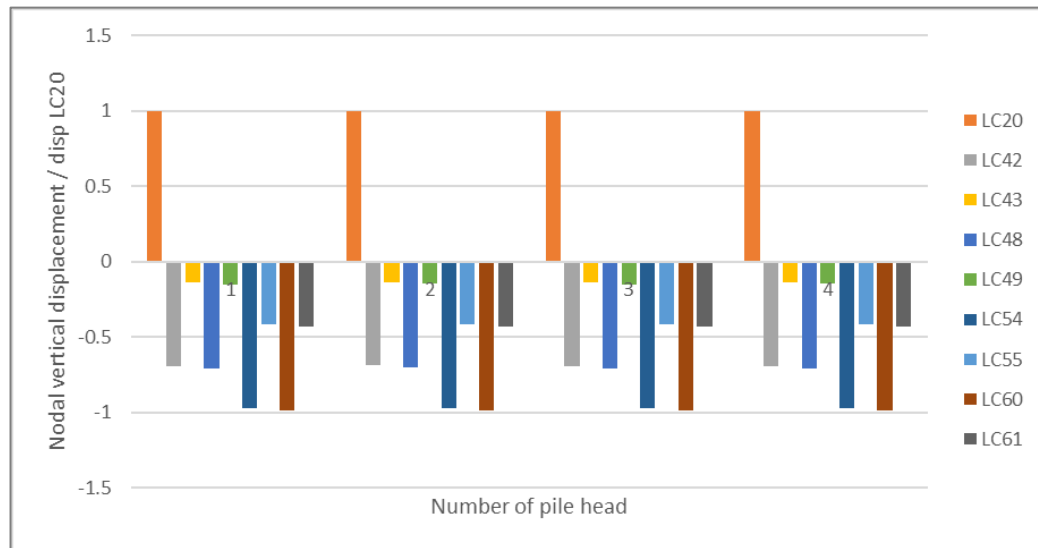
**Σχήμα Α'.160** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



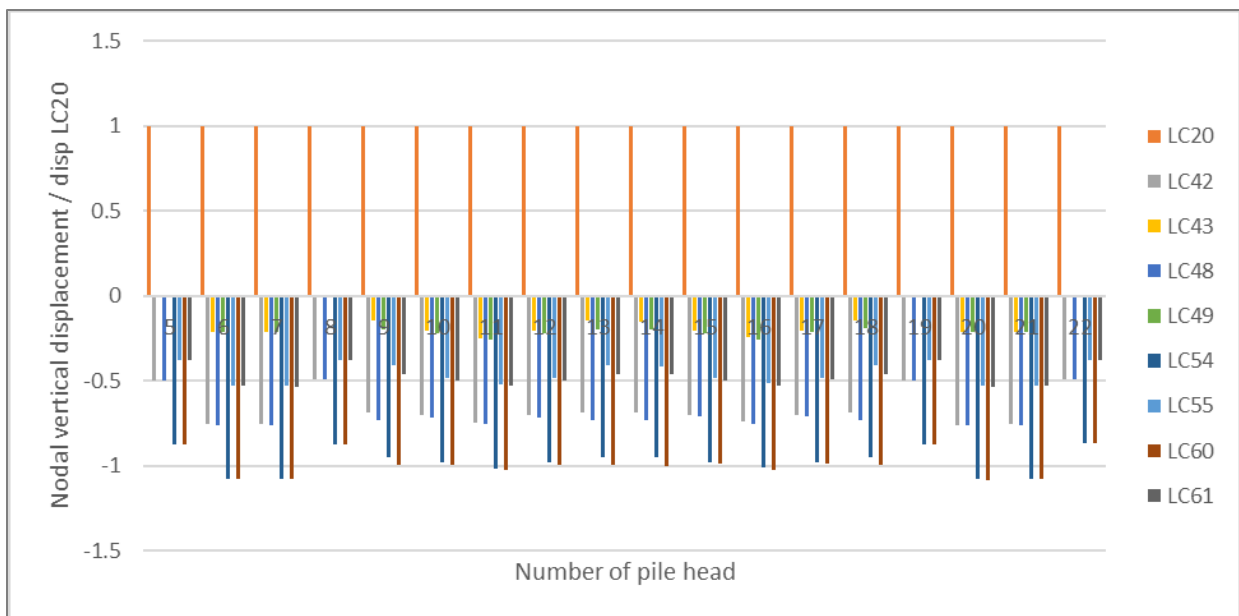
Σχήμα Α'.161 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



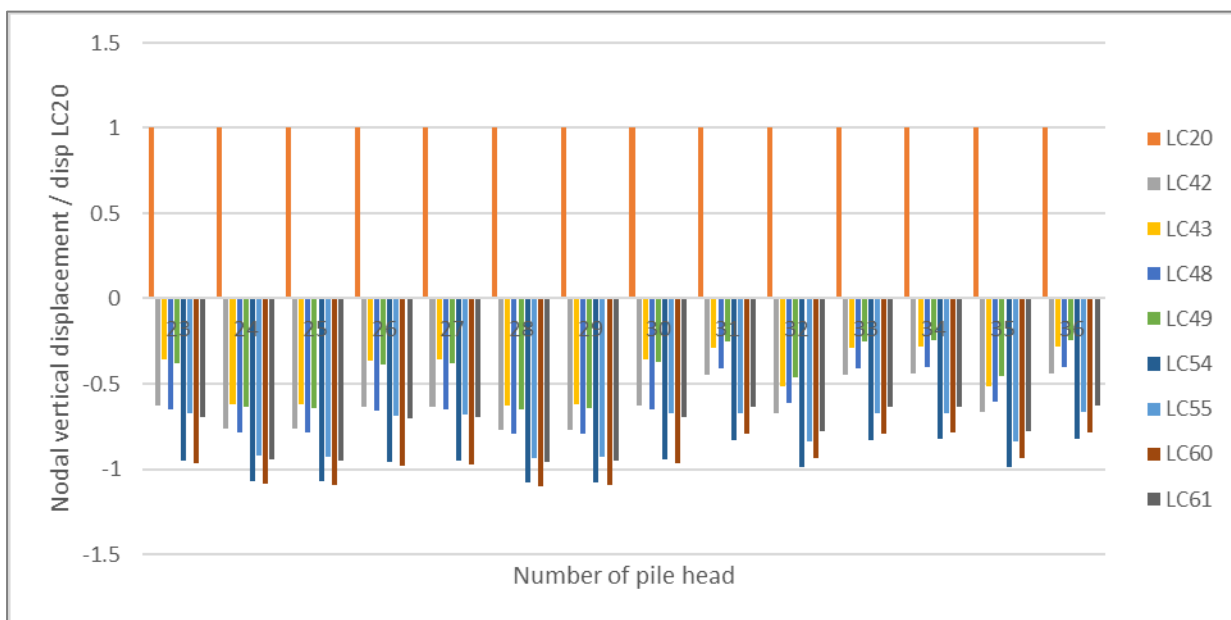
Σχήμα Α'.162 Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



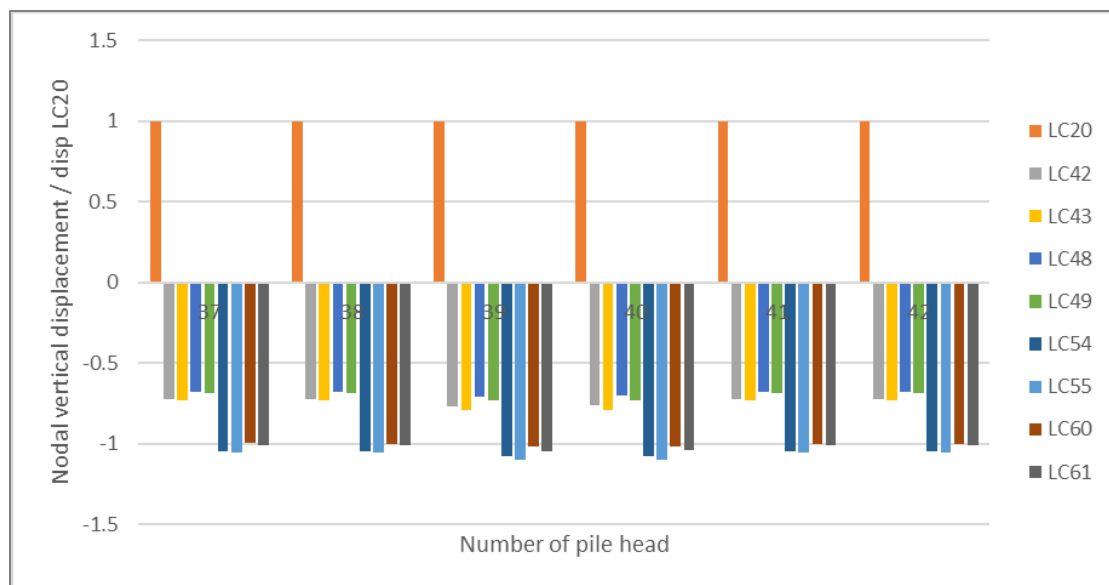
**Σχήμα Α'.163** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



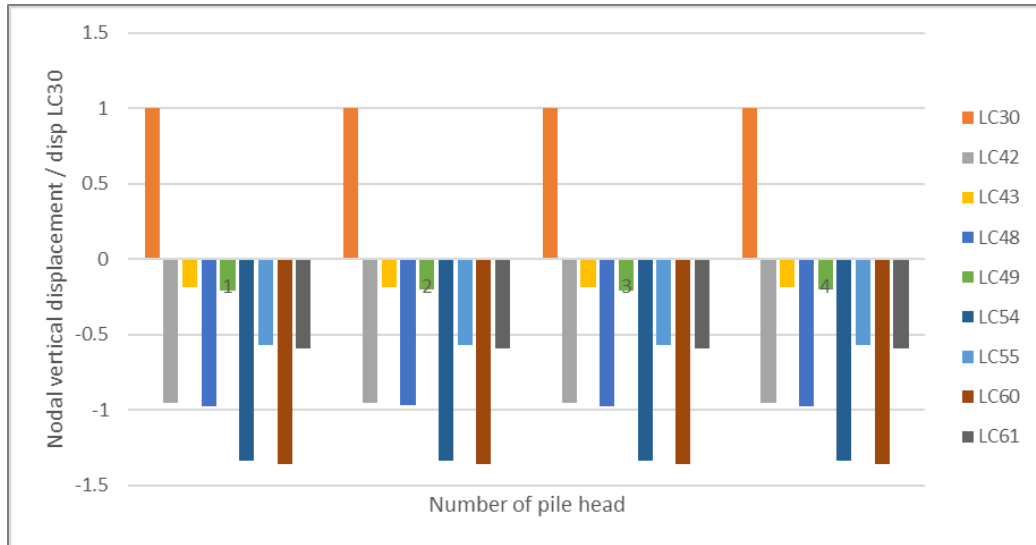
**Σχήμα Α'.164** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



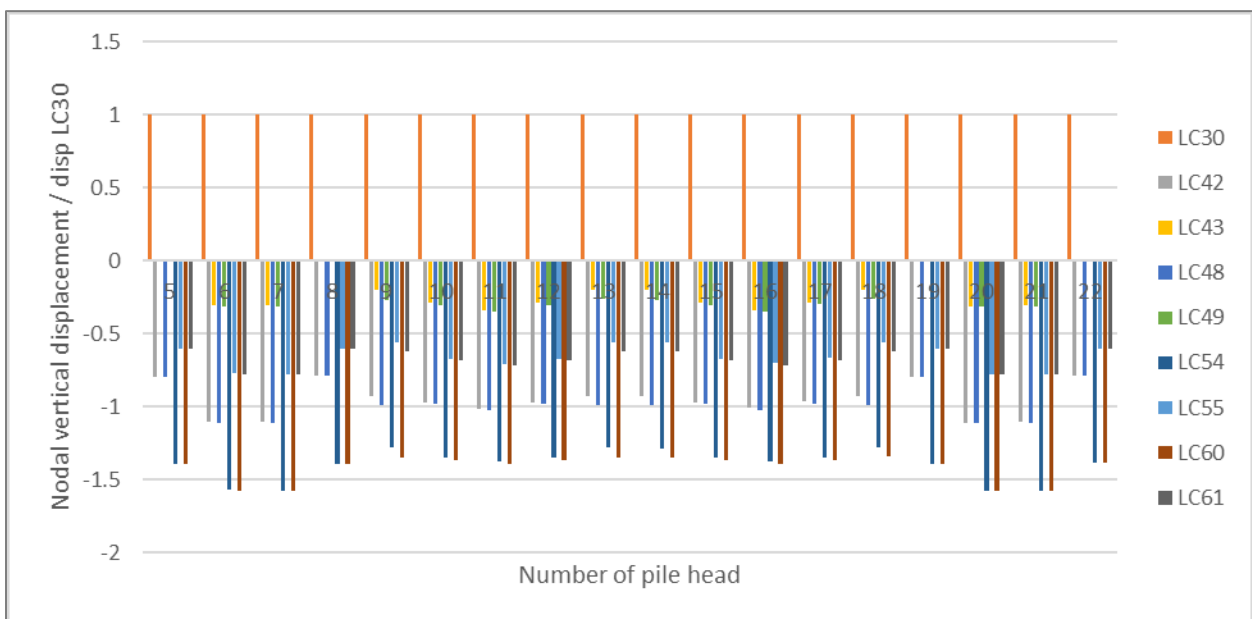
**Σχήμα Α'.165** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



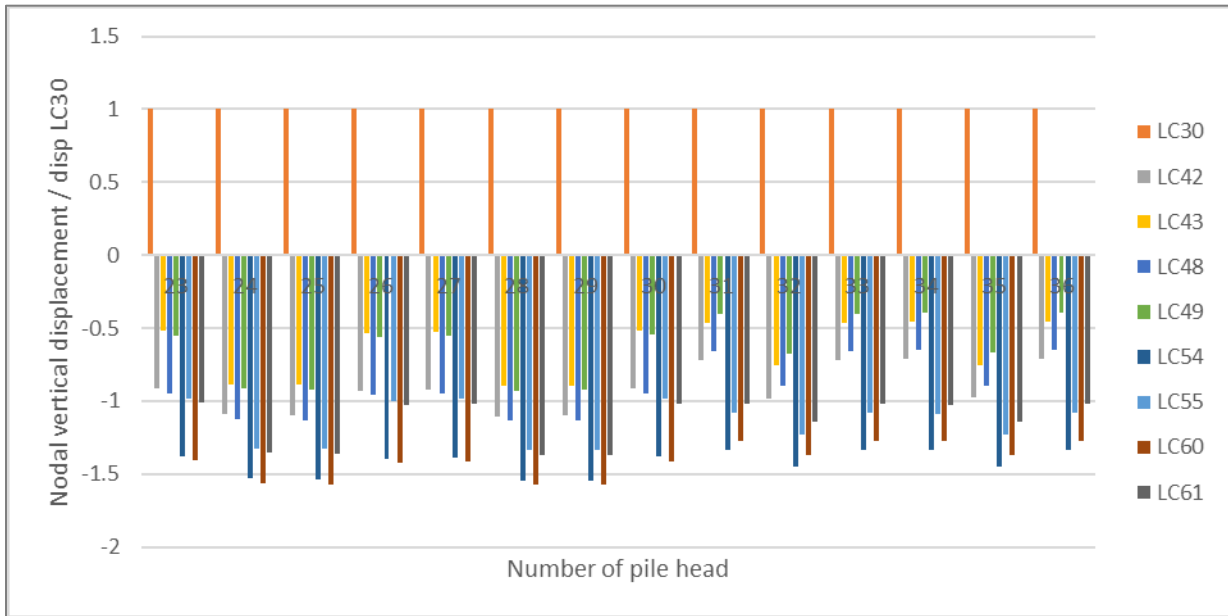
**Σχήμα Α'.166** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



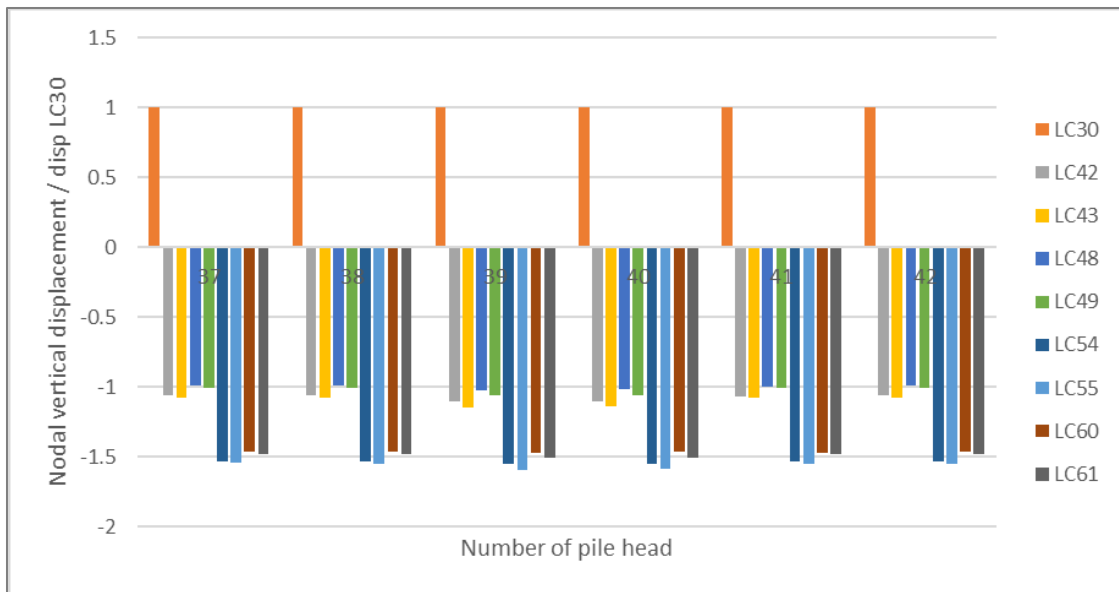
**Σχήμα Α'.163** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα Α'.164** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

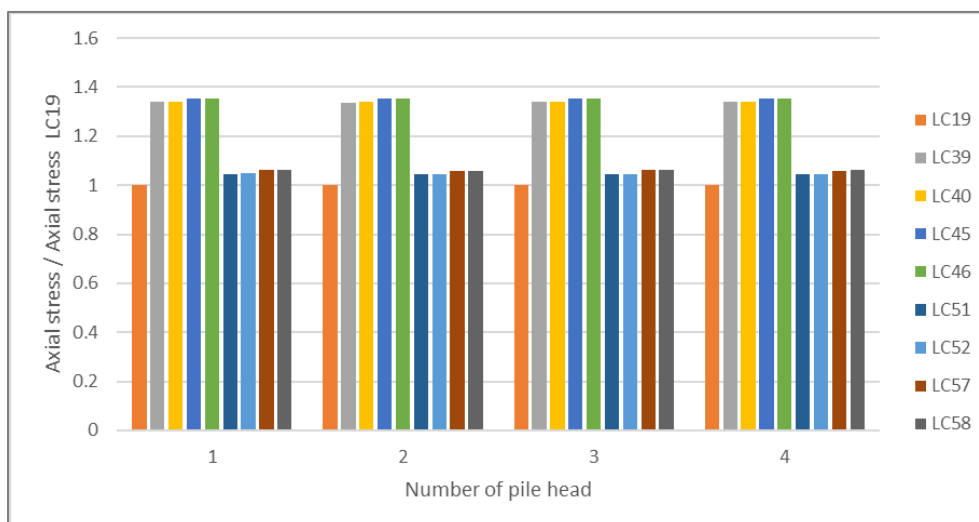


**Σχήμα Α'.165** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

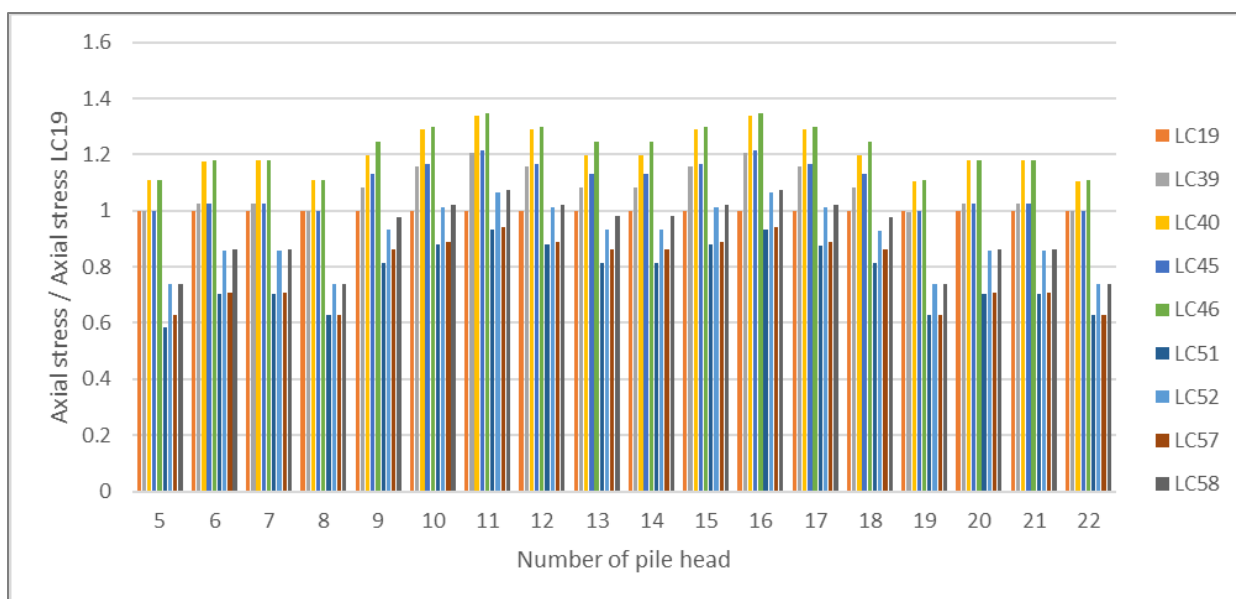


**Σχήμα Α'.166** Διάγραμμα σύγκρισης κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων κεφαλής εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

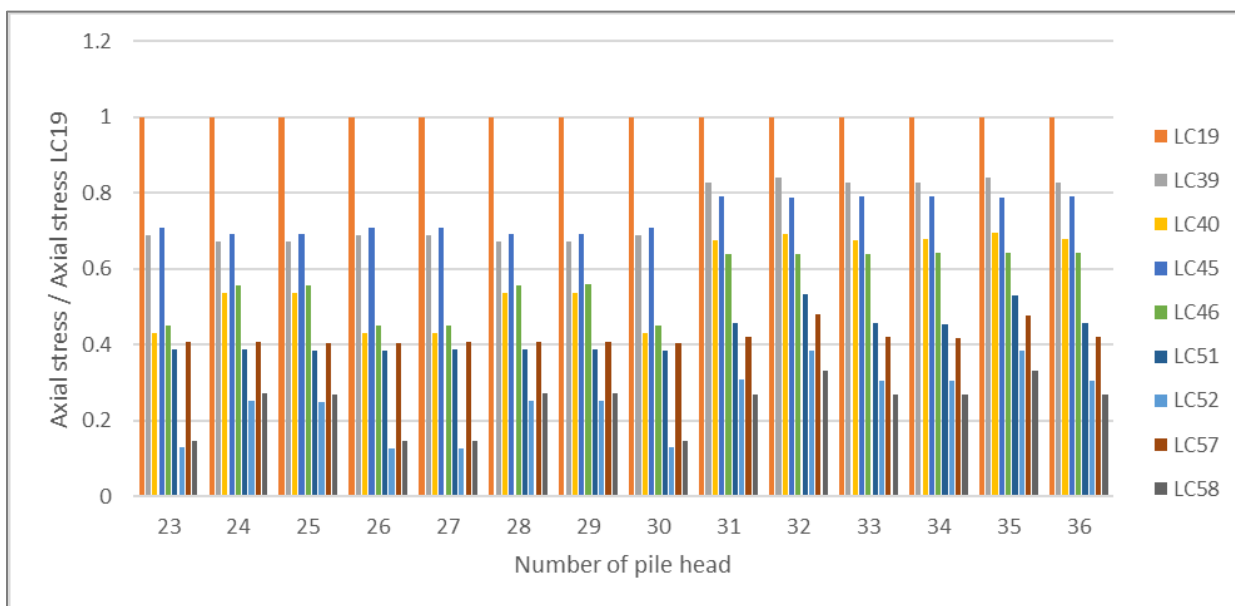




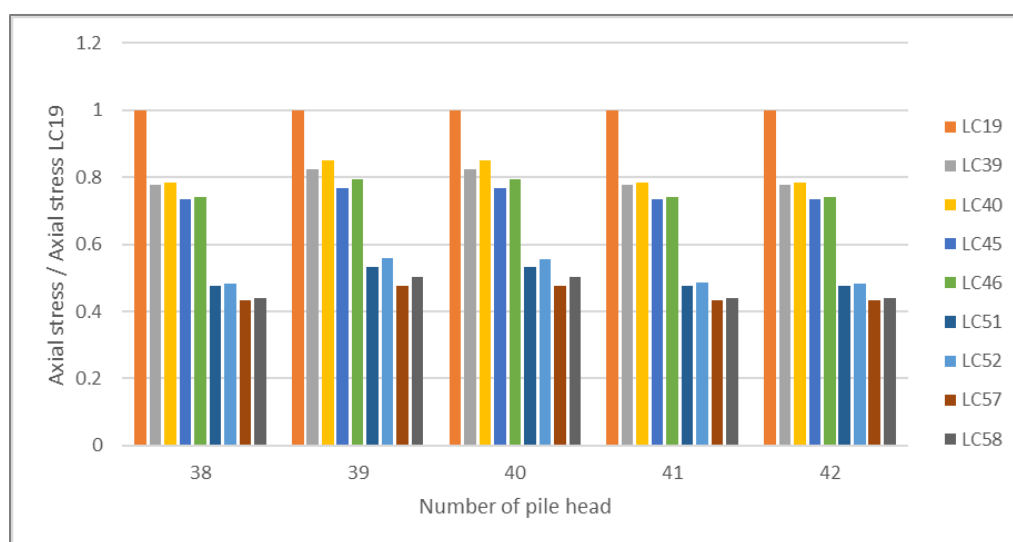
**Σχήμα Α'.167** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



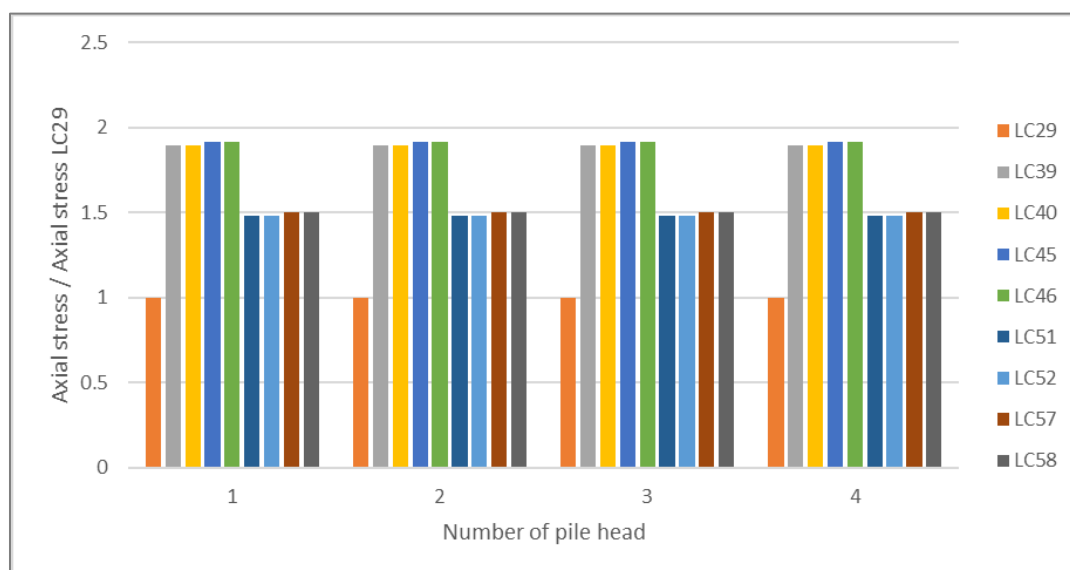
**Σχήμα Α'.168** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



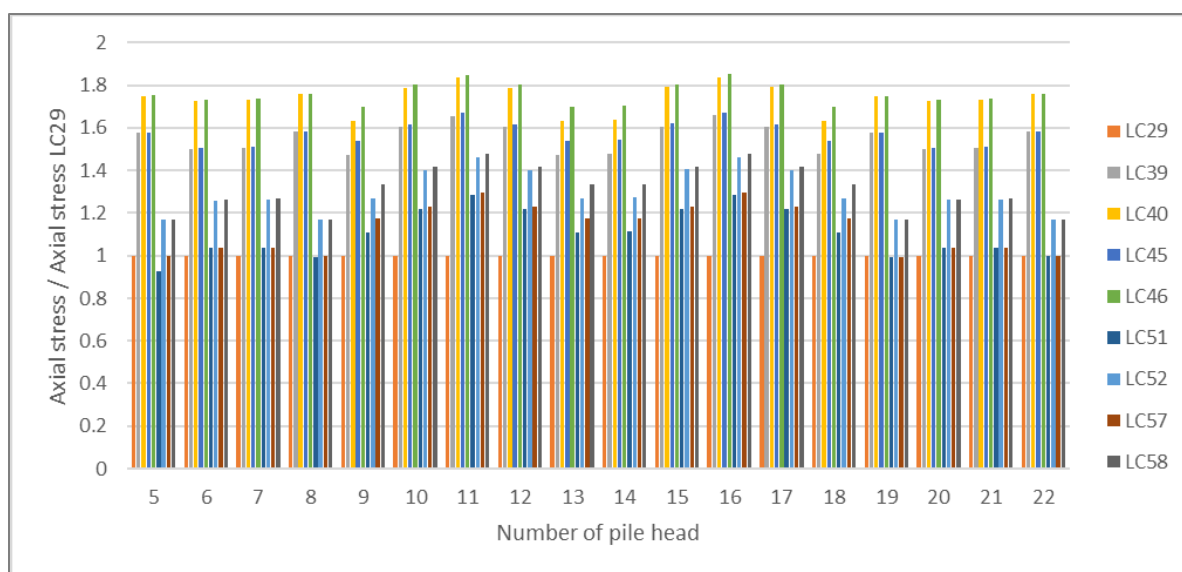
Σχήμα Α'.169 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



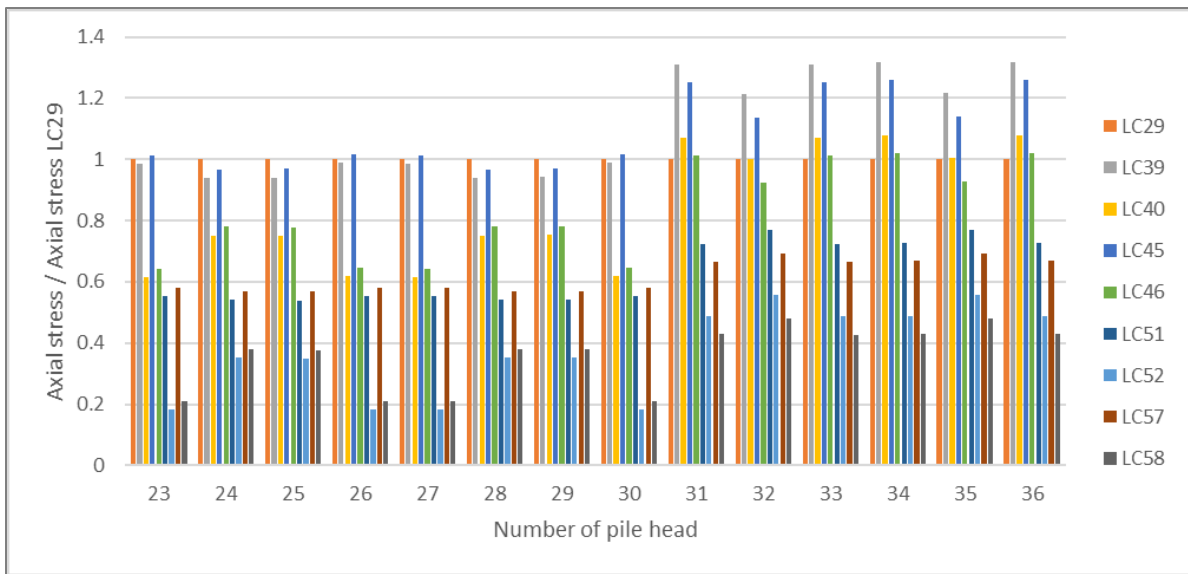
Σχήμα Α'.170 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC19 κατά τους χειμερινούς μήνες.



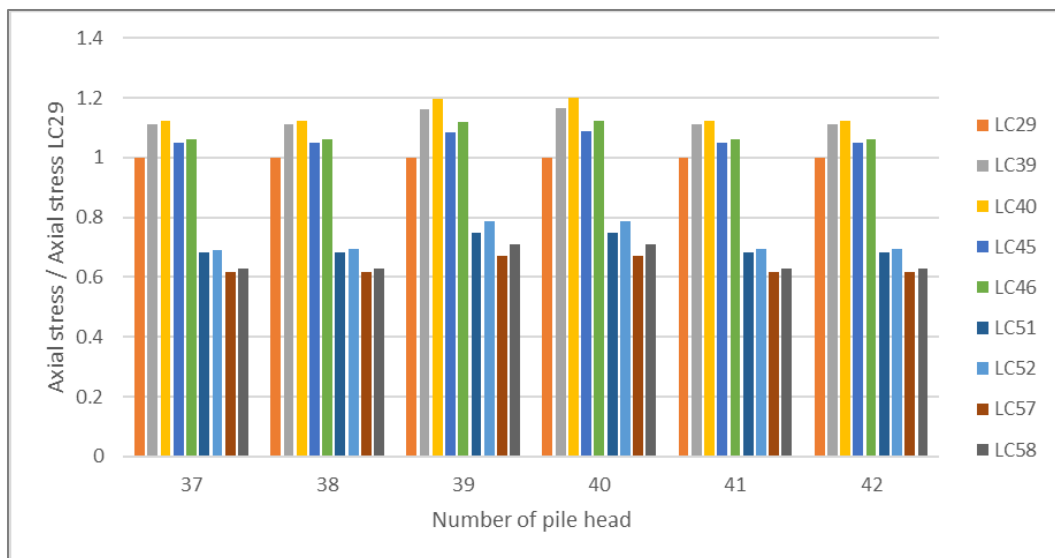
**Σχήμα Α'.171** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



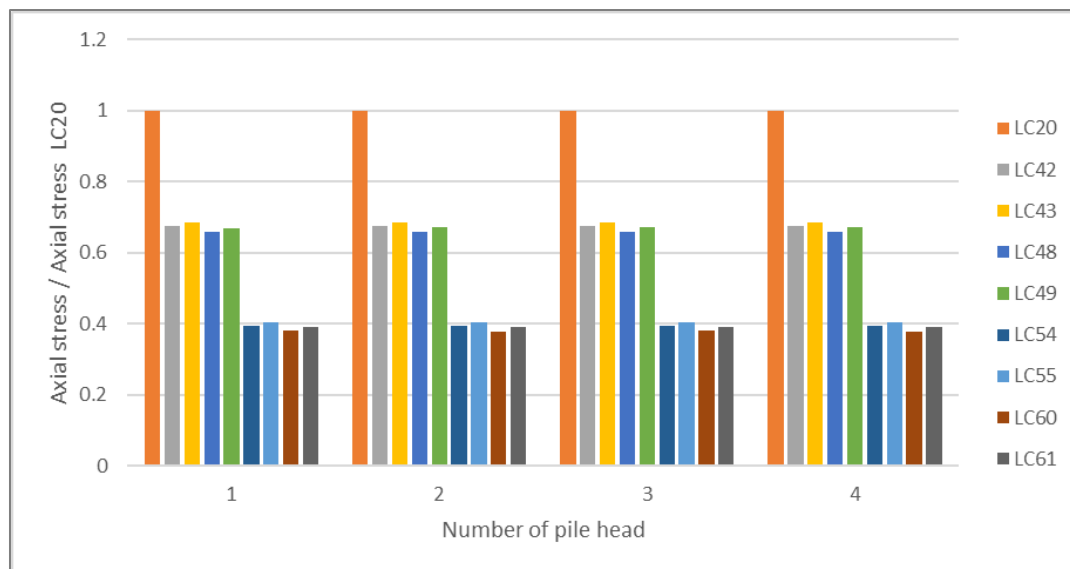
**Σχήμα Α'.172** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



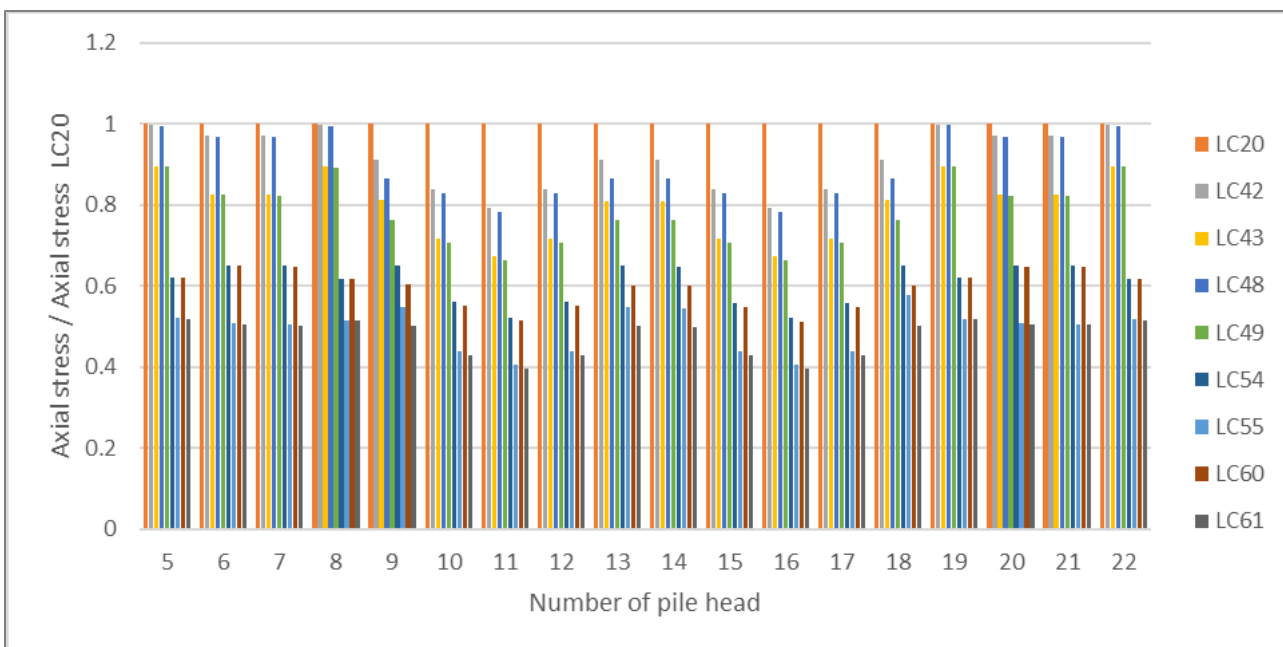
**Σχήμα Α'.173** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



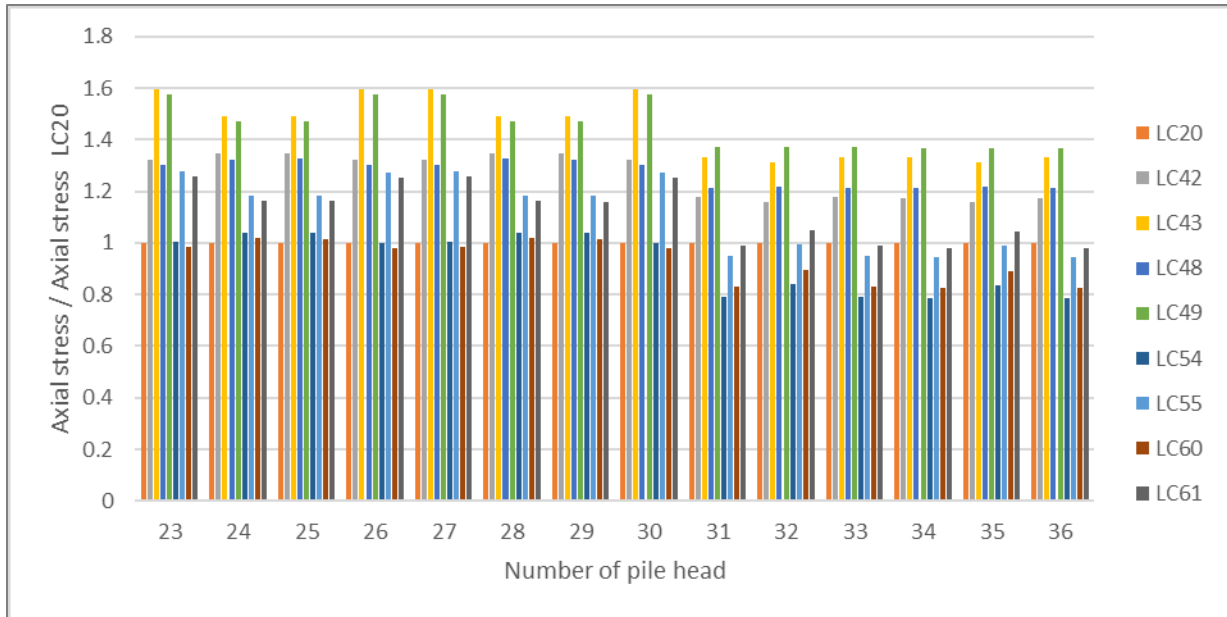
**Σχήμα Α'.174** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC29 κατά τους χειμερινούς μήνες.



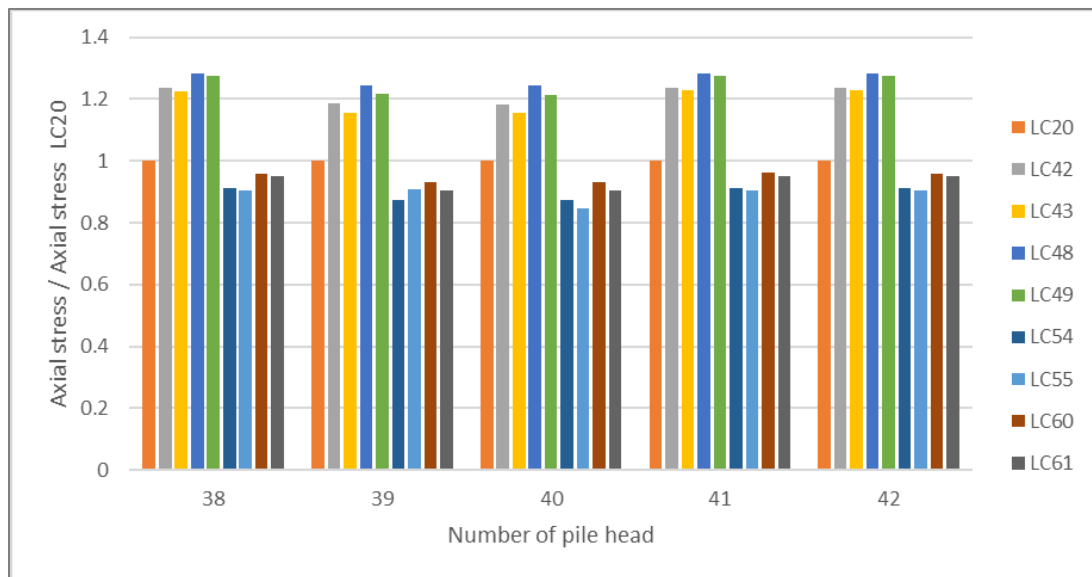
*Σχήμα Α'.175* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



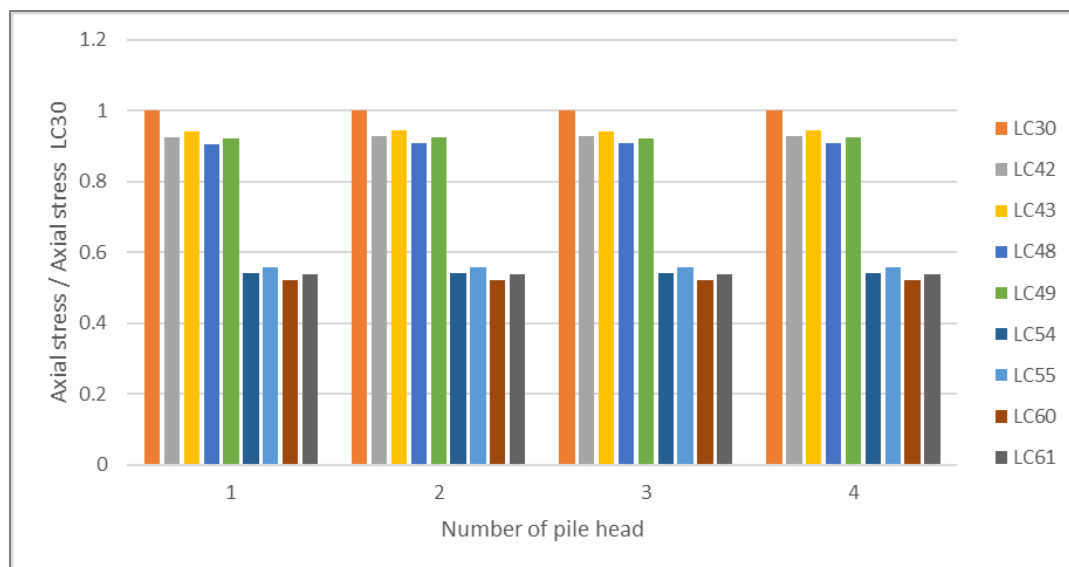
*Σχήμα Α'.176* Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



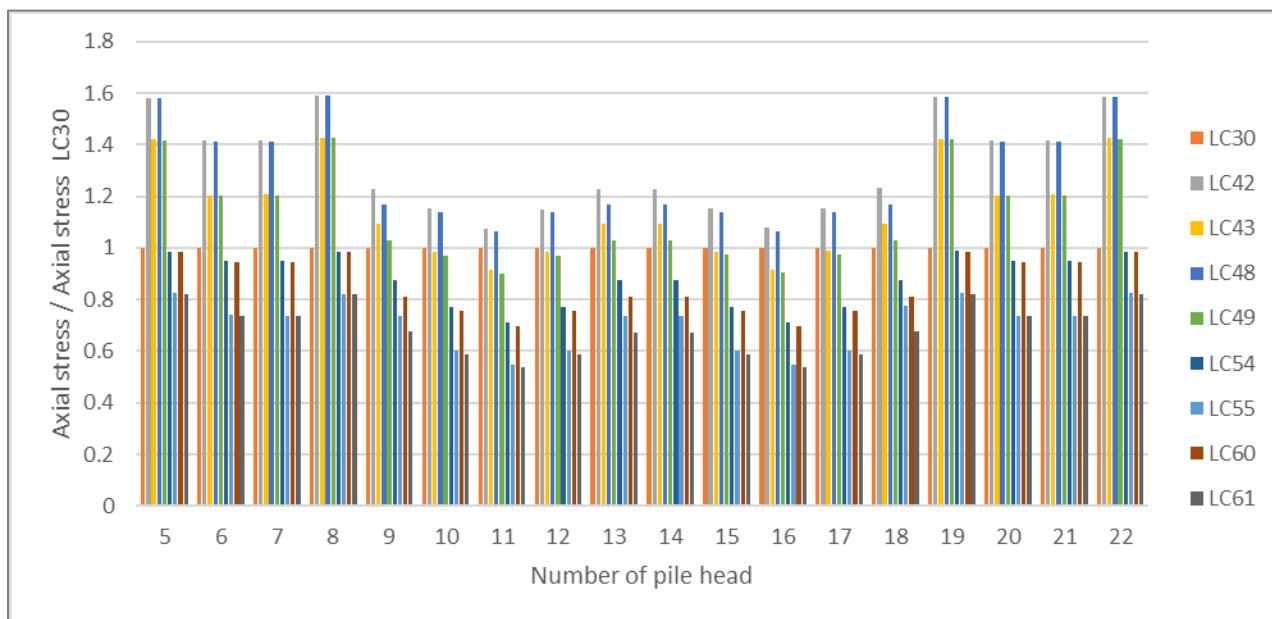
Σχήμα Α'.177 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



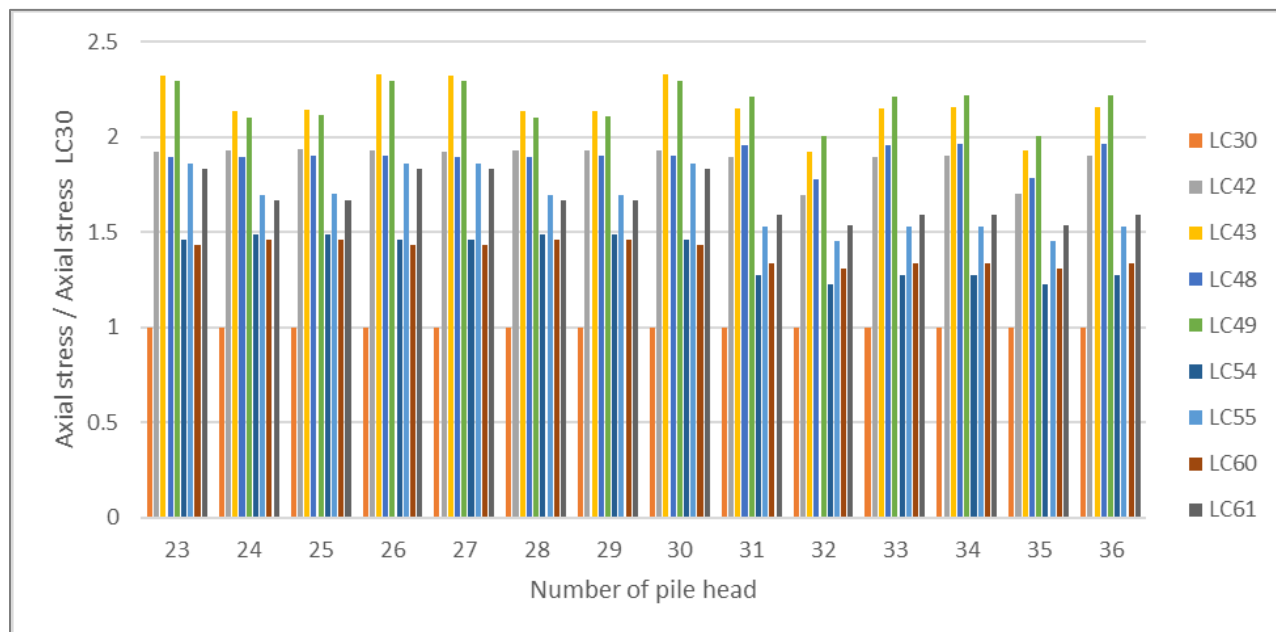
Σχήμα Α'.178 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC20 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



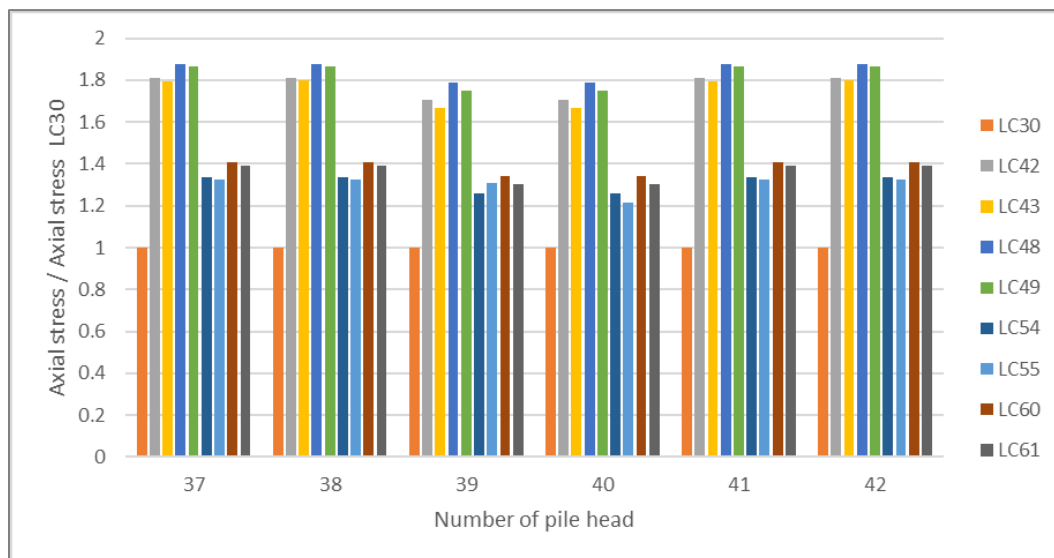
**Σχήμα Α'.179** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας γωνιακών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



**Σχήμα Α'.180** Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εξωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχήμα Α'.181 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας ενδιάμεσων πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχήμα Α'.182 Διάγραμμα σύγκρισης βαθμού λειτουργίας εσωτερικών πασσάλων προς τη μέγιστη κατκόρυφη μετακίνηση της φόρτισης LC30 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



## Βιβλιογραφία

- [1] Amatya B. L., Soga K., Bourne-Webb P. J., Amis T., & Laloui L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503-519.
- [2] Bourne-Webb P., Burlon S., Javed S., Kürten S. & Loveridge F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 402-419.
- [3] Bowles J. E. (1988). *Foundation analysis and design*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [4] Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- [5] Brandl H. (2016). Geothermal geotechnics for urban undergrounds. *Procedia engineering*, 165, 747-764.
- [6] Cacace M., Scheck-Wenderoth M., Noack V., Cherubini Y., & Schellschmidt R. (2013). Modelling the surface heat flow distribution in the area of Brandenburg (northern Germany). *Energy Procedia*, 40, 545-553.
- [7] Dunbabin P., Charlick H. & Green R. (2013). Detailed analysis from the second phase of the Energy Saving Trust's heat pump field trial. *Department of Energy and Climate Change: London, UK*, 123.
- [8] EN, B. (2004). Eurocode 7: geotechnical design—Part 1: general rules. *British Standards: London, UK*.
- [9] Enercret (2021). *Pipe Sealings & Pipe Penetrations*  
<https://www.enercret.uk/pipe-sealings-penetrations>
- [10] Engineering Pro Guides. Pressure Enthalpy Diagram  
<https://www.engproguides.com/pressure-enthalpy-diagram.html>
- [11] et SYNTEC, C. F. M. S. (2017). Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. *Revue Française de Géotechnique*, 149, 120.
- [12] European Commission, Atlas of Geothermal Resources in Europe
- [13] European Standard. (2002). EN 1990: 2002 Eurocode: Basis of structural design.
- [14] European Union (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*, 5, 2009.
- [15] Gómez E. V., Chicote M. A., Martínez F. J. R., & González A. T. (2017). Thermal behaviour of an active slab: experimental study for TABs applications. *Energy Procedia*, 142, 3326-3331.
- [16] Handbook, A. S. H. R. A. E. (1985). Fundamentals SI Edition, American Society of Heating. *Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 1200(0.0341)*, 0-2379.
- [17] Hepbasli A. (2004). Ground-source heat pumps (Vol. 3, p. 97-106). *Encyclopedia of Energy*.
- [18] Houhou R. & Laloui L. (2022). Geomechanics for energy and the environment: Current developments. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100345.
- [19] IGSHPA in conjunction with Deep Foundations Institute (2021). *Practical Construction Aspects of Designing, Installing and Operating a GSHP Solution Connected to Energy Foundations*  
[https://www.effc.org/content/uploads/2022/08/IGSHPA\\_DFI\\_Energy-Foundation-works-July-2021.pdf](https://www.effc.org/content/uploads/2022/08/IGSHPA_DFI_Energy-Foundation-works-July-2021.pdf)
- [20] John W. Lund (2022). *Geothermal energy*. Britannica  
<https://www.britannica.com/science/geothermal-energy>
- [21] Karytsas C. (2020). *Greek Ground Source Heat Pump (GSHP) Market (Status –*

- Outlook and Training Needs*). Center for Renewable Energy Sources and Saving  
[https://helapco.gr/wp-content/uploads/KARYTSAS-GSHP\\_13\\_02\\_2020\\_FINAL.pdf](https://helapco.gr/wp-content/uploads/KARYTSAS-GSHP_13_02_2020_FINAL.pdf)
- [22] Key Findings (2021). EGEc Geothermal Market Report  
<https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2021/>
- [23] Kurylyk B. L., MacQuarrie, K. T., Caissie, D., & McKenzie, J. M. (2015). Shallow groundwater thermal sensitivity to climate change and land cover disturbances: derivation of analytical expressions and implications for stream temperature modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2469-2489.
- [24] Laloui L., & Loria A. R. (2019). *Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application*. Academic Press.
- [25] Lee S., Park S., Kang M. & Choi H. (2018). Field experiments to evaluate thermal performance of energy slabs with different installation conditions. *Applied Sciences*, 8(11), 2214.
- [26] Loria A. F. R. (2020). Energy geostructures: Theory and application. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 205, p. 01004). EDP Sciences.
- [27] LTS ENGINEERING A.E. (2015). *Ground Source Heat Pump*  
<https://docplayer.gr/4067685-Geotheruiko-systiua-geotheruiki-antlia-theruotitas.html>
- [28] Moon C. E. & Choi J. M. (2015). Heating performance characteristics of the ground source heat pump system with energy-piles and energy-slabs. *Energy*, 81, 27-32.
- [29] Ochsner K. (2012). *Geothermal heat pumps: a guide for planning and installing*. Routledge.
- [30] Papachristou M., Arvanitis A., Mendrinou D., Dalabakis P., Karytsas C., & Andritsos N. (2019). Geothermal Energy Use, Country Update for Greece (2016-2019). *Transport*, 1, 1-68.
- [31] Rees S. (Ed.). (2016). *Advances in ground-source heat pump systems*. Woodhead Publishing.
- [32] Renewable energies agency. *Heat from the earth: How to heat with near – surface geothermal energy*  
<https://www.unendlich-viel-energie.de/media-library/charts-and-data/heat-from-the-earth-how-to-heat-with-near-surface-geothermal-energy>
- [33] Salciarini D., Ronchi F., Cattoni E., & Tamagnini C. (2015). Thermomechanical effects induced by energy piles operation in a small piled raft. *International journal of Geomechanics*, 15(2), 04014042.
- [34] Sliwa T., Sapińska-Śliwa A., Wysogład T., Kowalski T., & Konopka I. (2021). Strength Tests of Hardened Cement Slurries for Energy Piles, with the Addition of Graphite and Graphene, in Terms of Increasing the Heat Transfer Efficiency. *Energies*, 14(4), 1190.
- [35] SOFiSTik (2008). Product Information  
[https://www.fides-vp.de/fileadmin/user\\_upload/.EN\\_FIDES/PDFs/P\\_Sofistik/SOFiSTik\\_1\\_EN.pdf](https://www.fides-vp.de/fileadmin/user_upload/.EN_FIDES/PDFs/P_Sofistik/SOFiSTik_1_EN.pdf)
- [36] Suckling T. (2008). Geothermal Energy and Energy Piles, Stent Foundations Ltd. UK. *Personal communication*.
- [37] Vasilescu A. R. (2019). *Design and execution of energy piles: Validation by in-situ and laboratory experiments* (Doctoral dissertation, École centrale de Nantes).
- [38] Xie J., & Qin Y. (2021). Heat Transfer and Bearing Characteristics of Energy Piles. *Energies*, 14(20), 6483.
- [39] Γκότσης Κ. Π. (2004). *Πεπερασμένα στοιχεία*. Εκδόσεις Ζήτη
- [40] Δεμερτζής Α. (2018). *Τα 32 αναγνωρισμένα γεωθερμικά πεδία της χώρας – Σε διαβούλευση το νομοσχέδιο για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού*, ecopress

- <https://ecopress.gr/ta-32-anagnorismena-geothermika-pedia-ti/>
- [41] ΕΑΓΜΕ, *Γεωθερμική Ενέργεια*  
[https://nisyros.igme.gr/index.php/geotherm/?fbclid=IwAR13aDfnLtbc6V\\_8a36XvZcR6WuzgldKtQqluoRO2rwUnkZyGZL2JYTaOl8](https://nisyros.igme.gr/index.php/geotherm/?fbclid=IwAR13aDfnLtbc6V_8a36XvZcR6WuzgldKtQqluoRO2rwUnkZyGZL2JYTaOl8)
- [42] Καββαδάς Μ., *Φέρουσα ικανότητα εμπηγνυόμενων πασσάλων μέσω στατικών τύπων*  
<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/books.htm>
- [43] Κανονισμός Γεωθερμικών εργασιών (2021)  
<https://www.geotee.gr/MainNewsDetail.aspx?CatID=1&RefID=24001&TabID=5>
- [44] Κατσιμίχας Σ. (2010). *Γεωθερμία*  
<https://uhhe.gr/wp-content/uploads/geothermia1-1.pdf>
- [45] Κωμοδρόμος Μ. Α. (2008). *Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική. Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευών*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [46] Κωμοδρόμος Μ. Α. (2019). *Θεμελιώσεις και Αντιστηρίξεις. Οριακή Ισορροπία – Αριθμητικές Μέθοδοι*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος – 2<sup>η</sup> έκδοση
- [47] Μπόζης Δ. (2011). *Ο πάσσαλος θεμελίωσης ως γεωεναλλάκτης. Διερευνήσεις για την θερμική του συμπεριφορά*  
<https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/23574>
- [48] Μυστακίδης Ε., *Οι μοναχικές μετακινήσεις*. Σημειώσεις μαθήματος.  
<https://slideplayer.gr/slide/12196734/>
- [49] Παπαβασιλείου Κ., *Το γεωθερμικό δυναμικό σε Μακεδονία και Θράκη – Προοπτικές και δυνατότητες αξιοποίησης του*  
<https://paris-reinforce.eu/sites/default/files/2020-01/GR-WS-PDFs/Papavassiliou-Geothermal-potential-in-Macedonia-and-Thrace-Prospects-and-potential-for-exploitation.pdf>
- [50] Παπαδάκης Κ. (2014). *Η μηχανή του Carnot*  
<https://fysikafysikh.wordpress.com>
- [51] Παπαμίχος Ε., Χαραλαμπίδης Ν. (2017). *Αντοχή Υλικών και Δομικών Στοιχείων*. Εκδόσεις Τζιόλα – 2<sup>η</sup> Έκδοση
- [52] Παπαδρακάκης Μ. (2001). *Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [53] Τζαμαλής, *Διάδοση Θερμότητας*  
[https://www.aua.gr/fysiki/ekpaideysh\\_fysikh/shmeiwseis/tzamalidis/metafora%20thermotitas.pdf](https://www.aua.gr/fysiki/ekpaideysh_fysikh/shmeiwseis/tzamalidis/metafora%20thermotitas.pdf)
- [54] Τζάρος Κ. (2020). *Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων – Εφαρμογές της Μεθόδου στην Επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού*. Σημειώσεις μαθήματος.
- [55] Χατζηγιάννης Γ., *Το Γεωθερμικό Δυναμικό της Ελλάδας*  
[https://verde-tec.gr/images/0403\\_ecocity\\_gxatzigiannis.pdf](https://verde-tec.gr/images/0403_ecocity_gxatzigiannis.pdf)
- [56] Χωροπανίτης Ι. (2015). *Αβαθής Γεωθερμία – Αξιοποίηση για θέρμανση και ψύξη*  
[https://www.php.gov.gr/images/stories/eu\\_programs/alterenergy/workshop/Geotherm-usage.pdf](https://www.php.gov.gr/images/stories/eu_programs/alterenergy/workshop/Geotherm-usage.pdf)