

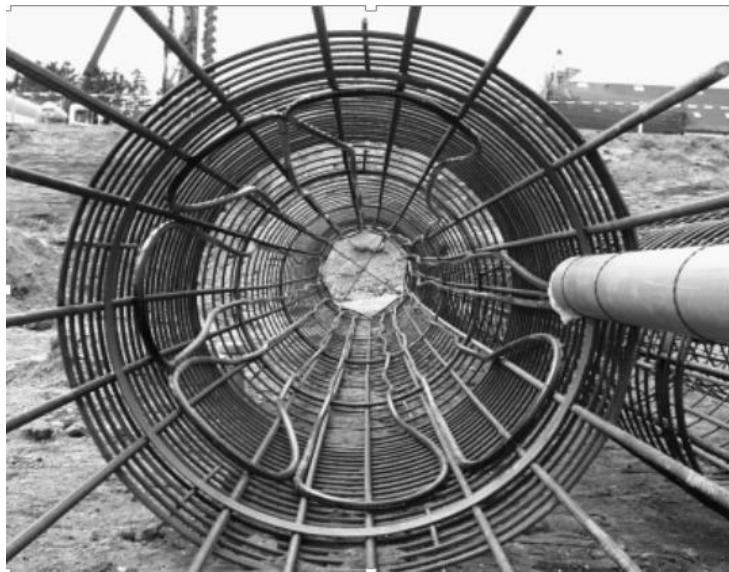
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ
ΣΕ ΑΜΜΩΔΕΣ ΕΛΑΦΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Φοιτητής

Καμάς Ιωάννης Α.Μ. 0811054

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωμοδρόμος Αιμίλιος, Καθηγητής Π.Θ.

Συνεπιβλέπων Καθηγητής

Γεωργιάδης Κωνσταντίνος, Αναπλ. Καθηγητής Α.Π.Θ

Βόλος

Ιούλιος, 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αρχίσει να εφαρμόζεται ευρέως μια ρηξικέλευθη τεχνολογική μέθοδος για τη θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων μέσω της εγκατάστασης ενεργειακών πασσάλων. Η τεχνολογία αυτή στηρίζεται στην εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας του εδάφους αποφέροντας σημαντικό περιβαλλοντικό και μακροχρόνιο οικονομικό όφελος. Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την επίδραση της μεταβολών της θερμοκρασίας λόγω της θερμικής λειτουργίας ενός μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου στη μηχανική του συμπεριφορά. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus στις οποίες προσομοιώθηκαν τόσο συνθήκες μόνιμης και όσο και συνθήκες μη μόνιμης μετάδοσης θερμότητας.

Εξετάσθηκε η απόκριση μεμονωμένων ενεργειακών πασσάλων σε αμμώδες έδαφος, με ελεύθερη ή με δεσμευμένη κεφαλή, κατά την επιβολή κύκλων θερμικής φόρτισης με ή χωρίς την παρουσία αξονικού μηχανικού φορτίου στην κεφαλή. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επιρροή του χρόνου θέρμανσης-ψύξης στην κατανομή των θερμοκρασιακών πεδίων. Κατόπιν, εκτιμήθηκε η μεταβολή που προκαλείται στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου με την ψύξη-θέρμανση του. Έπειτα, αναλύθηκαν οι μεταβολές στις αξονικές μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και πλευρικής τριβή του ενεργειακού πασσάλου εξαιτίας της μεταβολής του μεγέθους της μηχανικής φόρτισης και της διάρκειας επιβολής της θέρμανσης ή ψύξης του πασσάλου (μη-μόνιμη θερμική ροή). Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η επιρροή των θερμικών (συντελεστής θερμικής διάγκωσης, θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής θερμότητας) και μηχανικών (μέτρο ελαστικότητας, γωνίας διατμητικής αντοχής του εδάφους, λόγος Poisson) παραμέτρων του εδάφους. Τέλος, μελετήθηκε η ενδεχόμενη επιρροή της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης, η επίδραση της θεωρούμενης θερμικής συνοριακής συνθήκης στην επιφάνεια του εδάφους και η επιρροή του μήκους του ενεργειακού πασσάλου στα εξεταζόμενα μεγέθη.

Παρατηρήθηκε ότι κατά την ψύξη ενεργειακού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή, η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων εξαρτάται από το μέγεθος της επιβαλλόμενης μηχανικής φόρτισης. Για μικρά μηχανικά φορτία η ψύξη οδηγεί σε μείωση των αξονικών δυνάμεων ενώ υπό μεγάλα μηχανικά φορτία προκαλεί αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Κατά τη θέρμανση παρουσιάζεται μια γενική αύξηση των αξονικών δυνάμεων ανεξαρτήτως του μεγέθους της μηχανικής φόρτισης. Επίσης, παρατηρείται μια αύξηση της καθίζησης στην κεφαλή του πασσάλου κατά την ψύξη και αντίστροφα μια μείωση με τη θέρμανση του.

Επιπρόσθετα, βρέθηκε ότι η αύξηση της διάρκειας θερμικής ροής αυξάνει το χώρο μεταβολής θερμοκρασίας γύρω από τον πάσσαλο. Ως προς τη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου παρατηρήθηκε μικρή μείωση 3% περίπου κατά την ψύξη και αύξηση 3% κατά τη θέρμανση. Ακόμη, η αύξηση του χρόνου επιβολής της ψύξης του πασσάλου επιφέρει μεγέθυνση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων και των καθιζήσεων του πασσάλου, ενώ με τη θέρμανση παρατηρούνται τα αντίθετα αποτελέσματα.

Γενικά η μεταβολή των θερμικών χαρακτηριστικών του εδάφους δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των αξονικών δυνάμεων του πασσάλου. Όσον αφορά τις καθιζήσεις οι κυριότερες διαφορές εμφανίζονται με την αλλαγή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους όπου κατά την ψύξη ή τη θέρμανση του πασσάλου η αύξηση του προκαλεί μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου προς τα κάτω

Όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας συντελεί στην αύξηση της επιρροής της ψύξης-θέρμανσης στις αξονικές δυνάμεις. Η αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής του εδάφους προκαλεί μετατόπιση του ουδέτερου σημείου προς τα πάνω. Επιπλέον, η μεταβολή του συντελεστή Poisson δεν επιδρά σημαντικά στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων. Οι καθιζήσεις λόγω θέρμανσης-ψύξης δεν επηρεάζονται με τη μεταβολή των παραπάνω μηχανικών χαρακτηριστικών.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι κατά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση η απόκριση του πασσάλου είναι παρόμοια για κάθε κύκλο φόρτισης μετά τον δεύτερο κύκλο.

Η μεταβολή του μήκους ενεργειακού πασσάλου δεν μεταβάλλει την κατανομή των εξεταζόμενων μεγεθών. Ακόμη, βρέθηκε ότι σε προσομοίωση με μεγαλύτερη σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας προκύπτει σημαντική μείωση των καθιζήσεων.

Για πάσσαλο με δεσμευμένη κεφαλή παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του αξονικού φορτίου κατά την ψύξη και αντιστοίχως αύξηση κατά τη θέρμανση η οποία εντοπίζεται κυρίως στην κεφαλή. Επιπλέον, οι αξονικές μετατοπίσεις μειώνονται με την επιβολή της ψύξης και αντιστρόφως αυξάνονται κατά τη θέρμανση με τις κύριες διαφορές να συναντώνται στην αιχμή.

Τελικά, από τις αναλύσεις που διεξάχθηκαν περιγράφεται ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο όπως προαναφέρθηκε αποτελεί νέο πεδίο στο επάγγελμα των Πολιτικών Μηχανικών και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης για την καθιέρωση σωστών θεωρητικών μοντέλων περιγραφής του φαινομένου.

SUMMARY

Over the last few decades, an innovative technological method has been applied to heating or cooling buildings through the installation of energy piles. This process is based on exploiting the shallow geothermal energy of the soil, resulting in significant environmental and long-term economic benefits. The present thesis deals with the mechanical response (specifically the distribution of axial displacements, axial forces and shear stresses) of a single energy pile in sand under transient or steady state thermal loading. Analyses are presented that were performed using the finite element program Abaqus.

The mechanical response to thermal loading cycles of a single free or fixed head energy pile in sand was investigated. Analyses were performed with and without pile head axial mechanical loads. In addition, the influence of the duration of the heating-cooling cycles on the distribution of the temperature fields around the energy pile was examined. The effect of cooling and heating on the bearing capacity of the pile was also estimated. In addition, the effect of the mechanical load level, the duration of thermal loading, and the thermal and the mechanical material properties on the thermally induced axial pile displacements, axial forces and interface shear stresses was examined. Finally, the potential influence on axial pile displacements, axial forces and shear stresses of cyclic thermal loading, the type of thermal boundary condition along the ground surface and the length of the energy pile were also investigated.

It was observed that during cooling of a free head energy pile the distribution of the axial forces depends on the magnitude of the imposed mechanical loading. At small loads cooling causes a reduction of the axial pile loads, while at high mechanical loads cooling of the pile leads to an increase of the axial loads. During heating, axial forces generally increase regardless of the magnitude of mechanical loading. Also, there is an increase of the pile head settlement during cooling and a decrease during heating.

In addition, it was found that as the duration of thermal loading increases the distribution of the temperature change around the pile increases. Moreover, it was estimated that the bearing capacity of the pile decreases around 3% during cooling and increases about 3% during heating. Furthermore, it was observed that the increase in the duration of cooling results in an increase of the compressive axial forces and pile settlements, while heating leads to the opposite results.

The change of the thermal material coefficients do not significantly change the distribution of the axial forces of the pile. Concerning, the axial pile displacement, the main changes occur with the change of material thermal expansion where in cooling-heating the increase of the thermal expansion leads to a downward movement of the null point.

As for the mechanical material properties, the increase of the modulus of elasticity contributes to a vast increase of the impact made by thermal loads on the axial forces. Moreover, an increase in the angle of internal friction causes an upward movement of the null point. In addition, the change of Poisson ratio does not have an important

impact on the pile axial the distribution of pile axial forces. Finally, the changes in the examined mechanical material properties do not significantly affect the pile settlements during heating-cooling

In addition, it was observed that during a cyclic thermal loading, after its second thermal cycle the pile response remains almost stable.

A change in the length of the pile does not alter pile response in cooling or heating. Furthermore, a higher thermal boundary condition along the ground surface leads to a considerable reduction of pile settlements.

For a fixed pile head, a significant decrease in the axial forces is observed during cooling and respectively a considerable increase during heating which is mainly found on the pile head. Moreover, the axial pile displacements during decrease cooling and increase during heating with the main differences occurring at the pile base.

Concluding, from all the analyses that there were carried out, a rather complicated phenomenon is described which, as mentioned before, is a new field in the civil engineering profession and needs further investigation to establish correct theoretical models for describing the phenomenon.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας, έρχεται να σφραγίσει το τέλος της φοίτησης μου, στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο Καθηγητή του Π.Θ και τον συνεπιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Γεωργιάδη Αναπλ. Καθηγητή του Α.Π.Θ οι οποίοι μέσα απο τη συνεχή στήριξη αλλά και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν, συνέβαλαν καθοριστικά στην πραγμάτωση της παρούσας εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το Δημήτριο Σκορδά που εκπονεί τη Διδακτορική Διατριβή του στο Α.Π.Θ. για τη σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της μελέτης μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ολυμπία Ματάκια και το Βασίλειο Σταμούλη για τη βοήθεια που μου προσέφεραν για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Κεφάλαιο 1 Πρόλογος	-1-
Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή	
2.1 Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας και η χρήση των ενεργειακών θεμελιώσεων.....	-3-
2.2 Τα συστήματα λειτουργίας και η αποδοτικότητα των ενεργειακών πασσάλων....	-7-
2.3 Μηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων.....	-10-
Κεφάλαιο 3 Προσδιορισμός δεδομένων της αριθμητικής ανάλυσης	-15-
Κεφάλαιο 4 Προσδιορισμός καμπύλης φορτίου-μετατόπισης	-22-
Κεφάλαιο 5 Παρουσίαση θερμοκρασιακών πεδίων που προέκυψαν από τις θερμικές αναλύσεις	-24-
Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων	-28-
6.1. Κατακόρυφες μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και πλευρική τριβή για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης	-33-
6.2 Διαφορές μεταξύ των υπολογισθέντων καθιζήσεων, αξονικών δυνάμεων και διατμητικών τάσεων για δύο διαφορετικές διαδρομές θερμικής φόρτισης του πασσάλου.	-53-
6.3 Επιρροή του μηχανικού φορτίου	-58-
6.4 Επιρροή της διάρκειας της θερμικής φόρτισης	-64-
6.5 Επιρροή των θερμικών παραμέτρων του εδάφους	-79-
6.5.1 Επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης α (m/m/K).....	-79-
6.5.2 Επιρροή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K).....	-103-
6.5.3 Επιρροή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K).....	-113-
6.6 Επιρροή της μεταβολής των μηχανικών παραμέτρων του εδάφους	-125-
6.6.1 Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας (E) του εδάφους	-125-
6.6.2 Επιρροή της γωνίας διατμητικής αντοχής (φ) του εδάφους.....	-131-

6.6.3 Επιρροή του λόγου Poisson ν του εδάφους.....	-136-
6.7 Επίδραση της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης.....	-141-
6.8 Επιρροή της θερμικής συνοριακής συνθήκης στην επιφάνεια του εδάφους.....	-149-
6.9 Επιρροή του μήκους του πασσάλου.....	-157-
6.10 Επιρροή της δέσμευσης της κεφαλής του πασσάλου.....	-167-
Κεφάλαιο 7 Γενικά Συμπεράσματα.....	-174-
7.1 Κατακόρυφες μετατοπίσεις.....	-175-
7.2 Αξονικές δυνάμεις.....	-176-
7.3 Πλευρική τριβή.....	-179-
Βιβλιογραφία	-182-

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

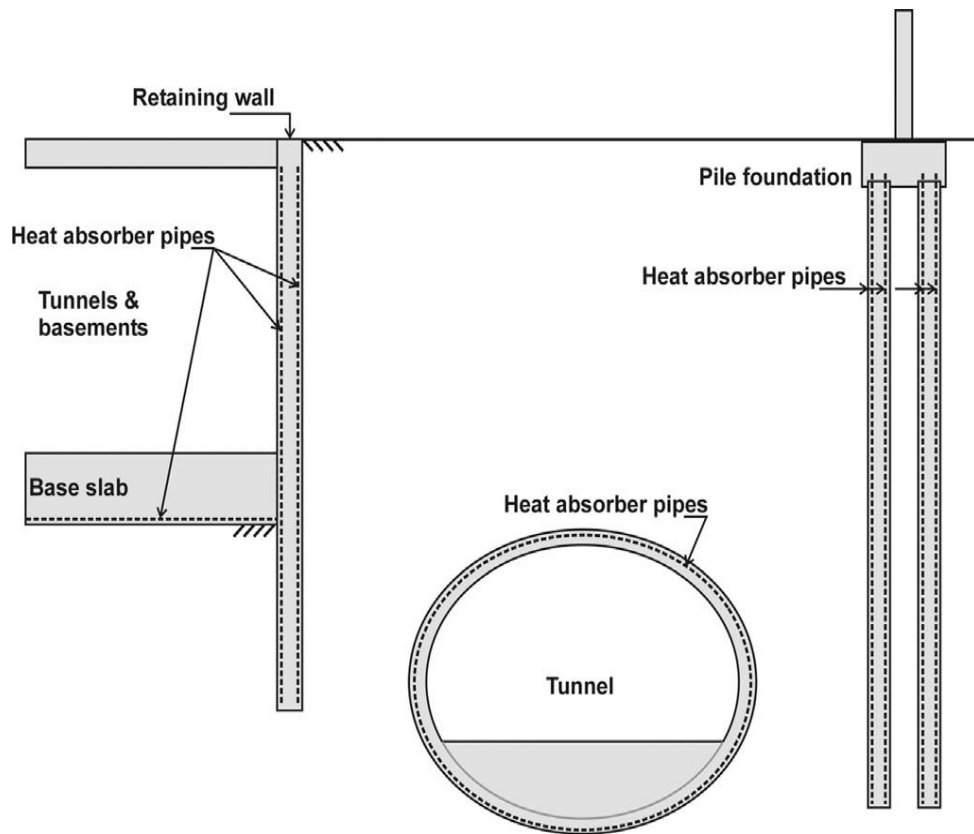
Τις τελευταίες δεκαετίες ολοένα και περισσότερο ωριμάζει επιστημονικά και κοινωνικά η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας, η οποία, σε μεγάλο βαθμό, σχετίζεται με την προοπτική της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσής. Οι πιο γνωστές τεχνολογικές μορφές αυτού του τύπου που χρησιμοποιούνται σήμερα ανάγονται στην αξιοποίηση της αιολικής, ηλιακής, υδροηλεκτρικής και γεωθερμικής ενέργειας. Ιδιαίτερα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η χρήση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας παρουσιάζει ραγδαία αύξηση σε όλες σχεδόν τις χώρες του κόσμου και αποτελεί αντικείμενο μελέτης του κλάδου του Πολιτικού Μηχανικού .

Αβαθής γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η θερμική ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη στις επιφανειακές στρώσεις του εδάφους και προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμότητα των βαθύτερων στρωμάτων της Γης. Η ενέργεια αυτή είναι καθαρή, πρακτικά ανεξάντλητη και σε αντίθεση με τα γεωθερμικά πεδία, είναι διαθέσιμη παντού.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια μεταφέρουν θερμότητα από και προς το υπέδαφος με σκοπό τόσο την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών κατοικιών, μεγάλων δημοσίων και ιδιωτικών κτιρίων, όσο και άλλων ειδικών εφαρμογών, όπως οι υδατοκαλλιέργειες , η τηλεθέρμανση, η θέρμανση θερμοκηπίων κ.α. Ένα μεγάλο μέρος της καταναλισκόμενης ενέργειας στις σύγχρονες κοινωνίες, όπως το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ε.Ε και το 33% στην Ελλάδα (Eurostat, 2011) αφορά την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης. Αυτή κατά κύριο λόγο πραγματοποιείται με την αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή θερμικής ενέργειας (θέρμανση – νερό χρήσης) ή τη χρήση ενεργοβόρων ηλεκτρικών κλιματιστικών συσκευών (θέρμανση – ψύξη). (Φραγκογιάννης 2011)

Οι ενεργειακές θεμελιώσεις και άλλες θερμικά ενεργές γεωτεχνικές κατασκευές, όπως ενεργειακοί τοίχοι αντιστήριξης και σήραγγες αξιοποιούν την αβαθή γεωθερμική ενέργεια και εκπροσωπούν μία ρηξικέλευθη τεχνολογία. Αυτή συμβάλλει στην περιβαλλοντική προστασία και εξοικονομεί ένα σημαντικό χρηματικό ποσό μετά το πέρας ενός χρονικού διαστήματος. Ειδικότερα, υπόγειες γεωτεχνικές κατασκευές είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ευρέως για τη θέρμανση και ψύξη όλων των ειδών των κτιρίων μέσα από τη χρήση δομικών στοιχείων ως γεωεναλλακτών για εξαγωγή ή αποθήκευση ενέργειας (Brandl, 2006):

- α) Πάσσαλοι και διαφραγματικοί τοίχοι.
- β) Αβαθείς θεμελιώσεις
- γ) Τοίχοι αντιστήριξης
- δ) Ενεργειακές σήραγγες (βλ. Σχήμα 2)



Σχήμα 1.1) Παραδείγματα ενεργειακών κατασκευών– ενεργειακές θεμελιώσεις, τοίχοι αντιστήριξης και σήραγγες (Bourne-Webb et al., 2016)

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

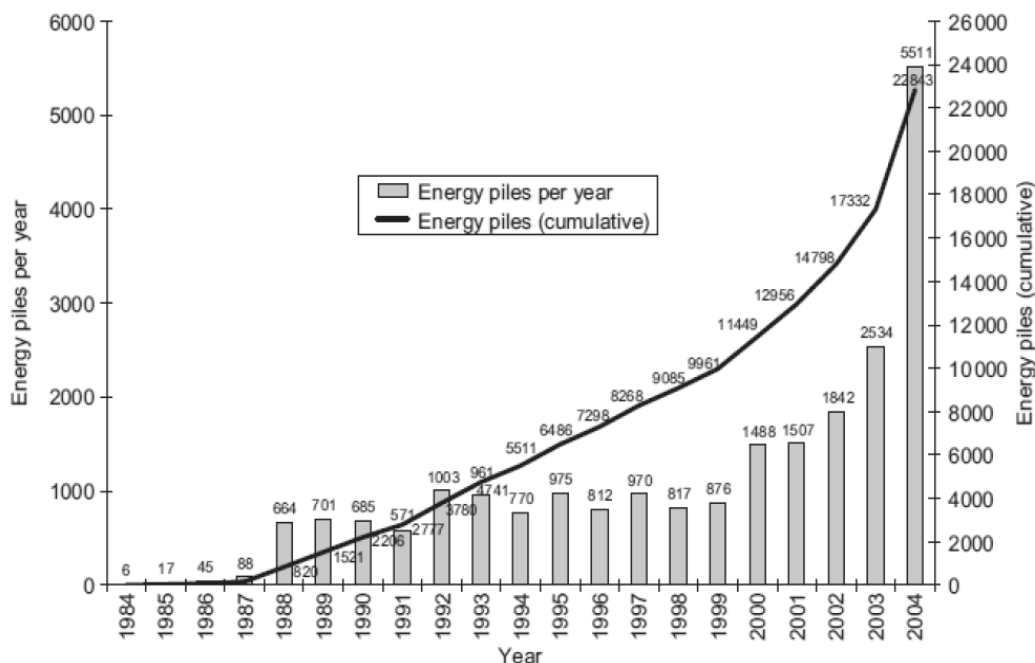
2.1) Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας και η χρήση των ενεργειακών θεμελιώσεων

Η χρήση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας σε διάφορες κατασκευές είναι τα τελευταία χρόνια αρκετά διαδεδομένη. Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας εκμεταλλεύονται την σταθερή θερμοκρασία του εδάφους σε σχετικά μικρά βάθη για τη θέρμανση και ψύξη των υπερκείμενων κατασκευών. Σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα η θερμοκρασία στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους μεταβάλλεται εποχικά κοντά στην επιφάνεια και παρουσιάζει πολύ μικρές μεταβολές σε βάθη μεγαλύτερα των 10m με 15m. Ειδικότερα, αυξάνεται λόγω της ροής θερμότητας που προκαλείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά των θερμότερων στρωμάτων του πυρήνα και τον ψυχρότερον του φλοιού και του μανδύα της Γης. Αυτή η ροή θερμότητας μεταβάλλεται ανάλογα με την περιοχή, λόγω των ιδιαίτερων γεωλογικών συνθηκών (π.χ. γεωθερμικές ανωμαλίες), αλλά και λόγω της διαφοροποίησης των θερμικών ιδιοτήτων των σχηματισμών (Φραγκογιάννης 2011). Στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες διατηρείται σταθερή θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια του έτους σε βάθη από 10m με 15m έως περίπου 50m η οποία κυμαίνεται από 10 έως 15°C. Στην Ελλάδα η σταθερή αυτή θερμοκρασία κυμαίνεται από 14 έως 18°C. Σε τυπικές γεωλογικές συνθήκες, για βάθος άνω των 50 μέτρων η ροή θερμότητας προκαλεί σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας του υπεδάφους σε συνάρτηση με το βάθος, κατά 3°C ανά 100m (Suryatriyastuti, 2013).

Υπάρχει η δυνατότητα να αντληθεί αυτή η θερμική ενέργεια από το έδαφος μέσω αντλιών θερμότητας που εισάγονται σε μια κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, αυτού του είδους η τεχνολογία έχει γίνει γνωστή με την ονομασία «conventional ground heat exchanger» (συμβατικής ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος) στην οποία το έδαφος χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για να θερμανθεί μια κατασκευή κατά τη διάρκεια του χειμώνα και αντίστροφα να ψυχθεί κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Suryatriyastuti et al., 2012).

Η σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους θερμοκρασία του εδάφους παρέχει μία σημαντική δυνατότητα για άμεση εκμετάλλευση ενέργειας, ειδικά όταν γίνεται χρήση βαθιών θεμελιώσεων και αντλιών θερμότητας. Η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας με την κατασκευή ενεργειακών θεμελιώσεων ξεκίνησε να εκδηλώνεται πειραματικά κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1940 σε σκανδιναβικές χώρες στην Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Από τις αρχές ακόμα του 1980, η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αρχίζει προοδευτικά να αξιοποιείται με στοιχεία θεμελίωσης στην Αυστρία και στη Σουηδία. Αρχικά, η συγκέντρωση αυτή γίνεται από τις πλάκες βάσης και έπειτα από τους πασσάλους (1984) και τους διαφραγματικούς τοίχους (1996) (Brandl, H., 2006). Σήμερα πλέον οι ενεργειακές γεωτεχνικές κατασκευές και πιο συγκεκριμένα οι ενεργειακοί πάσσαλοι χρησιμοποιούνται συχνά σε Ευρωπαϊκές χώρες όπως η Αυστρία, η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο και επίσης συνεχώς αυξάνεται το ενδιαφέρον για τα ενδεχόμενα

πλεονεκτήματα που αποφέρουν σε χώρες όπως η ΗΠΑ, η Κίνα και η Ιαπωνία (Bodas Freitas et al, 2013).



Σχήμα 2.1.1) Αριθμός ενεργειακών πασσάλων που έχουν εγκατασταθεί στην Αυστρία (Brandl H., 2006)

Η καινοτομία αυτή χρησιμοποιεί τα δομικά στοιχεία που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος (θεμελιώσεις) και κατασκευάζονται, ανεξάρτητα από την αξιοποίηση ή μη της αβαθούς γεωθερμίας, για να μεταφέρουν στο έδαφος τα μηχανικά φορτία της ανωδομής. Επιπλέον, στις ενεργειακές θεμελιώσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα επιτυγχάνονται καλύτερες αποδόσεις, εξαιτίας των θερμικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Με τη χρησιμοποίηση των γεωθερμικών συστημάτων ψύξης/θέρμανσης, η θερμική ενέργεια προστίθεται και απορροφάται από το έδαφος διαμέσου των ενεργειακών θεμελιώσεων και άλλων θερμικά ενεργών γεωτεχνικών κατασκευών. Ενδεικτικά, στη χώρα της Αυστρίας, οι ενεργειακοί πάσσαλοι ή οι διαφραγματικοί τοίχοι έχουν ενσωματωθεί σε περίπου 300 κτίρια. Ο αριθμός των πλακών θεμελίωσης, των τοίχων αντιστήριξης, κ.α που χρησιμοποιούνται για λόγους γεωθερμικής θέρμανσης ή ψύξης είναι αντίστοιχος. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αυτή η τεχνολογία και αυτές οι τεχνικές έχουν μεταφερθεί σε πολλές χώρες, καθώς επίσης και σε τροπικές περιοχές. (Brandl, 2006)

Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας του εδάφους. Η 1^η αποτελείται από ένα ανοικτό σύστημα βρόχου, κατά τον οποίο τα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιούνται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, με αποτέλεσμα να αντλείται η θερμική ενέργεια από τον υδροφόρο ορίζοντα κατευθείαν στην αντλία θέρμανσης. Αυτή η τεχνική εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας

κρίνεται απλή ως προς την λειτουργία της αλλά μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα στο υπέδαφος, όπως ρύπανση των υπογείων υδάτων ενώ είναι ιδιαίτερα δαπανηρή λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης των μηχανισμών της αντλίας. Τα συστήματα ανοικτού βρόχου η άντληση και απόρριψη υδάτων γίνεται συνήθως με γεωτρήσεις. Η 2^η κατηγορία είναι τα συστήματα κλειστού βρόχου, στα οποία η αξιοποίηση της σταθερής θερμοκρασίας του υπεδάφους για την θέρμανση ή/και ψύξη κτιρίων γίνεται με την κυκλοφορία, μέσω ενός κυκλώματος σωλήνων, νερού ή αντιψυκτικού υγρού μεταξύ μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και στοιχείων εναλλαγής θερμότητας με το έδαφος τα οποία ονομάζονται γεωεναλλάκτες. Στα περισσότερα συστήματα αυτής της κατηγορίας ως στοιχεία εναλλαγής θερμότητας χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις. Τα συστήματα αυτά ονομάζεται «borehole heat exchanger» (BHE). Λόγω του υψηλού κόστους της απαιτούμενης γεώτρησης τελευταία έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται ως στοιχεία εναλλαγής θερμότητας για τα δομικά στοιχεία των θεμελιώσεων.

Οι ενεργειακές θεμελιώσεις έχουν διττό ρόλο λειτουργίας, δηλαδή εξυπηρετούν τις δομικά κατασκευαστικές ανάγκες ενός κτιρίου αλλά ενεργούν επίσης και ως πηγές ανταλλαγής θερμότητας. Το σύστημα που χρησιμοποιούν λειτουργεί ως κλειστός βρόχος ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος. Το θεμελιώδες πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι τα στοιχεία της θεμελίωσης που εξυπηρετούν στην ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος χρησιμεύουν και για στατικούς λόγους, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται να κατασκευαστούν ξεχωριστά από το κτίριο. Επιπλέον, το σκυρόδεμα που τοποθετείται στις θεμελιώσεις επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας καλύτερα σε σύγκριση με τη χρήση ενέματος και τη διατήρηση του βραχώδους υποβάθρου σε μια γεώτρηση (Suryatriyastuti et al., 2012). Πιο συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα καθώς επίσης και μεγάλη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης γεγονός που το καθιστά ένα ιδανικό μέσο απορρόφησης ενέργειας και ανταλλαγής θερμότητας (Brandl, 2006).

Οι ενεργειακές θεμελιώσεις είναι δυνατό να περιλαμβάνουν κοιτοστρώσεις, πασσάλους, αντιστηρίξεις (μεμονωμένα στοιχεία ή συνεχείς διαφραγματικούς τοίχους). Δύναται να χρησιμοποιηθούν τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη κτιρίων όλων των μεγεθών ενώ παράλληλα η χρήση τους απαντάται αντίστοιχα σε οδοστρώματα και γέφυρες κλπ. (Brandl, 2006).

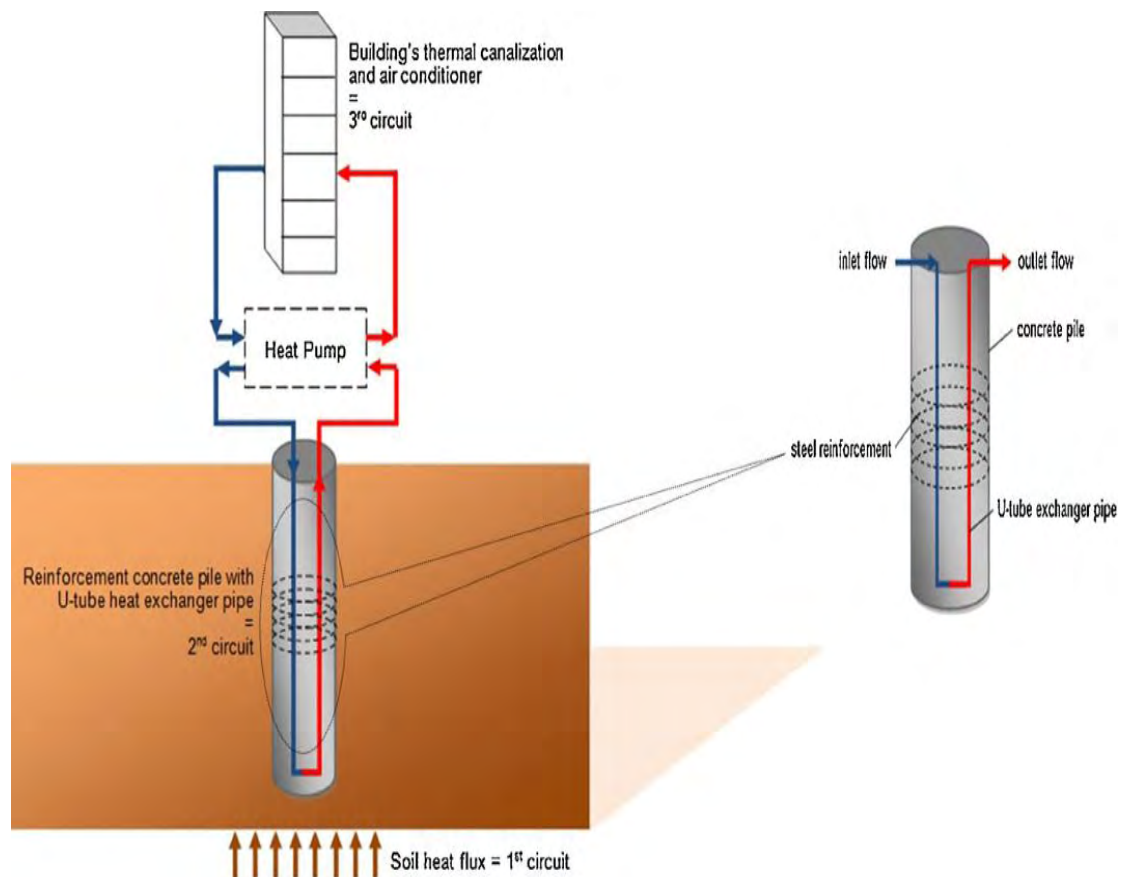
Η τεχνολογία των ενεργειακών θεμελιώσεων έχει εφαρμοστεί τις τελευταίες δεκαετίες σε πολλές κατασκευές σε Ευρωπαϊκές χώρες. Ορισμένα παραδείγματα είναι:

- 1) Ο πύργος της Φρανκφούρτης στη Γερμανία, ο οποίος κατασκευάστηκε το 1999 και χρησιμοποιεί 112 ενεργειακούς πασσάλους.
- 2) Το κολλέγιο Keble στην Οξφόρδη της Αγγλίας που δημιουργήθηκε το 2001 και αποτελείται από 90 ενεργειακούς πασσάλους, οι οποίοι παράγουν 74 MWh ετήσια θέρμανση και 55 MWh ετήσια ψύξη.
- 3) Το αεροδρόμιο Dock Midfield της Ζυρίχης στην Ελβετία που κατασκευάστηκε το 2003 και περιέχει 306 ενεργειακούς πασσάλους οι οποίοι αποφέρουν 2210 MWh ετήσιας θέρμανσης και 1170 MWh ετήσιας ψύξης.

4) Το τούνελ Lainzer στη Βιέννη της Αυστρίας που έγινε το 2004 και χρησιμοποιεί 59 ενεργειακούς πασσάλους που παράγουν 214 MWh ετήσιας θέρμανσης.

Όλα τα παραπάνω έργα επιβεβαιώνουν ότι τα συστήματα ενεργειακών θεμελιώσεων μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα κάθε χρόνο με τη θέρμανση-ψύξη που επιφέρουν στην κατασκευή παρόλο που στην αρχή με την ενσωμάτωσή τους στην κατασκευή το κόστος είναι μεγαλύτερο. Παραδείγματος χάρη οι ενεργειακοί πάσσαλοι που χρησιμοποιούνται στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης εκταμιεύουν περίπου 36.900 ευρώ σε σύγκριση με μια τυπική κατασκευή αεροδρομίου με το κόστος της κιλοβατώρας να κυμαίνεται στα €0.04/kWh. (Suryatriyastuti et al., 2012)

Παρά την επιτυχή εφαρμογή των ενεργειακών θεμελιώσεων υπάρχουν δύο κύρια προβλήματα που πρέπει να εξεταστούν για αυτή την τεχνολογία. Το πρώτο αφορά τη βιωσιμότητα της θερμικής χωρητικότητας στο σύστημα και το δεύτερο τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. μεταβολή φέρουσας ικανότητας, πρόσθετες καθιζήσεις) υπό την επιβολή των θερμοκρασιακών μεταβολών. Λόγω της αβεβαιότητας όσον αφορά τη θερμο-μηχανική συμπεριφορά των κατασκευών αυτών, ο σχεδιασμός τους γίνεται χρησιμοποιώντας σημαντικά μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας από τις συμβατικές (μη θερμικά ενεργές) κατασκευές, αυξάνοντας το κόστος κατασκευής.



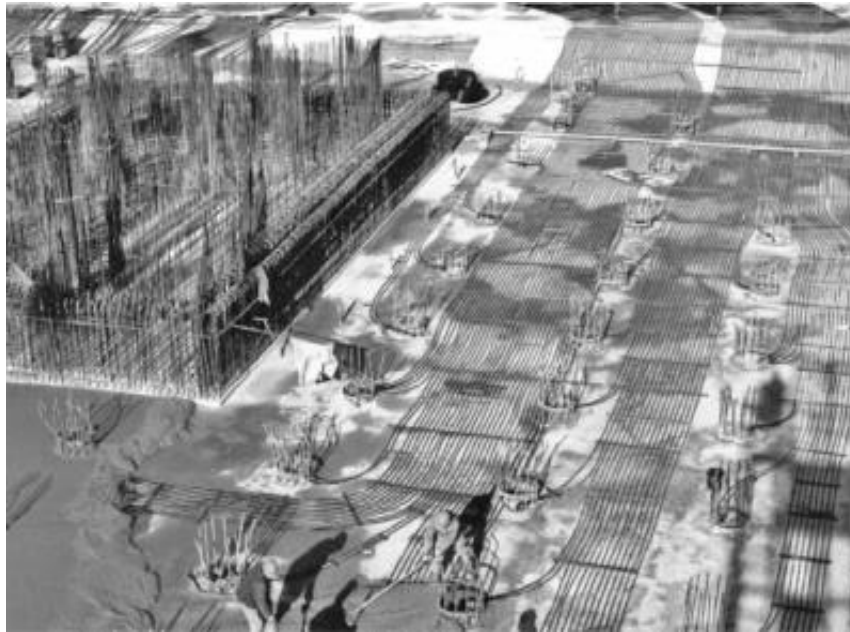
Σχήμα 2.1.2) Κύρια τμήματα συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με ενεργειακούς πασσάλους (Suryatriyastuti et al., 2012)

2.2) Τα συστήματα λειτουργίας και η αποδοτικότητα των ενεργειακών πασσάλων

Ένα σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με ενεργειακούς πασσάλους περιλαμβάνει τρία κύρια μέρη (βλ. Σχήμα 2.1.2). Το πρώτο μέρος είναι το έδαφος, το οποίο αποτελεί μία πηγή θερμότητας κατά την περίοδο του χειμώνα, κατά τη διάρκεια του οποίου αντλείται ενέργεια από το έδαφος για τη θέρμανση του κτιρίου. Η αντίστροφη διαδικασία εκτελείται κατά τη διάρκεια της εποχής του καλοκαιριού, κατά την οποία δηλαδή η θερμότητα επιστρέφεται στο έδαφος, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη επαναφόρτιση της ενέργειας του εδάφους αλλά και την ψύξη του κτιρίου (Suryatriyastuti et al., 2012). Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει ένα κλειστό κύκλωμα γεωεναλλακτών, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο σκυρόδεμα και αποτελούν πλαστικούς σωλήνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας, με διάμετρο 20 ή 25 mm. Οι σωλήνες αυτοί αναδιπλώνονται προκειμένου να σχηματιστούν ξεχωριστά κλειστά πηνία ή βρόχους και χρησιμοποιούνται ως μεταφορείς θερμότητας μέσω των ρευστών που διακινούν, με σκοπό την ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο έδαφος και στο κτίριο (Brandl, 2006). Τα ρευστά που χρησιμοποιούνται ως μεταφορείς θερμότητας αποτελούνται από νερό, ενώ παράλληλα περιέχουν ένα αντιψυκτικό διάλυμα. Ως εκ τούτου, μείγματα γλυκόλης νερού αποτελούν την καλύτερη λύση, επειδή ακριβώς περιέχουν πρόσθετα, τα οποία αποτρέπουν τη διάβρωση στην κεφαλή των βαλβίδων της αντλίας θερμότητας (Suryatriyastuti et al., 2012). Αυτοί οι πλαστικοί σωλήνες είναι δυνατό να στερεωθούν στους ενισχυτικούς κλωβούς των ενεργειακών θεμελιώσεων σε ένα εργοστάσιο ή σε οποιαδήποτε τοποθεσία (βλ. Σχήμα 2.2.1). Επιπλέον, μέσα από την εικόνα (Σχήμα 2.2.1) παρέχεται μια όψη του συστήματος τοποθέτησης γεωεναλλακτών στην υποπεριοχή μιας γενικής κοιτόστρωσης πασσάλων. Σε αυτό το πρωτεύον κύκλωμα που απεικονίζεται συνδέεται ένα δεύτερο κύκλωμα με το οποίο επιτυγχάνεται η διανομή της θερμικής ενέργειας στο κτήριο (Brandl, 2006).



Σχήμα 2.2.1) Τοποθέτηση πλαστικών σωληνώσεων πολυαιθυλενίου στον κλωβό του ενεργειακού πασσάλου (Brandl, 2006)



Σχήμα 2.2.2) Τοποθέτηση γεωεναλλακτών στην υποπεριοχή μιας γενικής κοιτόστρωσης πασσάλων (Brandl, 2006)

Σχετικά με το είδος των γεωεναλλακτών που χρησιμοποιούνται στους ενεργειακούς πασσάλους όπως αναφέρεται στους Suryatriyastuti et al., 2012), αναφέρονται ως παράδειγμα τρία είδη κλειστού βρόγχου σωλήνων απορρόφησης με σχήμα : U, σχήμα διπλού U, σπειροειδή σωλήνα κατά το σχεδιασμό του κτιρίου που κατασκευάστηκε στο Σαπόρο στην Ιαπωνία Το τρίτο μέρος ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας συνίσταται σε ένα κλειστό σύστημα αγωγών θέρμανσης/ψύξης, το οποίο ενσωματώνεται στα δάπεδα και στους τοίχους των κτιρίων (Suryatriyastuti et al., 2012).

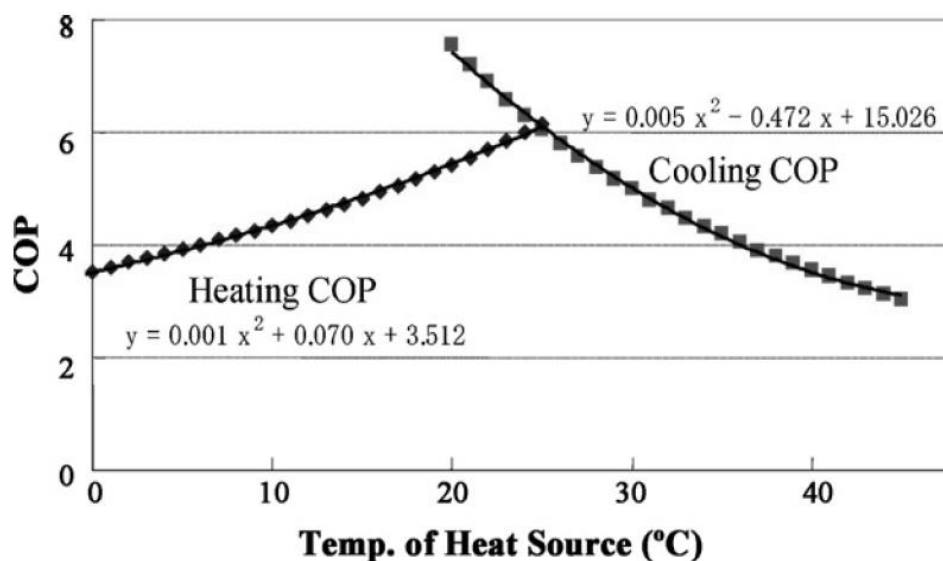
Μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου μέρους του συστήματος τοποθετείται μία αντλία θερμότητας. Η ποσότητα της παραγωγής ενέργειας εξαρτάται από την αποδοτικότητα των αντλιών θερμότητας η οποία περιγράφεται από το συντελεστή απόδοσης (COP). Με τον όρο COP περιγράφεται το ποσοστό της μεταφερόμενης θερμότητας (ψύξη, θέρμανση), η οποία διαιρείται με την καταναλισκόμενη ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα για το συμπιεστή) και κυμαίνεται από 3 έως 6. (Suryatriyastuti et al., 2012)

$$COP_{heat} = \frac{P_{\theta}}{P_{\eta\lambda}} \quad (1)$$

$$COP_{cool} = \frac{P_{\psi}}{P_{\eta\lambda}} \quad (2)$$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερος δείκτης COP συνεπάγεται μεγαλύτερη αποδοτικότητα του συστήματος. Μάλιστα, συνιστάται ότι για μεγαλύτερο ποσοστό παραγόμενης ενέργειας, απαιτείται ο δείκτης του COP να είναι μεγαλύτερος του 4 για τις αντλίες θερμότητας. Ο συντελεστής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας (COP) προσδιορίζεται από πειραματικές μετρήσεις στο εργοστάσιο κατασκευής για συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασιών εισόδου ρευστού στον

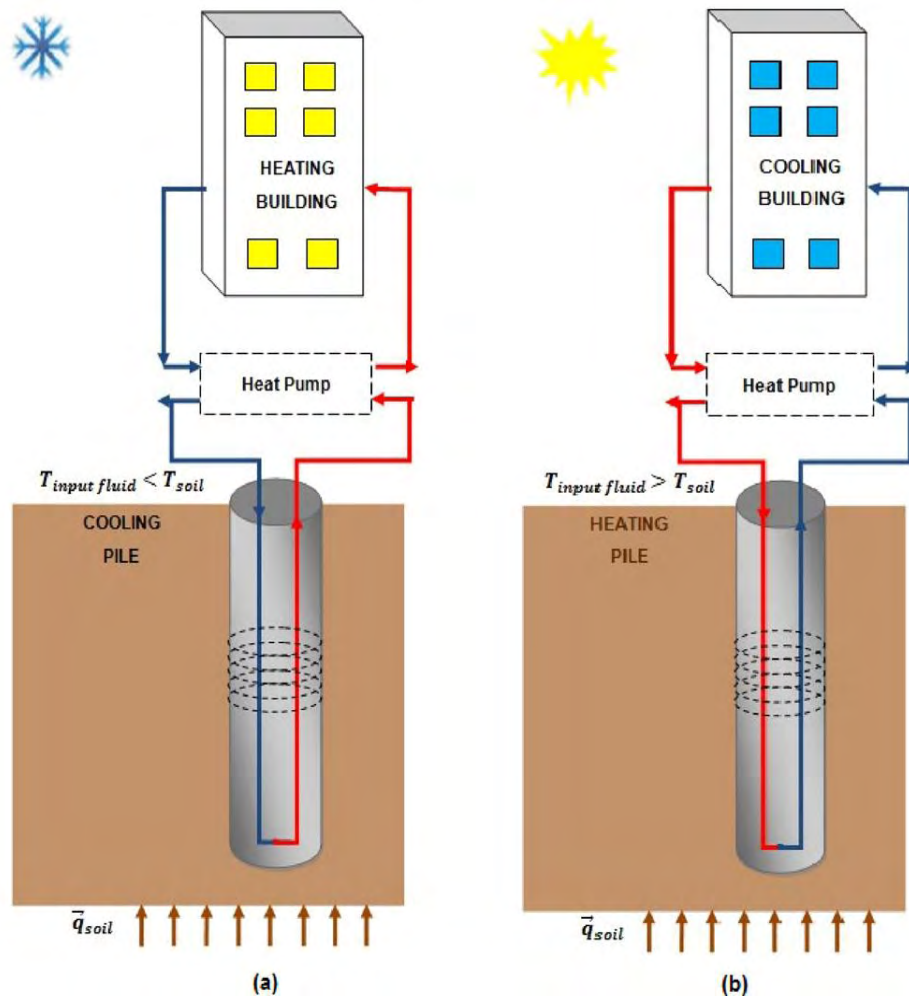
εξατμιστή και συμπυκνωτή και για συγκεκριμένες ταχύτητες κυκλοφορίας των ρευστών. (Φραγκογιάννης 2011)



Σχήμα 2.2.4) Τυπική διακύμανση τιμών COP αντλίας θερμότητας με τη θερμοκρασία του εδάφους (Μπόζης 2011)

Επιπροσθέτως, για την εκτίμηση της αποδοτικότητας ενός θερμικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει μία θερμική αντλία χρησιμοποιείται και ο συντελεστής εποχιακής απόδοσης (SPF). Με αυτόν τον όρο παρουσιάζεται ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας (ψύξη, θέρμανση) ολόκληρου του συστήματος, η οποία διαιρείται με την καταναλισκόμενη ενέργεια του. Ο συντελεστής SPF δεν περιλαμβάνει μόνο την αντλία θέρμανσης αλλά αναφέρεται στη λειτουργία όλων στοιχείων που παράγουν ενέργεια όπως παραδείγματος χάρη τους σωλήνες κυκλοφορίας. Προς το παρόν με τις κανονικές ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας οι τιμές του συντελεστή SPF κυμαίνονται από 3.8 έως 4.3. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ειδικές συσκευές άμεσης εξαέρωσης οι τιμές μπορούν να αυξηθούν κατά 10 έως 15% (Brandl, 2006).

Στην Αυστρία χρησιμοποιούνταν μέχρι το 2006 περίπου 200000 αντλίες θερμότητας και έχει προβλεφθεί ότι ο αριθμός τους αυξάνεται κατά 5000 κάθε χρόνο. Στην αρχή η κύρια χρήση τους περιοριζόταν στην πρόνοια για ζεστό νερό αλλά μετά το έτος 2000 ξεκίνησε και η εκμετάλλευσή τους για την ψύξη ή τη θέρμανση κτηρίων. Υπολογίζεται ότι με τις θερμικές αντλίες που λειτουργούν εξοικονομούνται περίπου 250000 καύσιμα πετρελαίου το χρόνο. (Brandl, 2006)



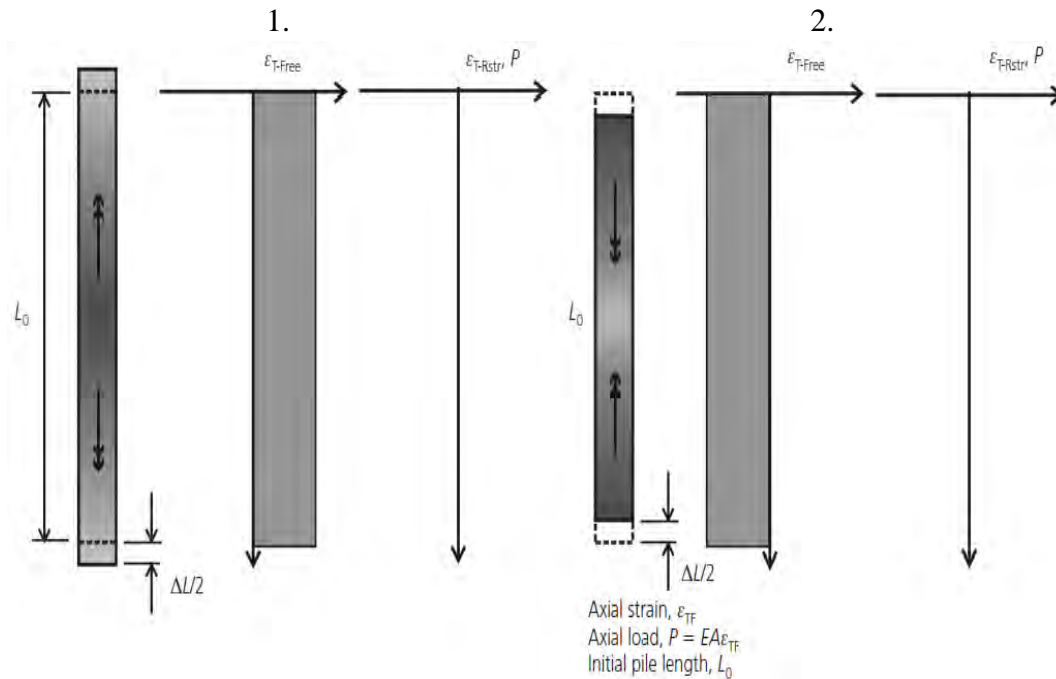
Σχήμα 2.2.5) Εικόνα συστήματος λειτουργίας των ενεργειακών πασσάλων: (a) εκροής ενέργειας και (b) αποθήκευση ενέργειας (Suryatriyastuti et al., 2012)

2.3) Μηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων

Οι ενεργειακοί πάσσαλοι όπως προαναφέρθηκε εκμεταλλεύονται αποτελεσματικά την γεωθερμική ενέργεια με στόχο την οικονομικότερη θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων. Ωστόσο, παρόλο που χρησιμοποιούνται σε διάφορες κατασκευές για περισσότερο από 25 χρόνια χωρίς να έχουν επιφέρει επιζήμιες επιδράσεις στις κατασκευές υπάρχει μέχρι και σήμερα περιορισμένη κατανόηση της θερμομηχανικής τους συμπεριφοράς και λειτουργίας (Amatya et al., 2012).

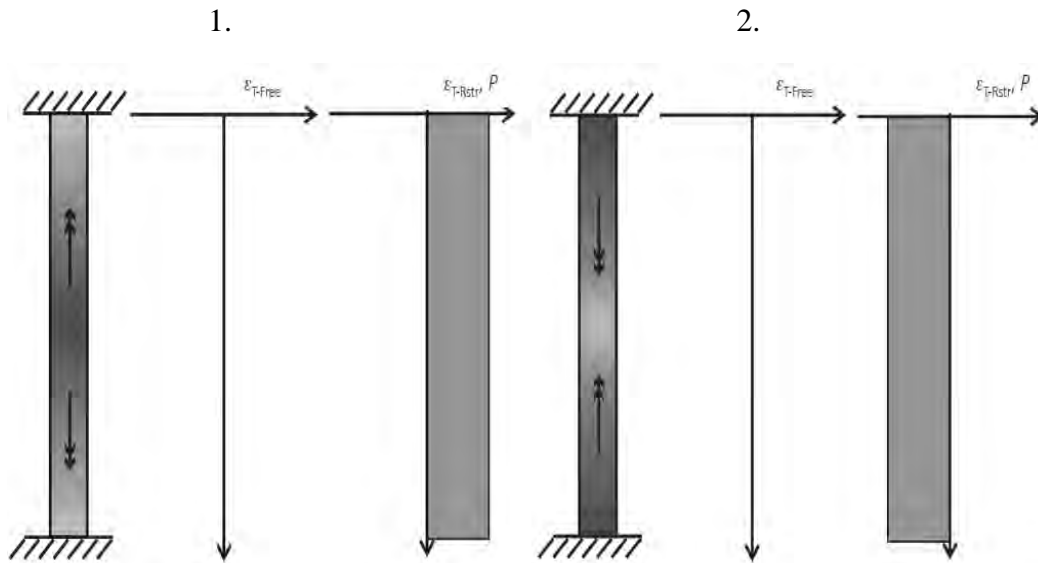
Επιπλέον, σε αυτό το σημείο χρήζει αναφοράς το γεγονός ότι έχει πραγματοποιηθεί μία σειρά από πειράματα και αναλύσεις, οι οποίες εξετάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων (Bourne – Webb et al., 2016, Rotta-Loria et al., 2015, Bourne – Webb et al., 2015, Bodas Freitas et al., 2013, Bourne – Webb et al., 2013, Suryatriyastuti M. et al., 2012, Amatya et al., 2012, Bourne – Webb et al., 2011, Amis et al., 2008, Brandl H., 2006).

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Bourne – Webb et al. (2011) στην περίπτωση που εξετάζεται πάσσαλος, ο οποίος είναι αδέσμευτος και ελεύθερος στις μετακινήσεις του, παρατηρείται μία θερμική ελεύθερη παραμόρφωση, η οποία εμφανίζει συμπεριφορές διαστολής ή συστολής ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διόγκωσης α κατά τη θέρμανση ή την ψύξη που υφίσταται ο πάσσαλος αντίστοιχα και ισούται με $\varepsilon_{(T-Free)} = \alpha \Delta T$. Η θερμική ελεύθερη αυτή παραμόρφωση οδηγεί σε μία αλλαγή της γεωμετρίας του πασσάλου, δηλαδή μία μεταβολή του μήκους του, η οποία ισούται με $\Delta L = L_0 \varepsilon_{T-Free}$, ενώ παράλληλα δημιουργείται και αξονική φόρτιση.



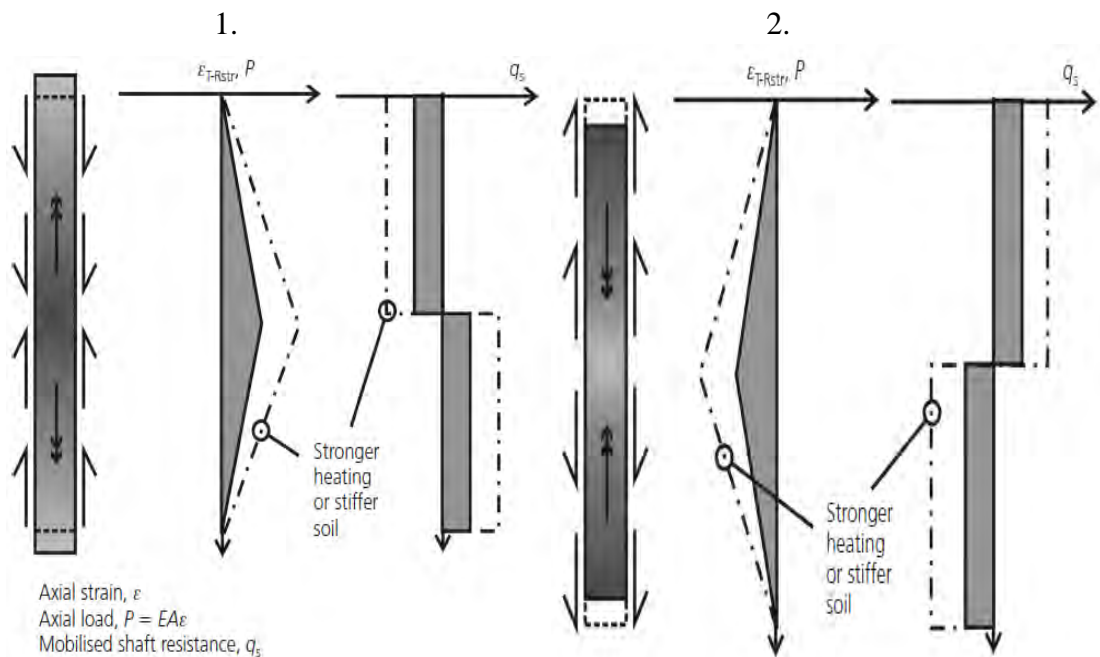
Σχήμα 2.3.1) Συμπεριφορά ελεύθερων πασσάλων στην επιβολή 1) θέρμανσης και 2) ψύξης. Bourne – Webb et al. (2011)

Ωστόσο, στην πραγματικότητα ένας πάσσαλος δεν είναι δυνατό να συμπεριφερθεί ως ένα ελεύθερο σώμα λόγω της δέσμευσης που δέχεται από το έδαφος που το περιβάλλει. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην τριβή που δημιουργείται στη διεπιφάνεια και στην αντίσταση της βάσης, με αποτέλεσμα μέρος της αξονικής παραμόρφωσης που θεωρητικά θα αναπτύσσονταν στο ελεύθερο σύστημα (ε_{T-Free}) να μην μπορεί να αναπτυχθεί. Το μέρος αυτός της θεωρητικής παραμόρφωσης ονομάζεται περιορισμένη παραμόρφωση (ε_{T-Rstr}) και όπως και η ελεύθερη παραμόρφωση μπορεί να είναι θλιπτική ή εφελκυστική. Ο περιορισμός της παραμόρφωσης οδηγεί στην ανάπτυξη αξονικών δυνάμεων στον πάσσαλο οι οποίες, εάν θεωρηθεί γραμμική ελαστική συμπεριφορά του πασσάλου, είναι ίσες προς $P = EA\varepsilon_{T-Rstr}$. Με την επιβολή της θέρμανσης δημιουργείται ένα θλιπτικό φορτίο και με την ψύξη ένα εφελκυστικό.



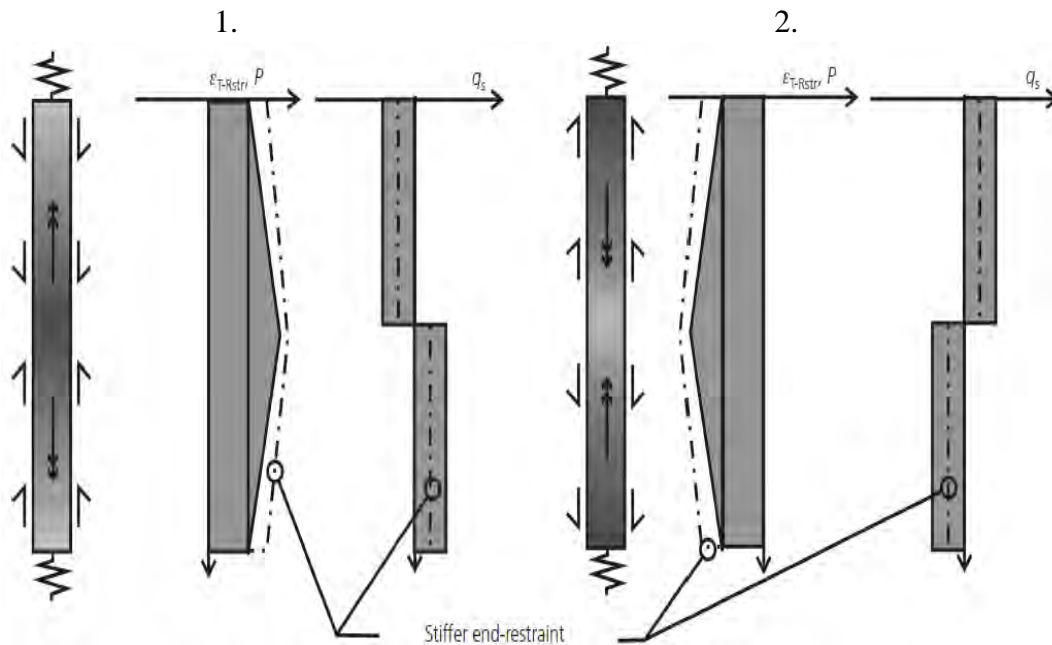
Σχήμα 2.3.2). Συμπεριφορά δεσμευμένων πασσάλων στην επιβολή 1) θέρμανσης και 2) ψύξης. Bourne – Webb et al. (2011)

Επιπλέον, κατά την απουσία επιβολής μηχανικής φόρτισης του ελεύθερου πασσάλου με την παρουσία θέρμανσης παρατηρούνται στο κέντρο του πασσάλου εφελκυστικές παραμορφώσεις, οι οποίες σε συνδυασμό με την τριβή οδηγούν στη δημιουργία αντίθετης φοράς τάσεων (θλιπτικές) στη διεπιφάνεια. Αντίστοιχα, κατά την ψύξη παρατηρείται η αντίστροφη διαδικασία.



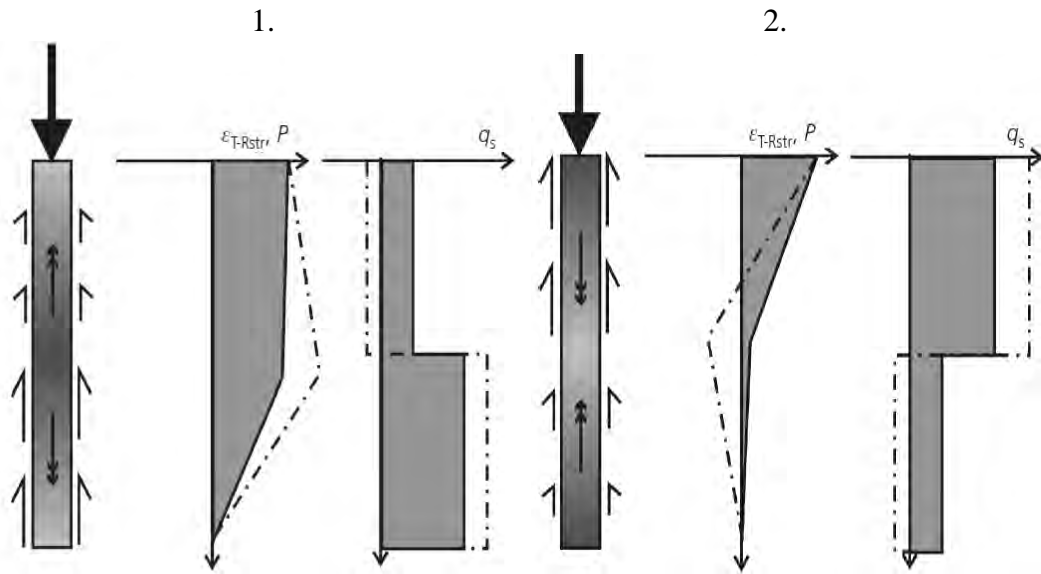
Σχήμα 2.3.3) Συμπεριφορά ελεύθερων πασσάλων στην επιβολή 1) θέρμανσης και 2) ψύξης με την απουσία μηχανικής φόρτισης. Bourne – Webb et al. (2011)

Στην περίπτωση πλήρους δεσμευμένου πασσάλου (π.χ. όταν δεν μπορεί να μετακινηθεί η κεφαλή του λόγω της υπερκείμενης κατασκευής και η αιχμή του είναι σε έδαφος πολύ μεγάλης δυσκαμψίας), οι εφελκυστικές παραμορφώσεις λόγω θέρμανσης μηδενίζονται, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται θλιπτικά φορτία. Σε περιπτώσεις μερικής δέσμευσης των άκρων του πασσάλου, η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση και το αναπτυσσόμενο φορτίο ποικίλλουν ανάλογα με τη σχετική δυσκαμψία των δεσμευμένων άκρων. Εξαιτίας της δεσμευμένης αξονικής παραμόρφωσης, οι διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια είναι μικρότερου μεγέθους σε σύγκριση με αυτές του ελεύθερου πασσάλου. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η δέσμευση στα άκρα, η διατμητική αντοχή θα μειώνεται έως ότου στην ιδεατή περίπτωση του τελείως δεσμευμένου πασσάλου, στον οποίο τα αξονικά φορτία μεγιστοποιούνται και οι διατμητικές τάσεις τείνουν στο μηδέν. Κατά την ψύξη εμφανίζεται η αντίστροφη διαδικασία.



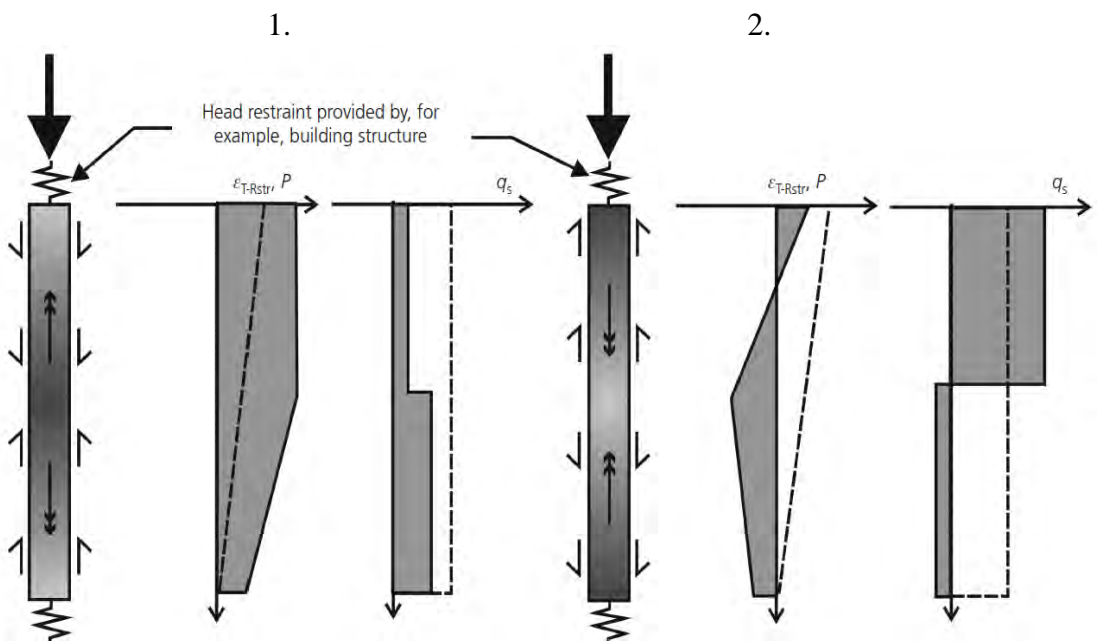
Σχήμα 2.3.4). Συμπεριφορά δεσμευμένων πασσάλων στην επιβολή 1) θέρμανσης και 2) ψύξης με την απουσία μηχανικής φόρτισης. Bourne – Webb et al. (2011)

Στην περίπτωση της παρουσίας μηχανικού φορτίου, η οποία κρίνεται ως η πιο ρεαλιστική συνθήκη, η συμπεριφορά του ελεύθερου πασσάλου μελετήθηκε από τους Bourne – Webb et al. (2009). Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει στο Σχήμα 2.3.5, υπό την επιβολή της θέρμανσης δημιουργούνται διατμητικές τάσεις, οι οποίες οφείλονται στην τριβή στη διεπιφάνεια οι οποίες αυξάνουν το θλιπτικό αξονικό φορτίο. Αντιθέτως, κατά τη διαδικασία της ψύξης οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια επιφέρουν τη μείωση του θλιπτικού αξονικού φορτίου.



Σχήμα 2.3.5) Συμπεριφορά ελεύθερων πασσάλων στην επιβολή 1) θέρμανσης και 2) ψύξης με την παρουσία μηχανικής φόρτισης. Bourne – Webb et al. (2011)

Επιπροσθέτως, στη συνθήκη του πλήρως δεσμευμένου πασσάλου, στην κεφαλή του οποίου επιβάλλεται μηχανικό φορτίο κατά τη θέρμανση, εμφανίζονται διατμητικές τάσεις παρόμοιας φοράς με αυτές της παραπάνω περίπτωσης, γεγονός που συνεπάγεται την αύξηση του μηχανικού φορτίου. Αντίστοιχα, με την παρουσία ψύξης στο δεσμευμένο πάσσαλο εμφανίζονται διατμητικές τάσεις όμοιας φοράς με αυτές της προαναφερθείσας συνθήκης στον ελεύθερο πάσσαλο, με αποτέλεσμα την ελάττωση του μηχανικού φορτίου.



Σχήμα 2.3.6) Συμπεριφορά δεσμευμένων πασσάλων στην επιβολή 1) θέρμανσης και 2) ψύξης με την παρουσία μηχανικής φόρτισης. Bourne – Webb et al. (2011)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός ενεργειακού πασσάλου κατά την επιβολή θέρμανσης ή ψύξης, βασίζεται στην υπόθεση ότι το έδαφος είναι θερμικά αδρανές. Δεν λαμβάνονται δηλαδή υπόψη οι επιδράσεις της θερμικής διαστολής/συστολής του εδάφους στη συμπεριφορά του συστήματος εδάφους-πασσάλου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις οποίες λήφθηκε υπόψη η θερμική συμπεριφορά του εδάφους. Αναλύσεις έγιναν για μεμονωμένους αδέσμευτους ενεργειακούς πασσάλους οι οποίοι υποβλήθηκαν σε κύκλους θέρμανσης-ψύξης και εξετάστηκε η μεταβολή των καθιζήσεων, αξονικών δυνάμεων και διατμητικών τάσεων κατά μήκος τους. Στο τελευταίο κεφάλαιο μελετήθηκε και η περίπτωση ενεργειακών πασσάλων με δεσμευμένη κεφαλή.

3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου είναι στην πραγματικότητα πρόβλημα τριών διαστάσεων. Ωστόσο, στην ειδική περίπτωση μεμονωμένου πασσάλου υπό αξονική φόρτιση, όπως αυτή που θα εξεταστεί παρακάτω, το πρόβλημα ανάγεται σε δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό.

Η αριθμητική ανάλυση που παρουσιάζεται παρακάτω πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS μέσω αξονοσυμμετρικής ανάλυσης. Δημιουργήθηκε ένας δισδιάστατος κάρναβος διαστάσεων 60 μέτρων μήκους και ύψους. Στις περισσότερες αναλύσεις προσομοιώθηκε πάσσαλος μήκους $L = 30$ m και διαμέτρου $D = 1$ m, ωστόσο εξετάστηκαν και άλλα μήκη πασσάλων.

Η συμπεριφορά του πασσάλου προσομοιώθηκε ως γραμμικά ελαστική με χαρακτηριστικά οπλισμένου σκυροδέματος και το έδαφος προσομοιώθηκε ως αμμώδες με μηχανική συμπεριφορά γραμμικά ελαστική – τέλεια πλαστική με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Επιλέχθηκαν οι ακόλουθες μηχανικές παράμετροι: ενεργός γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi = 30^\circ$, φαινόμενο ειδικό βάρος $\gamma = 20$ kN/m³, μέτρο ελαστικότητας $E = 30$ MPa, λόγος του Poisson $\nu = 0.3$ και συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία $K_0 = 1$.

Για την επίλυση του προβλήματος των ενεργειακών πασσάλων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός 3 θερμικών ιδιοτήτων για τον πάσσαλο και το έδαφος πέρα από τις μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες είναι:

1. Συντελεστής θερμικής διόγκωσης (α)
2. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)
3. Ειδική θερμότητα (c_p)

Για τον πάσσαλο σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε συντελεστής θερμικής διόγκωσης $\alpha = 10^{-5}(\text{m/m/K})$ (Bourne-Webb et al 2015), συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 1.8(\text{W/m/K})$ (Suryatriyastuti et al 2012) και ειδική θερμότητα $c_p=1000(\text{J/kg/K})$. Στο αμμώδες εδαφικό προφίλ χρησιμοποιήθηκαν στην πλειάδα των αναλύσεων οι ακόλουθοι συντελεστές θερμική: 1) $\alpha = 3*10^{-5}(\text{m/m/K})$ (Salciarini et al 2014) 2) $\alpha = 1*10^{-5}(\text{m/m/K})$ (Jeong et al 2014), (Rotta Loria et al 2015), 3) $\alpha = 5*10^{-6}(\text{m/m/K})$ (Suryatriyastuti et al 2012), 4) $\alpha = 0(\text{m/m/K})$, συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ (Jeong et al 2014) και συντελεστής ειδικής θερμότητας $c_p = 1200$ (Jeong et al 2014).

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε αρχικά αποτελούταν από τρία διαφορετικά μέρη (parts)

1. Τον πάσσαλο από σκυρόδεμα μήκους 30m και διαμέτρου $D=1\text{m}$
2. Ένα εδαφικό μέρος ίδιων διαστάσεων με τον πάσσαλο
3. Την εδαφική περιοχή μήκους και πλάτους 60m

Ο λόγος δημιουργίας ενός εδαφικού στοιχείου διαστάσεων ίδιο με αυτό του πασσάλου είναι για να μπορούν να εφαρμοστούν στο πρώτο βήμα της ανάλυσης στην εδαφική περιοχή οι γεωστατικές τάσεις του εδάφους, πριν από την τοποθέτηση του πασσάλου.

Οι τυπικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του εδάφους και του πασσάλου που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική προσομοίωση του προβλήματος, όπως ορισμένοι από αυτούς αναφέρθηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται στους δύο παρακάτω πίνακες.

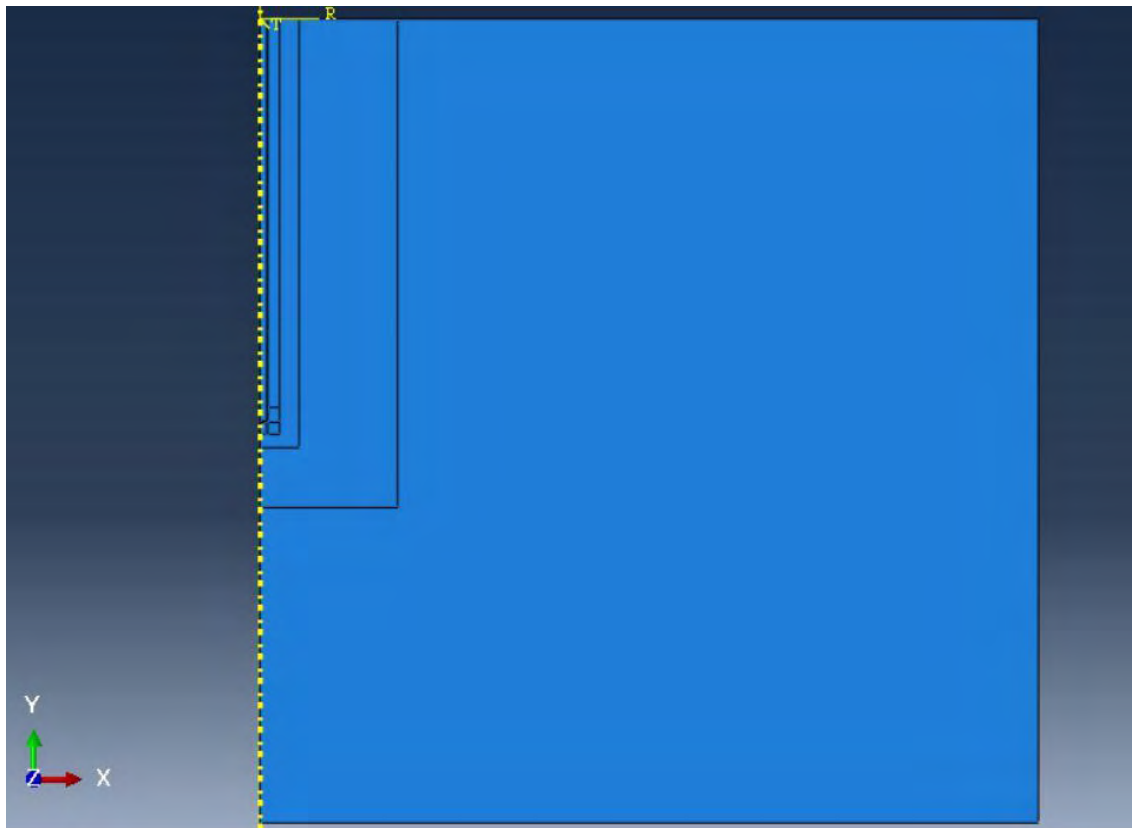
Πίνακας 1. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του εδάφους

Αμμώδες εδαφικό προφίλ	Χαρακτηριστικά
Μέτρο ελαστικότητας	E: 30 (MPa)
λόγος Poisson	ν : 0.3
Πυκνότητα	ρ : 1.019368 (kg/m ³)
Ειδικό βάρος	γ : 20 (kN/m ³)
Γωνία διατμητικής αντοχής	ϕ : 30°
Συνεκτικότητα εδάφους	c: 1 (kPa)
Γωνία διασταλτικότητας	ψ : 0.1°
Συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία	K_0 : 1
Συντελεστής θερμικής διόγκωσης	α : $3*10^{-5}$ (m/m/K)
Συντελεστής ειδικής θερμότητας	c_p : 1200 (J/kg/K)
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	λ : 2.5 (W/m/K)

Πίνακας 2. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του πάσσαλου

Πάσσαλος σκυροδέματος	Χαρακτηριστικά
Μέτρο ελαστικότητας	E: 29000 (MPa)
λόγος Poisson	ν : 0.1
Πυκνότητα	ρ : 1.52905 (kg/m ³)
Ειδικό βάρος	γ : 25 (KN/m ³)
Συντελεστής θερμικής διόγκωσης	α : $1 \cdot 10^{-5}$ (m/m/K)
Συντελεστής ειδικής θερμότητας	c_p : 1000 (J/kg/K)
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	λ : 1.8 (W/m/K)

Οι παραπάνω ιδιότητες προσδιορίστηκαν στο πρόγραμμα μέσω της επιλογής materials. Στον πάσσαλο αποδοθήκαν τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, ενώ στα υπόλοιπα δύο τα εδαφικά μέρη (τον πάσσαλο με χαρακτηριστικά εδάφους και το έδαφος). Από τα παραπάνω τμήματα συντέθηκε τελικώς το μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης με την επιλογή Assembly του προγράμματος



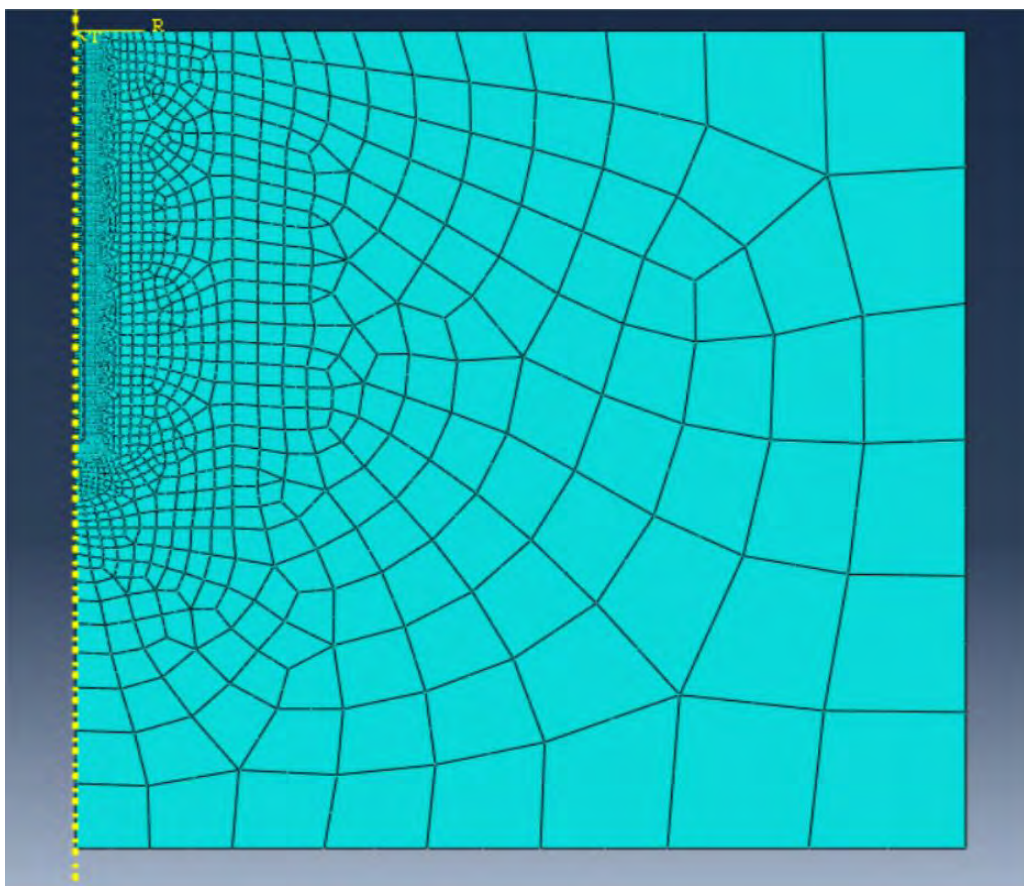
Σχήμα 3.1) Κατασκευή μοντέλου στο Assembly

Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική ανάλυση παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα και έχει μήκος και πλάτος ίσο με 60 μέτρα. Ο κάνναβος αποτελείται από στοιχεία, τα οποία είναι τετράδωμα (quad) με τετραγωνική γεωμετρική σειρά, ελεύθερη δομή και ανήκουν στην οικογένεια αξονοσυμμετρικής τάσης. Για τον καθορισμό των κόμβων στην περιοχή του πασσάλου χρησιμοποιήθηκε διακριτοποίηση της τάξης 0.2 μέτρων, ενώ στην περιοχή του εδαφικού προφίλ επιλέχθηκε διακριτοποίηση, η οποία ξεκινάει από 0.1 έως 0.2 μέτρα στην περιοχή περιμετρικά του πασσάλου και καταλήγει μέχρι τα 5 έως 10 μέτρα στην άκρη του εδαφικού προφίλ μακριά από τον πάσσαλο. Γενικότερα, στην περιοχή γύρω από τον πάσσαλο αλλά και κοντά στη βάση του επιζητείται μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, η διακριτοποίηση σε αυτήν την περιοχή συνίσταται να είναι πιο πυκνή σε αντίθεση με τα άκρα του εδαφικού στοιχείου.

Συγκεκριμένα, ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων σε κάθε τμήμα είναι:

- 1) Ο πάσσαλος αποτελείται από 600 στοιχεία και από 2109 κόμβους.
- 2) Ο εδαφικός πάσσαλος αποτελείται από 600 στοιχεία και από 2109 κόμβους.
- 3) Η εδαφική περιοχή αποτελείται από 2147 στοιχεία και από 6628 κόμβους.

Οπότε, συνολικά δημιουργήθηκαν 3347 πεπερασμένα στοιχεία και 10846 κόμβοι για την επίλυση του προβλήματος αριθμητικής ανάλυσης.



Σχήμα 3.2) Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων μεμονωμένου πασσάλου

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δύο συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) στο εδαφικό προφίλ για τη δέσμευση του μοντέλου. Η πρώτη συνοριακή συνθήκη δεσμεύει τη βάση του εδαφικού προφίλ ως προς την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση (άρθρωση), ενώ η δεύτερη την αριστερή και δεξιά πλευρά του εδάφους μόνο ως προς την οριζόντια διεύθυνση (κύλιση).

Η διεπιφάνεια εδάφους πασσάλου μοντελοποιήθηκε με την τεχνική ‘penalty’, με γωνία τριβής ίση με τη γωνία διατμητικής αντοχής του εδάφους και με περιορισμό να μην επιτρέπεται ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο επιφανειών. Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε η αγωγιμότητα της διεπιφάνειας και δημιουργήθηκε η αντίστοιχη αλληλεπίδραση (interaction) για την εισαγωγή της στην ανάλυση.

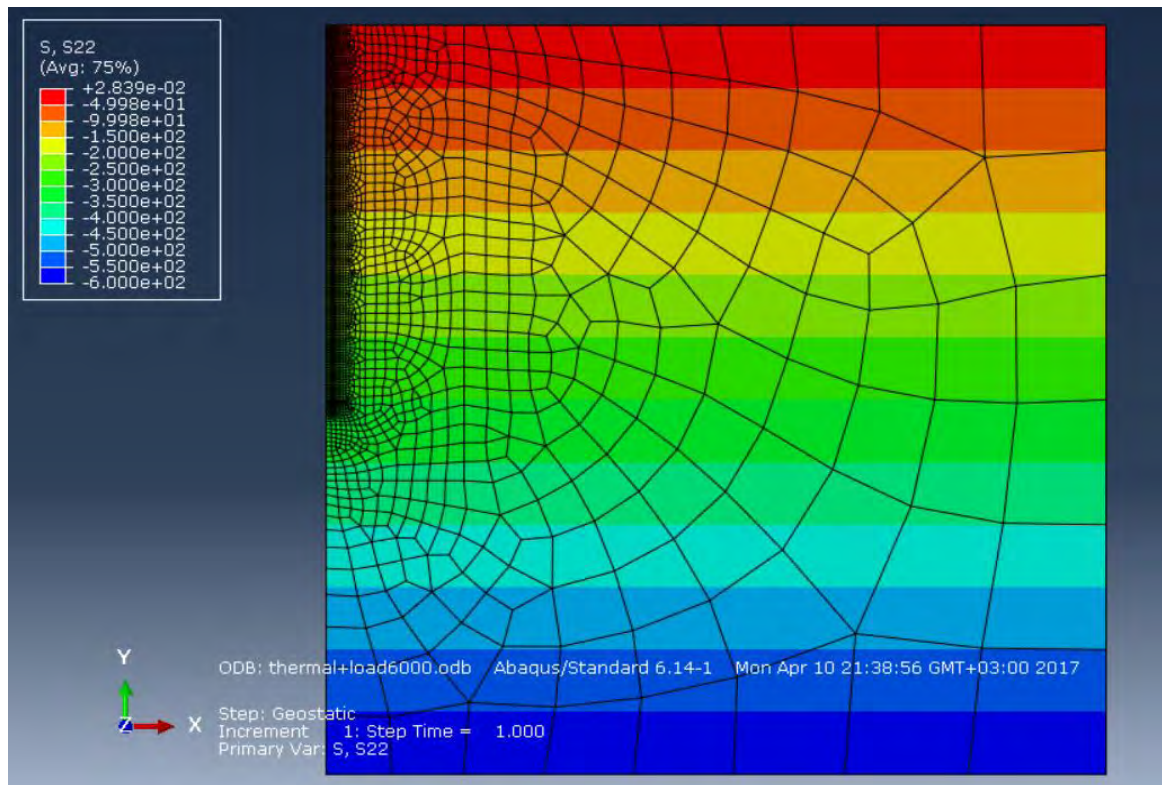
Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι αλληλεπιδράσεις (interactions) του μοντέλου κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν:

- 1) Μια αλληλεπίδραση διαγραφής του πασσάλου από σκυρόδεμα.
- 2) Μια αλληλεπίδραση εμφάνισης του τμήματος του πασσάλου, ο οποίος τοποθετείται στη θέση του εδαφικού πασσάλου.
- 3) Μια αλληλεπίδραση διαγραφής του εδαφικού πασσάλου.
- 4) Δύο αλληλεπιδράσεις δημιουργίας των ιδιοτήτων των διεπιφανειών μεταξύ των τμημάτων (δηλαδή μια μεταξύ του εδαφικού πασσάλου και της υπόλοιπης αμμώδους επιφάνειας και μια μεταξύ του πασσάλου σκυροδέματος και του εδαφικού προφίλ).

Στις αλληλεπιδράσεις δημιουργίας των ιδιοτήτων των διεπιφανειών μεταξύ των τμημάτων τοποθετήθηκε ως διατύπωση ολίσθησης το small sliding και επιλέχθηκε ως master surface (κύρια επιφάνεια) η επιφάνεια τομής του εκάστοτε πασσάλου (εδαφικού ή από σκυρόδεμα) και ως slave surface (δευτερεύουσα επιφάνεια η επιφάνεια τομής του εδάφους).

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τρία προκαθορισμένα πεδία (predefined fields):

- 1) Για την επιβολή των προκαθορισμένων γεωστατικών τάσεων, στο οποίο τοποθετήθηκαν οι γεωστατικές τάσεις στην κορυφή και στη βάση του εδαφικού προφίλ (0 και 600 kPa) αντίστοιχα όπως αυτές υπολογίστηκαν σε στραγγισμένες συνθήκες. Ισχύει ότι στη βάση του εδαφικού προφίλ οι γεωστατικές τάσεις ισούνται με $\sigma_v = \gamma' * z = 10 * 60 = 600 \text{ kPa}$.
- 2) Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας σε όλη το εδαφικό προφίλ και τον πάσσαλο, στην αρχή όλων των αναλύσεων πριν την επιβολή του θερμικού κύκλου στον πάσσαλο, η οποία ορίστηκε στους 15°C.
- 3) Για την εισαγωγή των δεδομένων που προέκυψαν από τη θερμική ανάλυση (ψύξη, θέρμανση) του πασσάλου, δηλαδή τα αρχεία (ODB) των θερμικών πεδίων που δημιουργήθηκαν στις θερμικές αναλύσεις.



Σχήμα 3.3) Κατανομή γεωστατικών τάσεων

Επιπρόσθετα, τοποθετήθηκαν στην επιλογή φόρτιση (loading) 2 φορτίσεις:

- 1) Για τον προσδιορισμό και την επαλήθευση των αρχικών γεωστατικών τάσεων τοποθετήθηκε σε όλο το προφίλ βαρύτητα μέτρου $9.81 \text{ m}^2\text{s}$.
- 2) Για την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης προστέθηκε στο κέντρο της κεφαλής του πασσάλου (σημείο 0,0 για αξονοσυμμετρική ανάλυση) φορτίο 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 kN ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε ανάλυσης.

Τέλος, δημιουργήθηκαν τα απαραίτητα βήματα ανάλυσης (steps):

- 1) Το αρχικό βήμα (initial step), το οποίο εισάγεται αυτόματα από το πρόγραμμα.
- 2) Το βήμα επιβολής των γεωστατικών τάσεων. Σε αυτό το βήμα τοποθετούνται η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδαφικού πασσάλου και της εδαφικής περιοχής καθώς και η αλληλεπίδραση κατάργησης του πασσάλου.
- 3) Το βήμα διαγραφής του πασσάλου και τοποθέτησης του πασσάλου από σκυρόδεμα και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διεπιφανειών τους.
- 4) Το βήμα αξονικής φόρτισης του πασσάλου με επιβολή του εκάστοτε μηχανικού φορτίου που καθορίστηκε ως (static general).
- 5) Το βήμα της επιβολής της ψύξης του πασσάλου με $\Delta T = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ στους $0 \text{ }^\circ\text{C}$, κατά το οποίο εισάγεται ως προκαθορισμένο πεδίο η θερμική συμπεριφορά του πασσάλου και του εδάφους στην ψύξη, όπως αυτή προέκυψε στη θερμική ανάλυση.

- 6) Το μετέπειτα βήμα της επιβολής της θέρμανσης του πασσάλου με $\Delta T = +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, κατά το οποίο εισάγεται ως προκαθορισμένο πεδίο η θερμική συμπεριφορά του πασσάλου και του εδάφους στη θέρμανση, όπως αυτή προέκυψε στη θερμική ανάλυση.
- 7) Το τελικό βήμα της επιβολής της ψύξης του πασσάλου με $\Delta T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ για επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία των $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, στο οποίο εισάγεται ως προκαθορισμένο πεδίο η θερμική συμπεριφορά του πασσάλου και του εδάφους στην ψύξη, όπως αυτή προέκυψε στη θερμική ανάλυση.

Η θερμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε ξεχωριστή ανάλυση, με 2 μέρη (parts) του πασσάλου και της εδαφικής περιοχής. Τα βήματα (steps) προσδιορίστηκαν ως τύπου μεταφοράς θερμότητας (heat transfer) σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady state) καθώς και σε προκαθορισμένες συνθήκες μη μόνιμης ροής (transient state) και παρατίθενται παρακάτω:

- 1) Το βήμα της επιβολής της ψύξης του πασσάλου με $\Delta T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 2) Το βήμα της επιβολής της θέρμανσης του πασσάλου με $\Delta T = +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3) Το βήμα της επιβολής της ψύξης του πασσάλου με $\Delta T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ για επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία των $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Η θερμική ανάλυση εκτελέστηκε στον ίδιο κάρναβο, με τις ίδιες αλληλεπιδράσεις (interactions). Ως προεπιλεγμένο πεδίο (predefined field) καθορίστηκε η αρχική θερμοκρασία του πασσάλου και του εδαφικού προφίλ στους $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο συνοριακές συνθήκες που στο εδαφικό προφίλ:

- 1) Για την διατήρηση της θερμοκρασίας στους $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ στη βάση και στη δεξιά άκρη του εδαφικού προφίλ.
- 2) Για την επιβολή των τριών κύκλων φόρτισης, δηλαδή ψύξης του πασσάλου στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο (βήμα 1), θέρμανσης του πασσάλου στους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο (βήμα 2), και ψύξης του πασσάλου για επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία των $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο (βήμα 3).

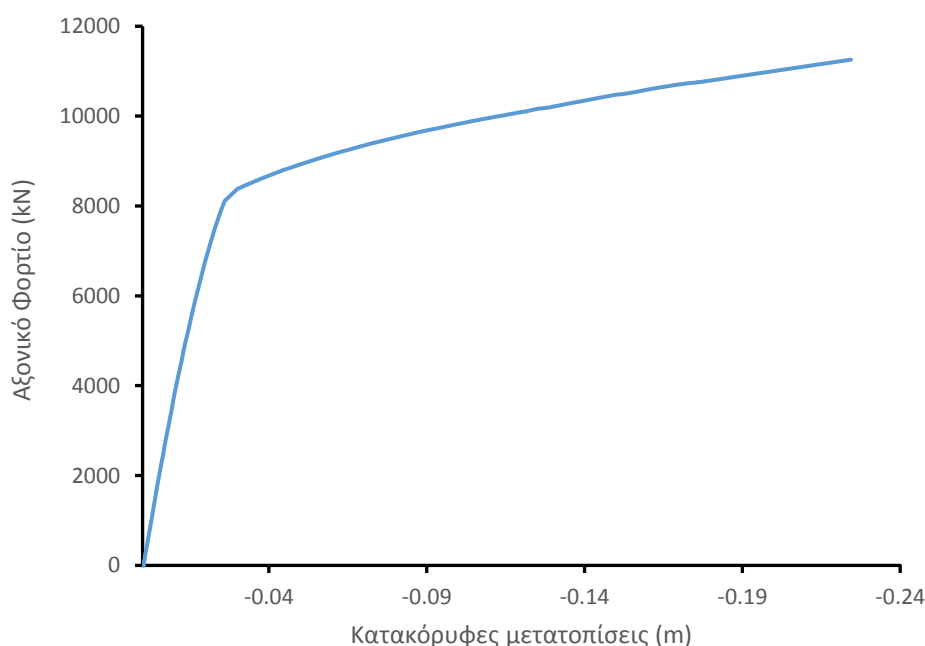
Οι αναλύσεις μη-μόνιμης ροής (transient state) πραγματοποιήθηκαν για χρονική περίοδο 1 ημέρας, 1 εβδομάδας, 1 μήνα και 6 μηνών (στο πρόγραμμα εισάγονται με τη μορφή δευτερολέπτων). Οι αναλύσεις που ολοκληρώθηκαν εμπεριέχουν ένα κύκλο θέρμανσης με αρχική ψύξη του πασσάλου από την αρχική θερμοκρασία $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ με $\Delta T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, μετέπειτα θέρμανση του πασσάλου με $\Delta T = +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ και τελική ψύξη του πασσάλου με $\Delta T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ με στόχο την επιστροφή του στην αρχική θερμοκρασία. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε μια ξεχωριστή θερμική ανάλυση, με ένα θερμοκρασιακό βήμα, για θέρμανση του πασσάλου από την αρχική του θερμοκρασία των $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ με $\Delta T = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχη με την παραπάνω ανάλυση.

Η τελική αριθμητική ανάλυση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πραγματοποιήθηκε για μηχανική φόρτιση της κεφαλής του μεμονωμένου πασσάλου υπό τις φορτίσεις (1000 kN, 2000 kN, 3000 kN, 4000 kN, 5000 kN, 6000 kN, 7000 kN) καθώς και χωρίς φόρτιση (0 kN) με την παρουσία των θερμικών κύκλων ψύξης και θέρμανσης του πασσάλου ενώ υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στο

κέντρο του πασσάλου, η πλευρική τριβή που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια και οι αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου. Επίσης, υπολογίστηκε η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου γύρω στα 12000 kN. Τα περισσότερα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω είναι για απουσία μηχανικής φόρτισης, προκειμένου να παρουσιαστεί η φυσική συμπεριφορά του πασσάλου με τις θερμικές μεταβολές αλλά και η μεταβολή των εξεταζόμενων μεγεθών καθώς επίσης και για φόρτιση 6000 kN που επιλέχτηκε ως φορτίο λειτουργίας του πασσάλου.

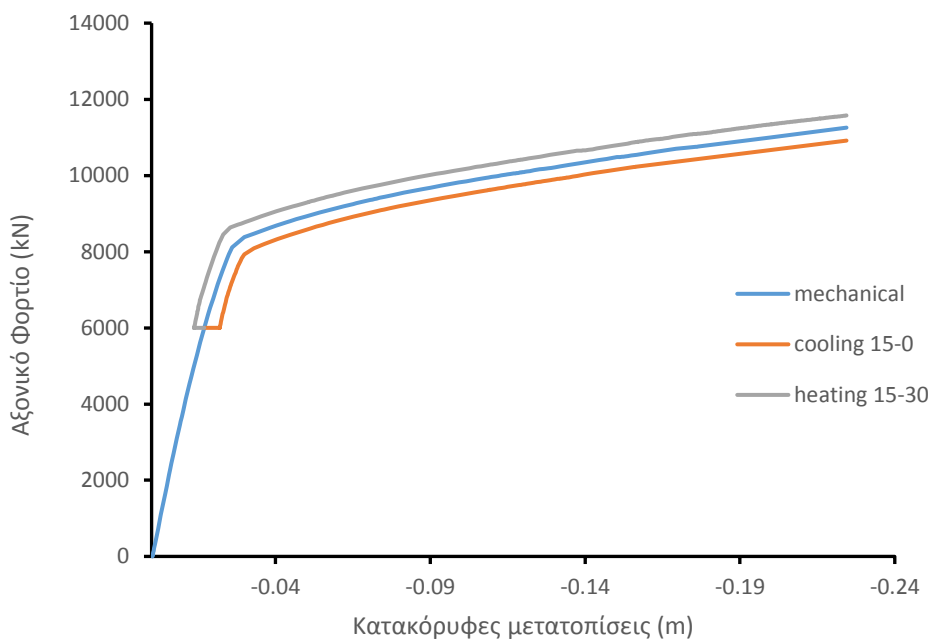
4. Προσδιορισμός Καμπύλης Φορτίου-Μετατόπισης

Το οριακό αξονικό φορτίο (φέρουσα ικανότητα) μεμονωμένου πασσάλου αντιστοιχεί σε κατάσταση πλήρους ανάπτυξης των μηχανισμών αντίστασης του περιβάλλοντος εδάφους. Η συνολική αυτή αντίσταση προκύπτει ως άθροισμα της οριακής πλευρικής αντίστασης και της οριακής αντίστασης αιχμής του πασσάλου.



Σχήμα 4.1) Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πασσάλου 30m.

Για τον προσδιορισμό του φορτίου λειτουργίας στην κεφαλή του πασσάλου κατά το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι περισσότερες αναλύσεις δημιουργήθηκε η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης που παρουσιάζεται παραπάνω. Από το Σχήμα 4.1 εκτιμήθηκε η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου περίπου στα 12000 kN. Θεωρώντας συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2, ως φορτίο λειτουργίας επιλέγεται αυτό των 6000 kN.

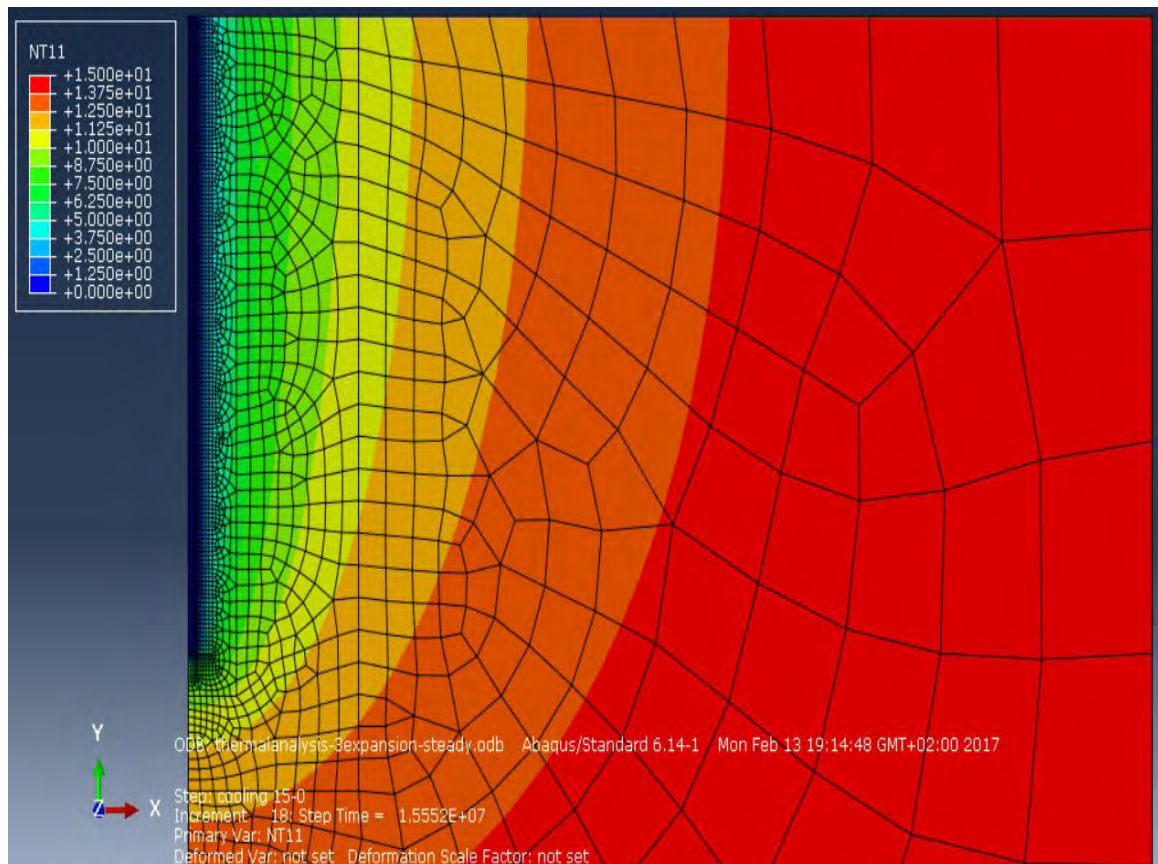


Σχήμα 4.2) Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (ψύξη-θέρμανση)

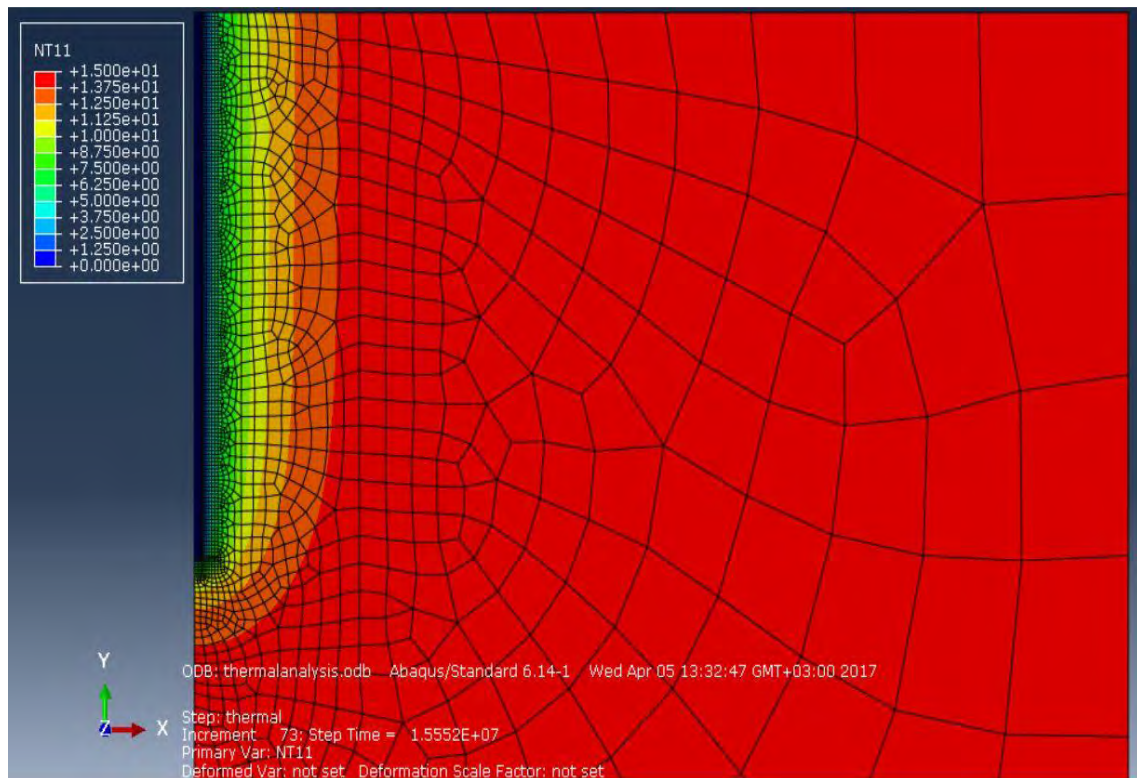
Στο διάγραμμα 4.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου με την επιβολή ψύξης και θέρμανσης. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι για την εκτέλεση της ανάλυσης έπειτα από το βήμα επιβολής της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN δημιουργήθηκε ένα βήμα στο οποίο επιβαλλόταν η εκάστοτε θερμική φόρτιση (ψύξη, θέρμανση) και στη συνέχεια ένα τελικό βήμα που αποτελούταν από την θερμική φόρτιση και ένα μηχανικό φορτίο στο οποίο θα επερχόταν η αστοχία του πασσάλου. Με βάση το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου λόγω του θερμικού φορτίου είναι μικρή: περίπου 3% για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C και επίσης περίπου 3% για θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C. Οι μικρές αυτές μεταβολές εμφανίζονται λόγω της συστολής και διαστολής που υφίσταται το έδαφος γύρω από τον πάσσαλο και ο ίδιος ο πάσσαλος. Κατά τη διάρκεια της ψύξης μειώνονται οι ορθές τάσεις στη διεπιφάνεια, γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, με αποτέλεσμα την μείωση της φέρουσας ικανότητας. Αντίστοιχα, με την επιβολή της θέρμανσης αυξάνονται οι ορθές τάσεις, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της διατμητικής αντοχής, με αποτέλεσμα την αύξηση της φέρουσας ικανότητας. Επιπλέον, αναμένεται ότι μία μεγαλύτερη καθίζηση είναι αναγκαία προκειμένου να σταθεροποιηθεί η αντοχή του αξονικού πασσάλου περισσότερο κατά τη διάρκεια της ψύξης παρά της θέρμανσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συστολή του πασσάλου, όπως αυτή προκύπτει από την ψύξη, η οποία επιφέρει μία επιπλέον αρνητική μετατόπιση, η οποία προστίθεται στην καθίζηση της μηχανικής φόρτισης. Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι παρόμοια αποτελέσματα απαντώνται σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016) για φόρτιση μεμονωμένου πασσάλου σε αργιλικό έδαφος.

5. Παρουσίαση θερμοκρασιακών πεδίων που προέκυψαν από τις θερμικές αναλύσεις

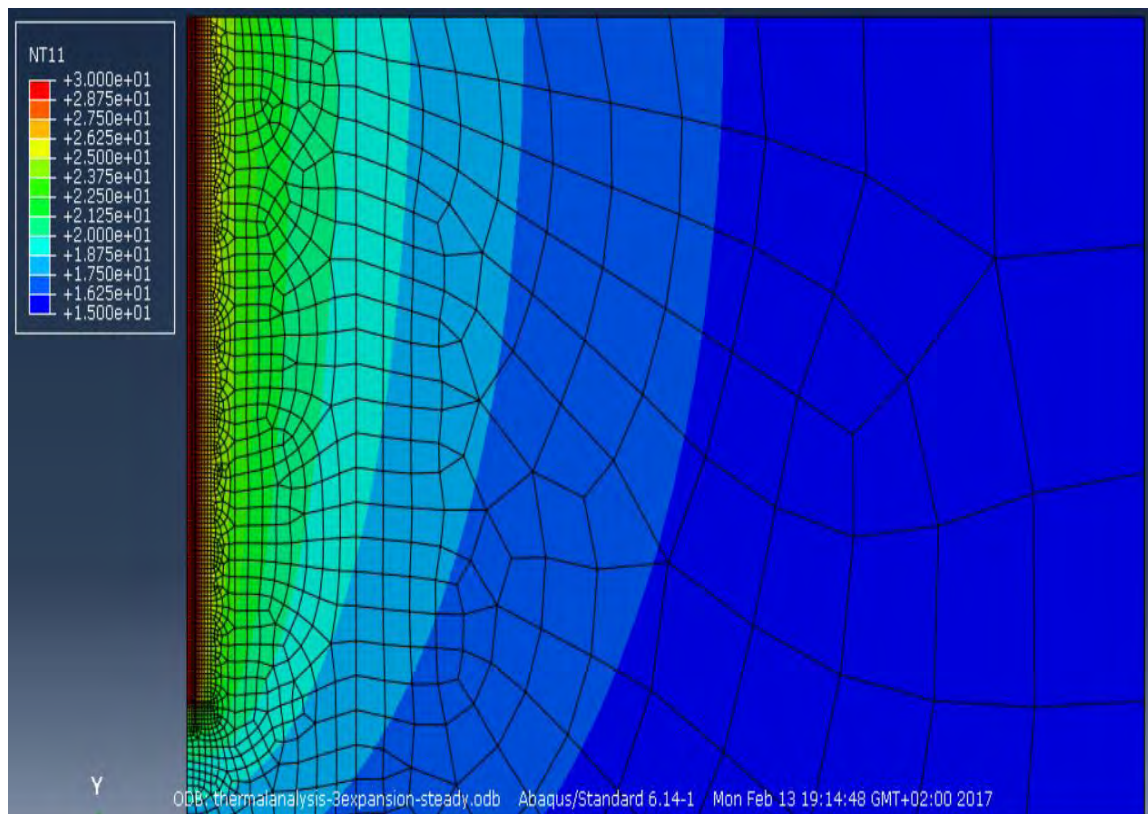
Παρακάτω παρατίθενται τα θερμοκρασιακά πεδία για θέρμανση και ψύξη, όπως αυτά προέκυψαν από τις θερμικές αναλύσεις για συνθήκες steady state (άπειρης χρονικής διάρκειας) και transient state με χρονική διάρκεια 6 μηνών (αποτελέσματα ODB του job). Η μεταβολή του θερμοκρασιακού πεδίου λόγω θέρμανσης ή ψύξης επιδρά καθοριστικά στις υπολογιζόμενες καθιζήσεις, αξονικές δυνάμεις και διατμητικές τάσεις του πασσάλου.



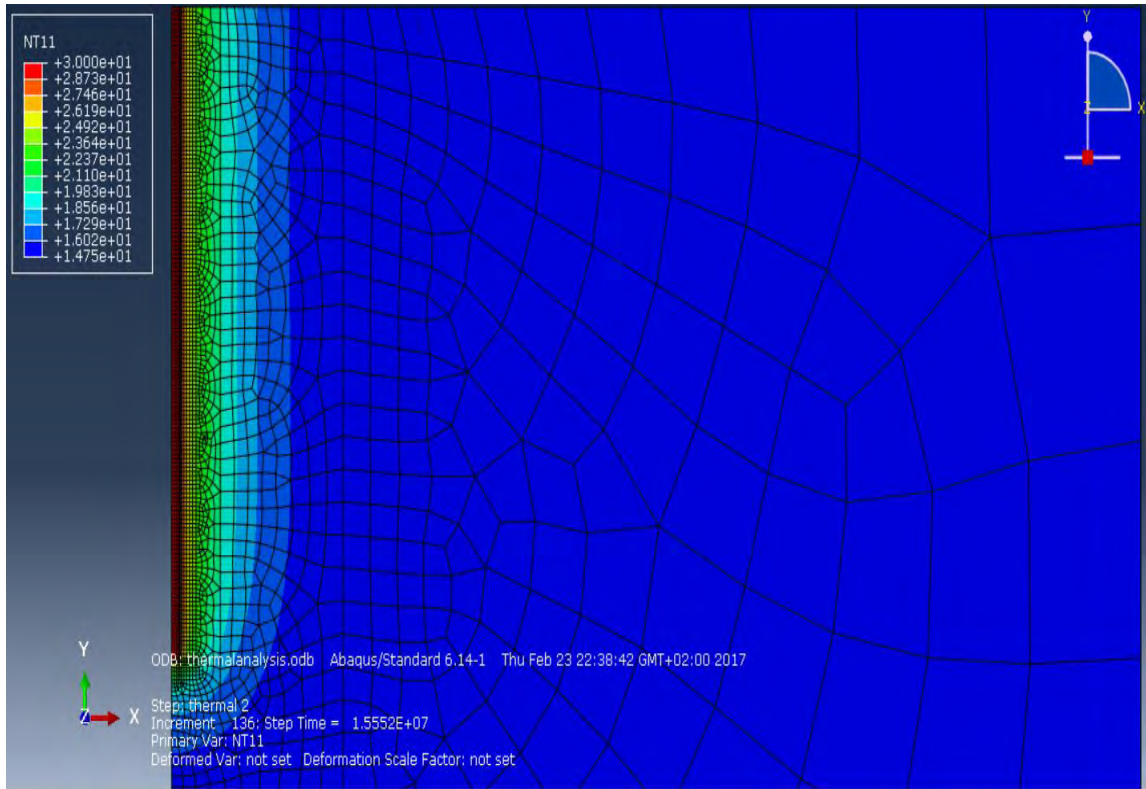
Σχήμα 5.1) Κατανομή θερμοκρασιακών πεδίων για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C steady state



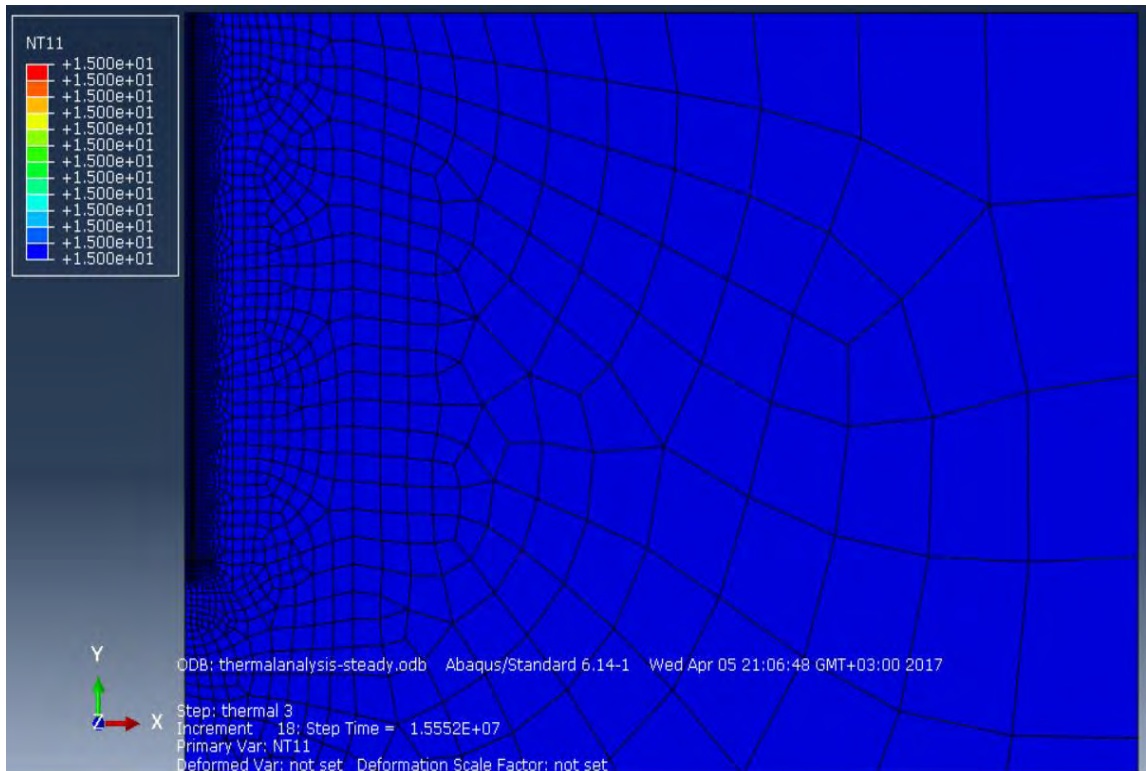
Σχήμα 5.2) Κατανομή θερμοκρασιακών πεδίων για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C transient state (6 μήνες).



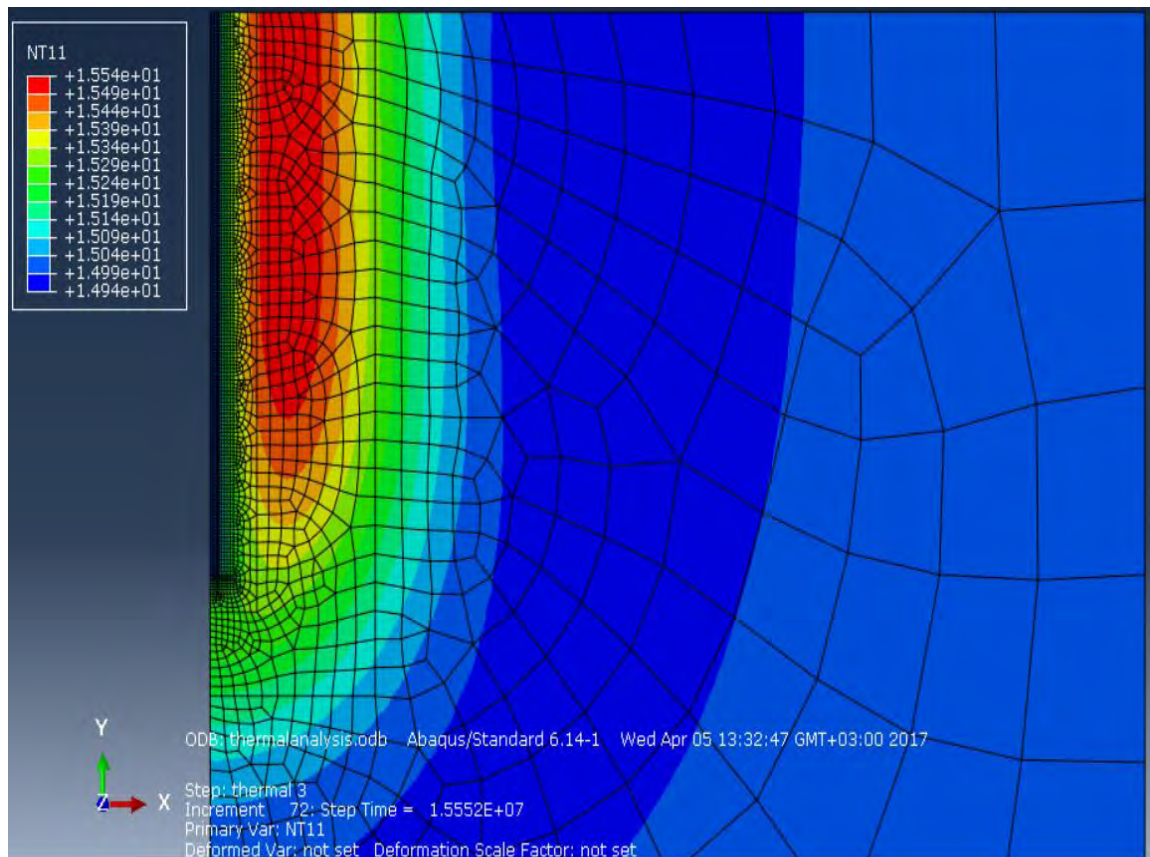
Σχήμα 5.3) Κατανομή θερμοκρασιακών πεδίων για θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C steady state.



Σχήμα 5.4) Κατανομή θερμοκρασιακών πεδίων για θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C transient state (6 μήνες)



Σχήμα 5.5) Κατανομή θερμοκρασιακών πεδίων για την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C steady state.



Σχήμα 5.6) Κατανομή θερμοκρασιακών πεδίων για την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15°C transient state (6 μήνες)

Παρατηρείται ότι η χρονική διάρκεια της θερμικής φόρτισης (ψύξη ή θέρμανση) του πασσάλου επιδρά σημαντικά στην κατανομή των θερμοκρασιών στην εδαφική περιοχή γύρω από τον πάσσαλο. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια του βήματος θερμικής φόρτισης, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο χώρος μεταβολής θερμοκρασίας γύρω από τον πάσσαλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την έρευνα του Rui Assunção (2014) για την επιρροή του χρόνου στα θερμοκρασιακά πεδία. Η κατανομή των θερμοκρασιών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις διακυμάνσεις των καθιζήσεων, διατμητικών τάσεων και αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου.

Επιπλέον, πρέπει να επισημανθεί ότι στις θερμικές αναλύσεις η θερμική φόρτιση προσομοιώθηκε με απευθείας προσδιορισμό (ως συνοριακή συνθήκη) της θερμοκρασίας στους κόμβους στοιχείων του πασσάλου

6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και συγκεκριμένα οι κατακόρυφες μετατοπίσεις και οι αξονικές δυνάμεις του πασσάλου και η πλευρική τριβή της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους. Αρχικά, παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα του πασσάλου, Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις (N) κατά μήκος του πασσάλου, οι οποίες υπολογίστηκαν με την ακόλουθη διαδικασία :

1. Εξαγωγή της κατανομής των κατακόρυφων τάσεων σ_{22} σε οριζόντιες διατομές του πασσάλου (σε αποστάσεις 1m κατά μήκος του πασσάλου) .
2. Υπολογισμός της μέσης κατακόρυφης τάσης σε κάθε διατομή.
3. Πολλαπλασιασμός της μέσης κατακόρυφης τάσης σ_{22} επί το εμβαδό της διατομής του πασσάλου $A = \pi \cdot D^2 = 0.785398$ και υπολογισμός της αξονικής δύναμης.

Τέλος, βρέθηκαν οι τιμές των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων, στη διεπιφάνεια του πασσάλου με το έδαφος, οι οποίες επηρεάζουν την κατανομή των αξονικών δυνάμεων (N).

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται, υπολογίστηκαν για συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους $\alpha_s = 0.00003$ m/m/K (λόγος συντελεστή θερμικής διόγκωσης εδάφους α_s προς συντελεστή θερμικής διόγκωσης πασσάλου α_p : $\alpha_s/\alpha_p = 3$). Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και για τους υπόλοιπους συντελεστές θερμικής διόγκωσης (α) του αμμόδους εδαφικού προφίλ που μελετήθηκαν $\alpha_s = 0.00001, 0.000005, 0$ m/m/K.

Οι περισσότερες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με συνθήκες μη-μόνιμης θερμικής ροής (transient analysis) και βήμα 6 μηνών. Αναλύσεις ωστόσο πραγματοποιήθηκαν και με διαφορετικά βήματα αλλά και με συνθήκες μόνιμης θερμικής ροής (steady state analysis).

Οι επόμενες ενότητες παρουσιάζουν διαγράμματα με τη μεταβολή με το βάθος των κατακόρυφων μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων του πασσάλου, καθώς και των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους. Με τη βοήθεια αυτών των διαγραμμάτων εξετάζονται τα εξής ζητήματα:

- 1) Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και η πλευρική τριβή που παρουσιάζονται για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης. Ειδικότερα, οι καθιζήσεις μελετήθηκαν υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου 0 και 6000 kN ενώ οι αξονικές δυνάμεις και η πλευρική τριβή μελετήθηκαν υπό την επίδραση μηχανικού φορτίου 0, 1000 και 6000 kN. Ο κύκλος θερμικής φόρτισης περιλαμβάνει την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C, τη μετέπειτα θέρμανση του

- πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C και την τελική ψύξη του από τους 30 °C στους 15 °C (επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία του πασσάλου
- 2) Οι διαφορές που αναπτύσσονται στις κατακόρυφες μετατοπίσεις, στις αξονικές δυνάμεις και στην πλευρική τριβή μεταξύ δύο διαφορετικών θερμάνσεων του πασσάλου (της προαναφερθείσας θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C που ανήκει στον κύκλο θερμικής φόρτισης που εφαρμόστηκε με μια ανεξάρτητη θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C).
 - 3) Η επιρροή της επιβαλλόμενης μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου (από 1000 έως 8000 kN για κάθε θερμική μεταβολή που επιβλήθηκε στον πάσσαλο καθώς και για απουσία μηχανικής φόρτισης), στις κατακόρυφες μετατοπίσεις, στις αξονικές δυνάμεις και στην πλευρική τριβή.
 - 4) Η επιρροή της χρονικής διάρκειας του κάθε βήματος της θερμικής ανάλυσης (T) στις κατακόρυφες μετατοπίσεις, στις αξονικές δυνάμεις και στην πλευρική τριβή κατά μήκος του πασσάλου. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι οι χρόνοι, οι οποίοι μελετήθηκαν είναι 1 ώρα, 1 εβδομάδα, 1 μήνας, 6 μήνες και άπειρος (ανάλυση μόνιμης θερμικής ροής – steady state).
 - 5) Η επιρροή της μεταβολής των θερμικών παραμέτρων του εδάφους, δηλαδή του συντελεστή διόγκωσης (α_s), του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ), του συντελεστή ειδικής θερμότητας (c_p). Πιο συγκεκριμένα, αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για i) $\alpha_s/\alpha_p = 0$, $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$, $\alpha_s/\alpha_p = 1$, $\alpha_s/\alpha_p = 3$, ii) $\lambda = 2$ (W/m/K), $\lambda = 2.5$ (W/m/K), $\lambda = 3$ (W/m/K) και iii) $c_p = 1200$ (J/kg/K), $c_p = 3000$ (J/kg/K).
 - 6) Η επιρροή της μεταβολής των μηχανικών παραμέτρων του εδάφους, δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας (E), της γωνίας διατμητικής αντοχής (φ) και του λόγου Poisson. Ειδικότερα, οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν για i) $E = 30$ MPa, $E = 10$ MPa, ii) $\varphi = 30^\circ$, $\varphi = 40^\circ$ και iii) $\nu = 0.3$, $\nu = 0.2$.
 - 7) Η επίδραση ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης του προαναφερθέντος θερμικού κύκλου στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου.
 - 8) Η πιθανή μεταβολή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου κατά μήκος του πασσάλου, λόγω προσομοίωσης της επιφάνειας του εδάφους ως όριο σταθερής θερμοκρασίας αντί αδιαβατικού ορίου.
 - 9) Η επίδραση του μήκους του πασσάλου στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου υπό την επιβολή των προαναφερθέντων θερμικών φορτίσεων.
 - 10) Η επίδραση δέσμευσης της κεφαλής του πασσάλου που απαγορεύει την κατακόρυφη κίνηση του στα αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου που προκύπτουν για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης.

Ενεργειακός πάσσαλος με ελεύθερη κεφαλή και χωρίς μηχανικό φορτίο, υπό μη-μόνιμες θερμικές συνθήκες

Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά την απουσία μηχανικού φορτίου στην κεφαλή αναμένονται να είναι:

- Αρνητικές στο πάνω μέρος του πασσάλου και θετικές στο κάτω μέρος του, κατά την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C, λόγω της ιδιότητας του να συστέλλεται όταν ψυχθεί. Πιο συγκεκριμένα, στην κεφαλή του πασσάλου αναμένεται η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης να είναι αρνητική, όπως υπολογίστηκε και στην έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016).
- Θετικές στο άνω τμήμα του πασσάλου και αρνητικές στο κάτω μέρος του, στην περίπτωση της θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C λόγω της διαστολής την οποία υφίσταται. Ειδικότερα, η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης στην κεφαλή του πασσάλου προσδοκείται να είναι θετική, αποτέλεσμα το οποία απαντάται και σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016).
- Παρόμοιας κατανομής και τιμής με αυτές της μηχανικής φόρτισης στο τέλος ενός κύκλου ψύξης-θέρμανσης (λόγω της τελικής θερμοκρασίας του πασσάλου που είναι περίπου ίση με αυτήν της εδαφικής περιοχής, το θερμοκρασιακό πεδίο είναι παρόμοιο με το αρχικό).

Οι αξονικές δυνάμεις που παρουσιάζονται για όλες τις θεματικές ενότητες που θα ακολουθήσουν κατά την απουσία μηχανικής φόρτισης αναμένονται να είναι:

- Θετικές (εφελκυστικές) στο μεγαλύτερο πάνω μέρος του πασσάλου και αρνητικές στο κάτω μέρος του, κατά την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C, όπως παρατηρήθηκαν σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016) σε αργιλικό έδαφος για μη-μόνιμη θερμική ροή, λόγω της συστολής την οποία υφίσταται ο πάσσαλος, κατά την οποία δημιουργούνται πρόσθετες εφελκυστικές αξονικές τάσεις στον πάσσαλο εξαιτίας των πρόσθετων διατμητικών τάσεων με φορά προς τα πάνω που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου και προς τα κάτω στο κάτω μέρος του.
- Αρνητικές (θλιπτικές) σε ολόκληρο το τμήμα του πασσάλου, στην περίπτωση της θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C, όπως παρουσιάστηκαν και στην έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016), λόγω της διαστολής, την οποία υφίσταται ο πάσσαλος, κατά την οποία δημιουργούνται πρόσθετες θλιπτικές αξονικές τάσεις στον πάσσαλο εξαιτίας των πρόσθετων διατμητικών τάσεων με φορά προς τα κάτω που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια στο πάνω μέρος του πασσάλου και προς τα κάτω στο κάτω μέρος του.
- Παρόμοιας κατανομής και τιμής με αυτές της μηχανικής φόρτισης στο τέλος κάθε κύκλου ψύξης - θέρμανσης (λόγω της τελικής θερμοκρασίας του πασσάλου που είναι περίπου ίση με αυτήν της εδαφικής περιοχής, το θερμοκρασιακό πεδίο είναι παρόμοιο με το αρχικό, με αποτέλεσμα να μην

αλλάζει σε σημαντικό βαθμό το φυσικό μέγεθος του πασσάλου και να μην γεννώνται διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους).

Η πλευρική τριβή στη διεπιφάνεια πασσάλου – εδάφους σε σύγκριση με αυτή του ίδιου βάρους, κατά την απουσία μηχανικής φόρτισης αναμένεται να:

- Αυξάνεται στο πάνω μέρος του πασσάλου και να μειώνεται αποκτώντας αντίθετο πρόσημο στο κάτω μέρος του επειδή οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια έχουν φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και προς τα κάτω στο κάτω τμήμα του κατά την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C όπως παρατηρείται και σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016).
- Μειώνεται στο πάνω μέρος του πασσάλου αποκτώντας αντίθετο πρόσημο και να επανέρχεται στο αρχικό πρόσημο στο κάτω μέρος του επειδή οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια έχουν φορά προς τα κάτω στο άνω μέρος του πασσάλου και προς τα κάτω στο πάνω τμήμα κατά τη θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C.
- Αυξάνεται στο πάνω μέρος του πασσάλου και να μειώνεται στο κάτω μέρος του επειδή οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια έχουν φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και προς τα κάτω στο κάτω τμήμα του κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις από τις τιμές της πλευρικής τριβής, όπως προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση.

Υπό την επιβολή φόρτισης 6000 kN σε αδέσμευτο μεμονωμένο ενεργειακό πάσσαλο για παροδική θερμική φόρτιση

Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά τη λειτουργία του πασσάλου υπό την φόρτιση των 6000 kN για όλες τις θεματικές ενότητες που παρουσιάστηκαν παραπάνω αναμένονται να είναι:

- Μεγαλύτερες από αυτές της μηχανικής φόρτισης κατά την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C στο μεγαλύτερο τμήμα του πασσάλου λόγω της ιδιότητας του να συστέλλεται όταν ψυχθεί. Ειδικότερα, στην κεφαλή του πασσάλου η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει μέσω της μηχανικής φόρτισης, όπως ακριβώς βρέθηκε και στους Tsetoulidis et al. (2016).
- Μικρότερες από αυτές της μηχανικής φόρτισης στην περίπτωση της θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C στο μεγαλύτερο τμήμα του πασσάλου λόγω της διαστολής την οποία υφίσταται. Πιο συγκεκριμένα, στην κεφαλή του πασσάλου η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης προσδοκείται να είναι μικρότερη από

αυτήν με την παρουσία μηχανικής φόρτισης, αποτέλεσμα το οποίο εξήχθη και σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016).

- Μεγαλύτερες από αυτές της μηχανικής φόρτισης και παρόμοιας μορφής στην περίπτωση της ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C σε όλο το μήκος του πασσάλου λόγω της συστολής-διαστολής που υφίσταται από τις προηγούμενες θερμικές καταστάσεις με αποτέλεσμα τη μεταβολή των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας παρόλο που η τελική θερμοκρασία του είναι ίδια με την αρχική.

Οι αξονικές δυνάμεις κατά τη λειτουργία του πασσάλου υπό τη φόρτιση των 6000 kN (φορτίο λειτουργίας) για όλες τις θεματικές ενότητες, οι οποίες προαναφέρθηκαν, αναμένονται να είναι:

- Μεγαλύτερες από αυτές της μηχανικής φόρτισης κατά την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C στο μεγαλύτερο τμήμα του πασσάλου όπως παρατηρήθηκαν σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016) σε αργιλικό έδαφος για παροδική θερμική φόρτιση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιβολή μεγάλης μηχανικής φόρτισης, με αποτέλεσμα να έχει εμφανιστεί η διατμητική αντοχή σε ένα σημείο του πασσάλου από την αρχική μηχανική φόρτιση.
- Μεγαλύτερες από αυτές της μηχανικής φόρτισης στην περίπτωση της θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C σε ολόκληρο το τμήμα του πασσάλου, όπως παρουσιάστηκαν σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016) σε αργιλικό έδαφος για παροδική θερμική φόρτιση, λόγω της γέννησης πρόσθετων αξονικών τάσεων που αντιτίθενται στη διαστολή του πασσάλου με αποτέλεσμα να προκαλούν θλιπτικές πρόσθετες αξονικές δυνάμεις στον πάσσαλο.
- Μεγαλύτερες από αυτές της μηχανικής φόρτισης στην περίπτωση της ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C σε όλο το μήκος του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις προηγούμενες θερμικές φορτίσεις που έχουν ασκηθεί στον πάσσαλο και μεταβάλλουν τις ιδιότητες της διεπιφάνειας αυξάνοντας τις αξονικές δυνάμεις σε σχέση με τις μηχανικές.

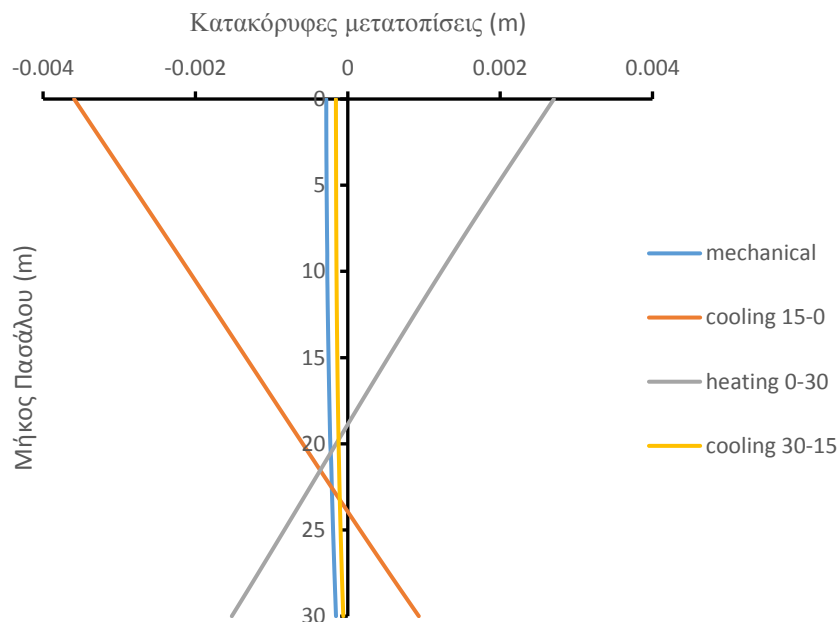
Η πλευρική τριβή στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους που εμφανίζεται υπό τη φόρτιση των 6000 kN, αναμένεται να είναι

- Μικρότερη από αυτή που προκύπτει με την παρουσία μηχανικής φόρτισης στο πάνω μέρος του πασσάλου και μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του πασσάλου κατά την ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C, όπως ακριβώς βρέθηκε και σε έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016).
- Μικρότερη από αυτή η οποία εξάγεται με την επιβολή μηχανικής φόρτισης στο πάνω μέρος του πασσάλου και μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του για θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C.
- Μικρότερη από αυτή, η οποία εξάγεται με την επιβολή μηχανικής φόρτισης στο πάνω μέρος του πασσάλου και μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του για την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C.

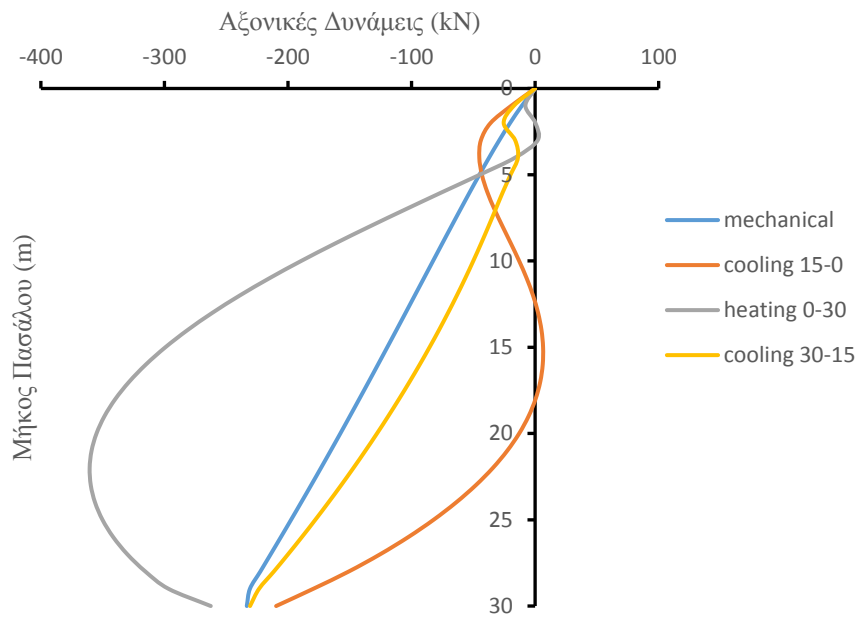
6.1) Κατακόρυφες μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και πλευρική τριβή για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης

Τα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω εξήχθησαν μέσα από αναλύσεις για λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$, συντελεστή αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$. Οι καθιζήσεις θα παρουσιαστούν για ανάλυση μη-μόνιμης θερμικής ροής διάρκειας 6 μηνών (transient state) σε συνθήκες μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή ίση με 0 kN, 1000 kN και 6000 kN και για μόνιμη θερμική ροή (steady state) με φορτίο 0 kN και 6000 kN. Οι αξονικές δυνάμεις για ανάλυση μη-μόνιμης θερμικής ροής διάρκειας 6 μηνών (transient state) υπό την επίδραση μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή ίση με 0 kN, 1000 kN, 4000 kN, 6000 kN και 8000 kN, για μόνιμη θερμική ροή (steady state) με φορτίο 0 kN, 1000 kN και 6000 kN και για κύκλο βήματος 1 ημέρας για απουσία μηχανικής φόρτισης. Οι διατμητικές τάσεις θα παρουσιαστούν για μη-μόνιμη θερμική ροή διάρκειας χρονικού διαστήματος 6 μηνών (transient state) υπό την επίδραση μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή ίση με 0 kN, 1000 kN, 4000 kN και 6000 kN και για μόνιμη κατάσταση (steady state) υπό την επιβολή 0 kN, 1000 kN και 6000 kN.

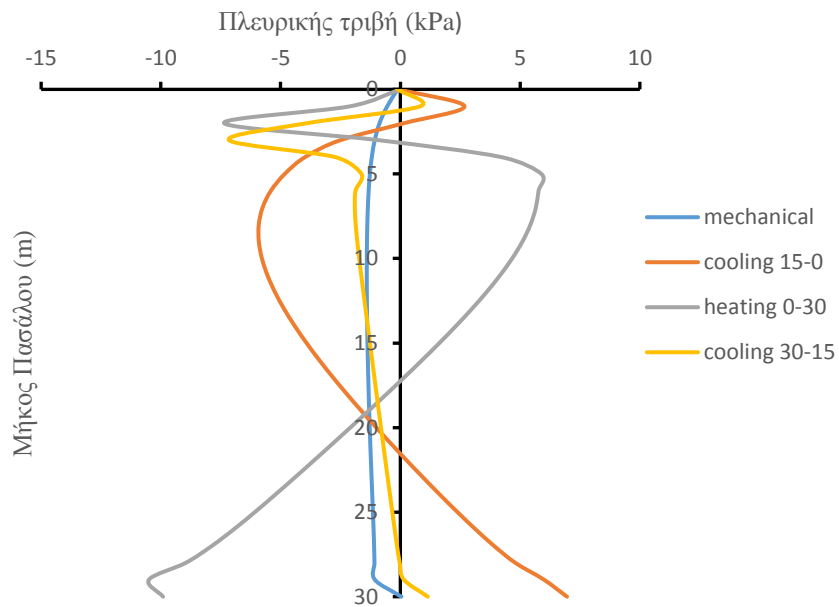
Απουσία μηχανικής φόρτισης



Σχήμα 6.1.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.1.2) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.



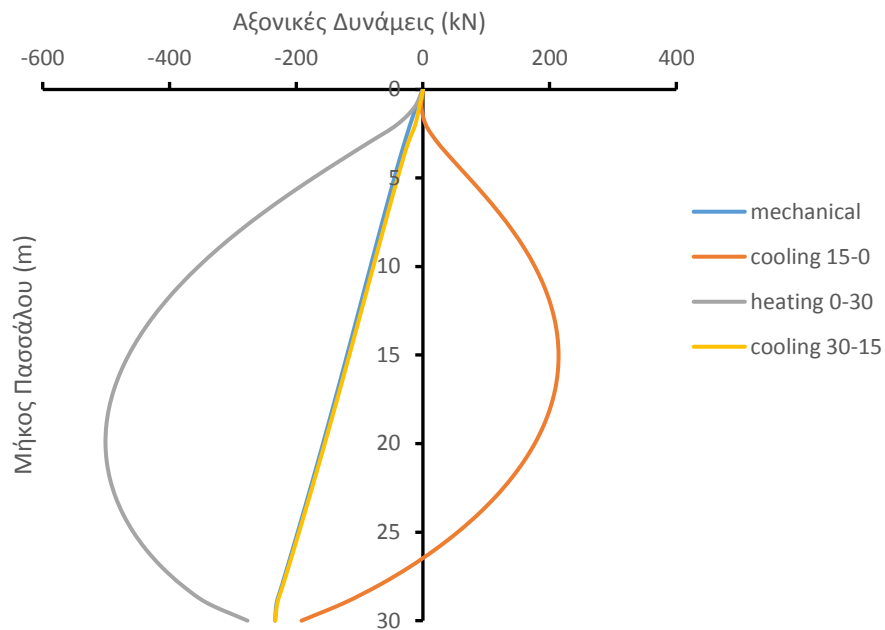
Σχήμα 6.1.3) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.

Από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.1.1) παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η ψύξη του πασσάλου από του 15 °C στους 0 °C προκαλεί αρνητικές κατακόρυφες μετατοπίσεις στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την ψύξη δημιουργούνται θλιπτικές ελεύθερες παραμορφώσεις στον πάσσαλο, με αποτέλεσμα να συστέλλεται και να προκαλείται καθίζηση της κεφαλής και ανύψωση της αιχμής. Αντιθέτως, για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί θετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη θετική μετατόπιση να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη θέρμανση δημιουργούνται εφελκυστικές ελεύθερες παραμορφώσεις στον πάσσαλο, με αποτέλεσμα να διαστέλλεται και να προκαλείται ανύψωση της κεφαλής και καθίζηση στην αιχμή. Επιπρόσθετα, για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15°C προκαλεί ανεπαίσθητες καθιζήσεις σχεδόν παρόμοιες στην αριθμητική τιμή και στη μορφή με αυτές που προϋπήρχαν χωρίς τη θερμική μεταβολή λόγω της ταύτισης της θερμοκρασίας του πασσάλου μετά από την ψύξη με την αρχική θερμοκρασία.

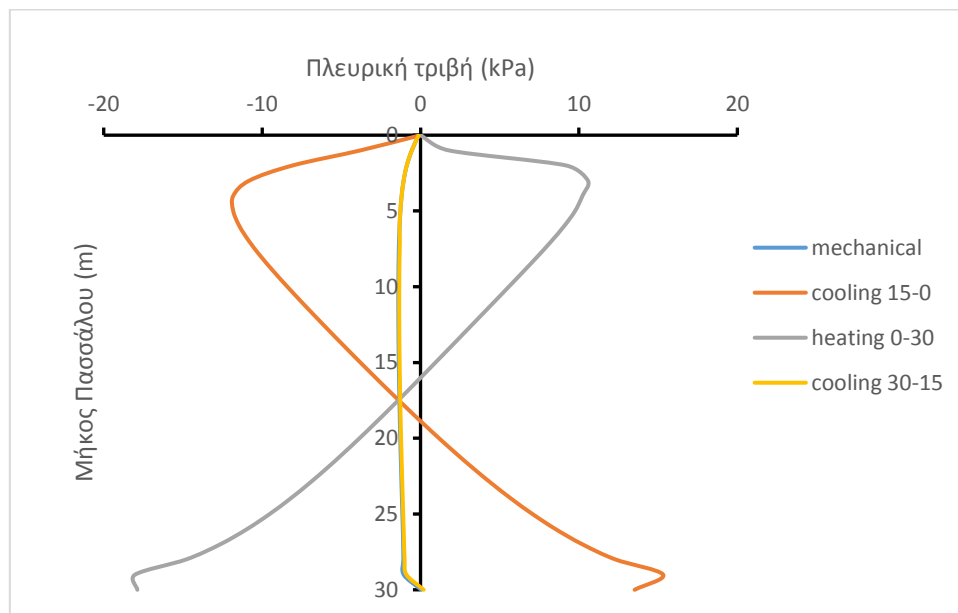
Επιπροσθέτως, όσον αφορά τις τιμές των αξονικών δυνάμεων χωρίς μηχανικό φορτίο (βλ. Σχήμα 6.1.2), η αρχική ψύξη του πασσάλου από 15 °C στους 0 °C οδηγεί σε μικρότερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις από αυτές λόγω του ίδιου βάρους στο μεγαλύτερο μέρος ($z > 5\text{m}$) κατά μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πρόσθετες τάσεις που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια εδάφους - πασσάλου εξαιτίας της μεγαλύτερης συστολής που υφίσταται ο πάσσαλος κατά την ψύξη σε σύγκριση με το έδαφος, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μη-μόνιμης θερμικής ροής διάρκειας 6 μηνών οι οποίες δημιουργούν πρόσθετες εφελκυστικές αξονικές τάσεις στον πάσσαλο. Αντιθέτως, η θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο μεγαλύτερο τμήμα του πασσάλου ($z > 5\text{m}$). Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πρόσθετες τάσεις που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια εδάφους – πασσάλου εξαιτίας της μεγαλύτερης διαστολής που υφίσταται ο πάσσαλος κατά τη θέρμανση σε σύγκριση με το έδαφος, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μη-μόνιμης θερμικής ροής διάρκειας 6 μηνών και προκαλούν πρόσθετες θλιπτικές αξονικές τάσεις στον πάσσαλο. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ιδιάζουσα συμπεριφορά που εμφανίζεται στην ψύξη (μεγαλύτερες αξονικές) και τη θέρμανση (μικρότερες αξονικές) στην κορυφή του πασσάλου για ($z < 5\text{m}$) οφείλεται στην κατάσταση που τείνει να αποκτήσει το έδαφος και να διαστέλλεται περισσότερο από τον πάσσαλο για τη θερμική φόρτιση διάρκειας 6 μηνών εξαιτίας του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης ($\alpha_s / \alpha_p = 3$). Αυτή η συμπεριφορά αναπτύσσεται πλήρως για τη μόνιμη διάρκεια θερμικής ροής που θα παρουσιαστεί παρακάτω και οφείλεται στο μεγαλύτερο συντελεστή διόγκωσης του εδάφους. Επίσης, για απουσία μηχανικής φόρτισης, η τελική ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15 °C επιφέρει ανεπαίσθητα μικρότερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του ίδιου βάρους κατά μήκος όλου του πασσάλου. Η συμπεριφορά οφείλεται στις ελαφρώς μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω που εμφανίζονται στο πάνω μέρος του πασσάλου λόγω της συστολής του.

Βάσει του διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.1.3) όσον αφορά την πλευρική τριβή προκύπτει ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης στην αρχική ψύξη οι διατμητικές τάσεις που παράγονται στην κορυφή και στο κάτω μέρος του πασσάλου για ($z < 3 \text{ m}$) και ($z > 20\text{m}$) έχουν κατά κύριο λόγο φορά προς κάτω με αποτέλεσμα η πλευρικής τριβής να ελαττώνεται και να αποκτά αντίστροφο πρόσημο. Σε αντιδιαστολή οι διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται στο πάνω μέρος από ($z = 3 - 20\text{m}$) είναι μεγαλύτερες από τις μηχανικές και έχουν γενικά φορά προς τα πάνω με αποτέλεσμα η πλευρική τριβή να αυξάνεται σε σχέση με αυτή του ίδιου βάρους. Αντιθέτως, για τη θέρμανση παρατηρείται η ανάστροφη συμπεριφορά δηλαδή, οι διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται στην κορυφή και στο κάτω μέρος του πασσάλου για ($z < 3\text{m}$) και ($z > 20\text{m}$) παρουσιάζουν γενικά φορά προς τα πάνω με συνέπεια να αυξάνεται η πλευρική τριβή σε σύγκριση με αυτή του ίδιου βάρους, ενώ αυτές που παράγονται στο υπόλοιπο μέρος του πασσάλου από ($z = 3 - 22\text{m}$) έχουν φορά προς τα κάτω οπότε οδηγούν στην μείωση της πλευρικής τριβής και στην αντιστροφή του προσήμου της. Επιπλέον, όσον αφορά την τελική ψύξη από τους 30°C στους 15°C η πλευρική τριβή είναι μεγαλύτερη από αυτή του ίδιου βάρους στο άνω μέρος του πασσάλου και μικρότερη στο κάτω μέρος του πασσάλου όπου τείνει μηδενιστεί στην αιχμή του.

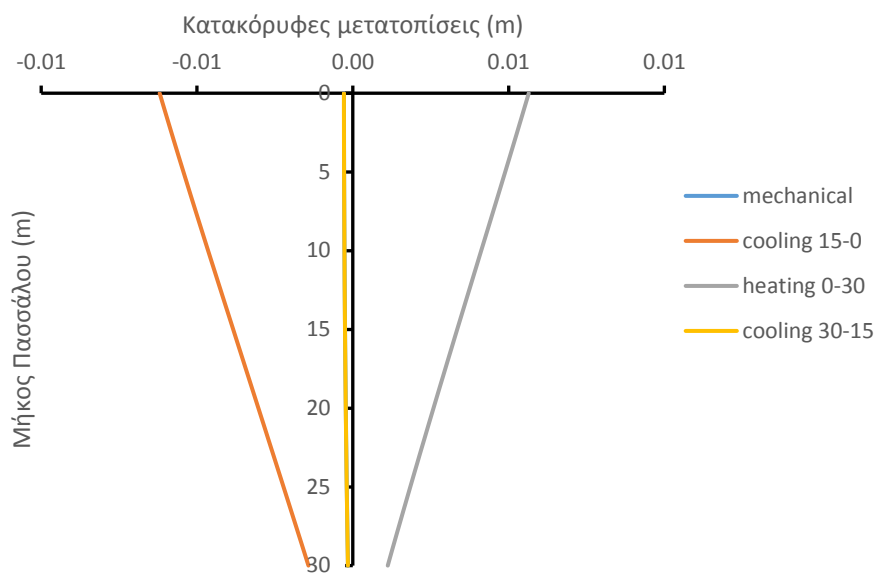
Παρακάτω στα Σχήματα (6.1.4, 6.1.5) θα παρουσιαστούν οι κατανομές των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής ενός κύκλου θερμικής φόρτισης χωρίς μηχανική φόρτιση και με μη-μόνιμη θερμική φόρτιση χρονικής διάρκειας 1 ημέρας. Σκοπός είναι να αποσαφηνιστεί η ιδιάζουσα συμπεριφορά η οποία εμφανίστηκε στην κορυφή του πασσάλου για ($z < 5\text{m}$) στην θερμική φόρτιση διάρκειας 6 μηνών. Ειδικότερα, για μικρά χρονικά διαστήματα θερμικών φορτίσεων ο πάσσαλος συστέλλεται ή διαστέλλεται περισσότερο από το έδαφος σε όλο το μήκος του με αποτέλεσμα οι αξονικές τάσεις να είναι μικρότερες (ακόμη και θετικές) για την αρχική ψύξη και μεγαλύτερες για τη θέρμανση σε όλο το μήκος του πασσάλου. Οι διατμητικές τάσεις που προκύπτουν στη διεπιφάνεια από τη θερμική φόρτισης της 1 ημέρας για την ψύξη είναι προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και προς τα κάτω στο κάτω μέρος του με αποτέλεσμα η πλευρική τριβή να είναι μεγαλύτερη της αντιστοιχίας του ίδιου βάρους στο άνω μέρος του και με αντίστροφο πρόσημο στο κάτω μέρος του. Αντιστρόφως, για τη θέρμανση του πασσάλου παρουσιάζονται διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω άνω μέρος του πασσάλου στη διεπιφάνεια γεγονός που δημιουργεί πλευρική τριβή με ανάστροφο πρόσημο από αυτές του ίδιου βάρους και μεγαλύτερη αρνητική στο κάτω μέρος του σε σύγκριση με του ίδιου βάρους επειδή σε εκείνο το σημείο δημιουργούνται διατμητικές τάσεις με φορά προς πάνω. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε στην έρευνα των Bourne – Webb et al. (2011) που παρατέθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3 και στο σχήμα 2.3.3 για θερμικά αδρανές εδαφικό μοντέλο. Τέλος, κατά την τελική ψύξη για επαναφορά στην αρχική θερμοκρασία εμφανίζονται παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις και επομένως και πλευρική τριβή με τα αρχικά αποτελέσματα του ίδιου βάρους χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης.



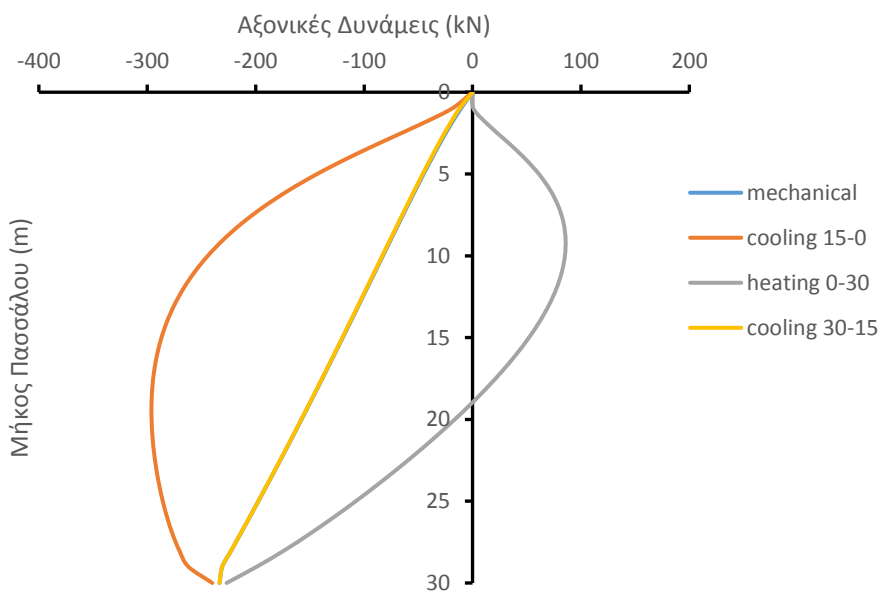
Σχήμα 6.1.4) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 1 ημέρας χωρίς μηχανική φόρτιση.



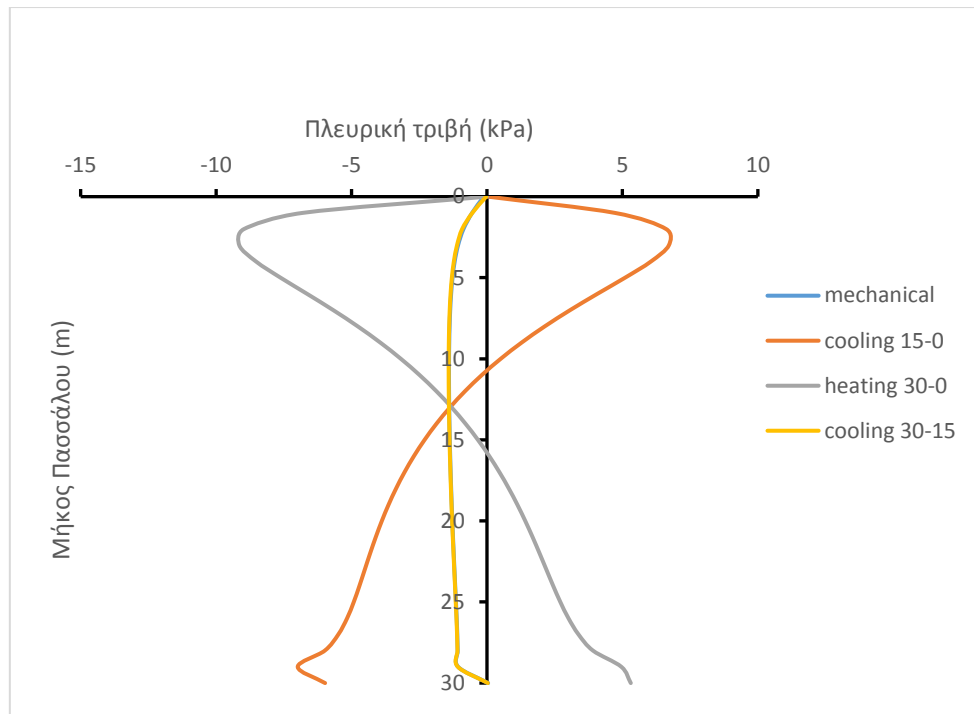
Σχήμα 6.1.5) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 1 ημέρας χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.1.6) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμου ροής χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.1.7) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμου ροής χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.1.8) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμου ροής χωρίς μηχανική φόρτιση.

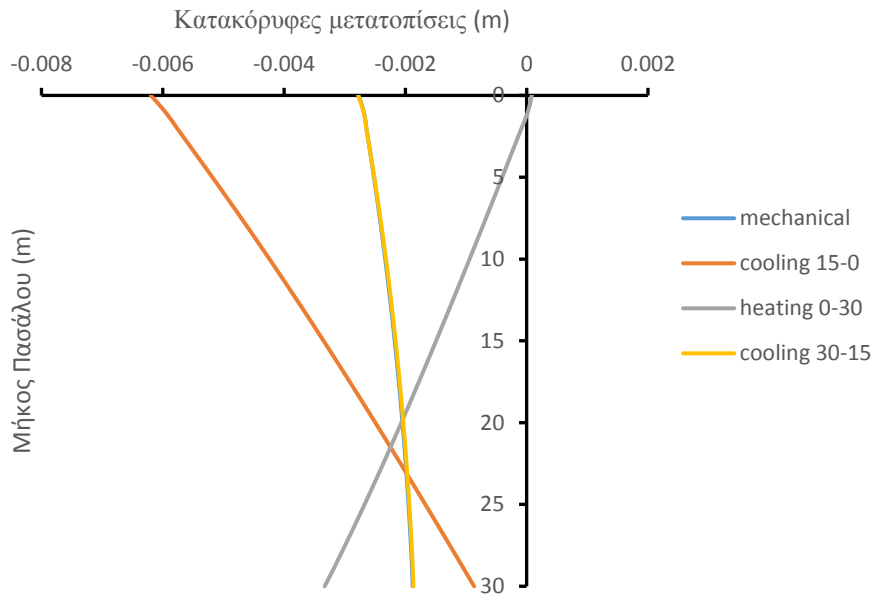
Στα Σχήματα 6.1.6 έως 6.1.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για μόνιμες συνθήκες (θερμικής ροής). Από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.1.6) παρατηρείται ότι χωρίς μηχανική φόρτιση, η ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C προκαλεί αρνητικές κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για μόνιμη θερμική ροή το έδαφος συστέλλεται περισσότερο από τον πάσσαλο εξαιτίας του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης που έχει, με αποτέλεσμα ολόκληρος ο πάσσαλος να καθιζάνει και να αναπτύσσονται αρνητικές μετατοπίσεις σε όλο το μήκος του. Αντιθέτως, για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί θετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις σε όλο το μήκος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου). Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται για μόνιμη χρονική διάρκεια εξαιτίας της μεγαλύτερης διαστολής του εδάφους σε σύγκριση με τον πάσσαλο λόγω του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης, με αποτέλεσμα την συνολική ανύψωση του πασσάλου. Επιπρόσθετα, για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η ψύξη του πασσάλου από του 30 °C στους 15°C προκαλεί ανεπαίσθητες αρνητικές κατακόρυφες μετατοπίσεις, παρόμοιες στην αριθμητική τιμή και στη μορφή με αυτές που προϋπήρχαν από το ίδιο βάρος χωρίς τη θερμική μεταβολή λόγω της ταύτισης της θερμοκρασίας του πασσάλου μετά από την ψύξη με την αρχική θερμοκρασία.

Επιπλέον, μπορείς κανείς να διακρίνει μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.1.7) ότι χωρίς μηχανική φόρτιση η αρχική ψύξη του πασσάλου από 15 °C στους 0 °C προκαλεί μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πρόσθετες διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια εδάφους –

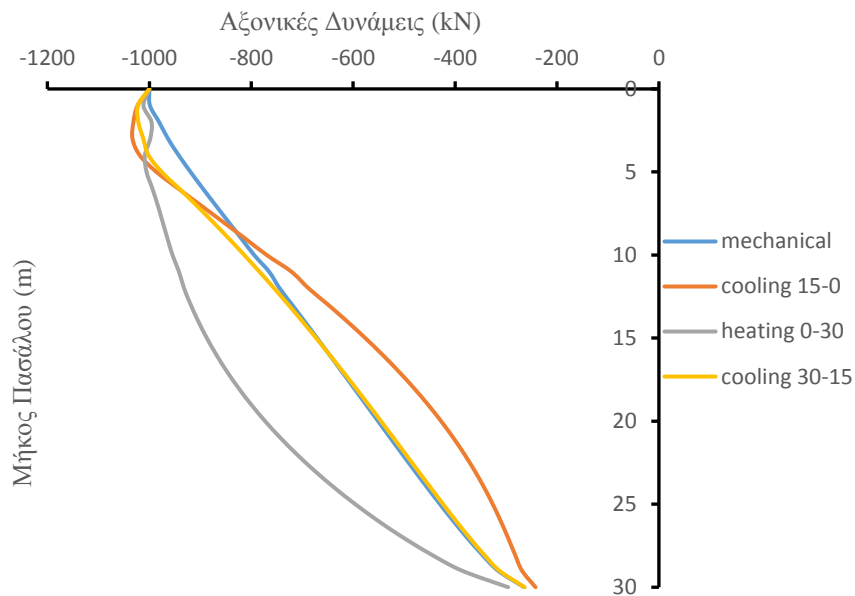
πασσάλου εξαιτίας της μεγαλύτερης συστολής που υφίσταται το έδαφος κατά την ψύξη σε σύγκριση με τον πάσσαλο και αντιτίθενται σε αυτή τη μεταβολή, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μόνιμης θερμικής ροής (steady state) και του λόγου $\alpha_s/\alpha_p = 3$ και προκαλούν πρόσθετες θλιπτικές αξονικές τάσεις. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η φορά των επιπρόσθετων αυτών διατμητικών τάσεων είναι προς τα κάτω στο άνω μέρος του πασσάλου και προς τα πάνω στο κάτω μέρος του. Αντιθέτως, η θέρμανση του πασσάλου από τους 0°C στους 30°C προκαλεί για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, μικρότερες αξονικές ή ακόμα και θετικές αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πρόσθετες διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια εδάφους – πασσάλου εξαιτίας της μεγαλύτερης διαστολής που υφίσταται το έδαφος κατά τη θέρμανση σε σύγκριση με τον πάσσαλο, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μόνιμης θερμικής ροής και του λόγου $\alpha_s/\alpha_p = 3$. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η φορά των διατμητικών τάσεων είναι προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και προς τα κάτω στο κάτω μέρος του με βάση το ορθοκανονικό σύστημα αξόνων. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίθετη με την παραπάνω για θερμική φόρτιση 1 ημέρας γεγονός που αποδεικνύει τη σημασία που έχει η χρονική διάρκεια φόρτισης στην κατανομή αξονικών δυνάμεων και διατμητικών τάσεων για θερμικά ενεργό έδαφος. Επίσης, για απουσία μηχανικής φόρτισης, η τελική ψύξη του πασσάλου από τους 30°C στους 15°C επιφέρει παρόμοιες αξονικές δυνάμεις σε σύγκριση με αυτές του ίδιου βάρους του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις παρόμοιες διατμητικές δυνάμεις που εμφανίζονται στον πάσσαλο και προκαλούν παρόμοια κατανομή πλευρικής τριβής λόγω του όμοιου θερμοκρασιακού πεδίου με το αρχικό των 15°C .

Από το σχήμα 6.1.8 προκύπτει ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης στην αρχική ψύξη η πλευρική τριβή που παράγονται στην κορυφή του πασσάλου για ($z > 14\text{m}$) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του ίδιου βάρους και μάλιστα για ($z > 11\text{m}$) εμφανίζει αντίθετο πρόσημο, ενώ αυτή που δημιουργείται στο κάτω μέρος για ($z > 14\text{m}$) είναι μεγαλύτερη. Αντιθέτως, για τη θέρμανση παρατηρείται η αναστροφή συμπεριφορά δηλαδή, η πλευρική τριβή που δημιουργείται για ($z < 14\text{m}$) είναι μεγαλύτερη από αυτήν του ίδιου βάρους, ενώ αυτή που παράγεται στο κάτω μέρος για ($z > 14\text{m}$) έχει μικρότερη τιμή και για ($z > 16\text{m}$) αντίθετο πρόσημο. Επιπλέον, όσο αναφορά την τελική ψύξη από τους 30°C στους 15°C η πλευρική τριβή είναι παραπλήσια με αυτήν που δημιουργείται από το ίδιο βάρος.

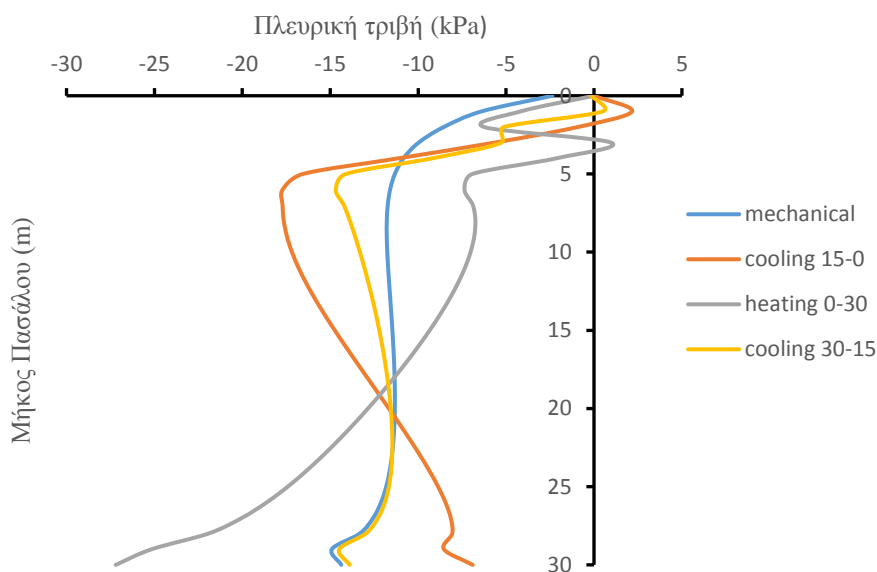
Επιβολή μηχανικής φόρτισης 1000 kN



Σχήμα 6.1.9) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 1000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.1.10) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 1000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.1.11) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής 6 μηνών και υπό την επίδραση 1000 kN μηχανικής φόρτισης.

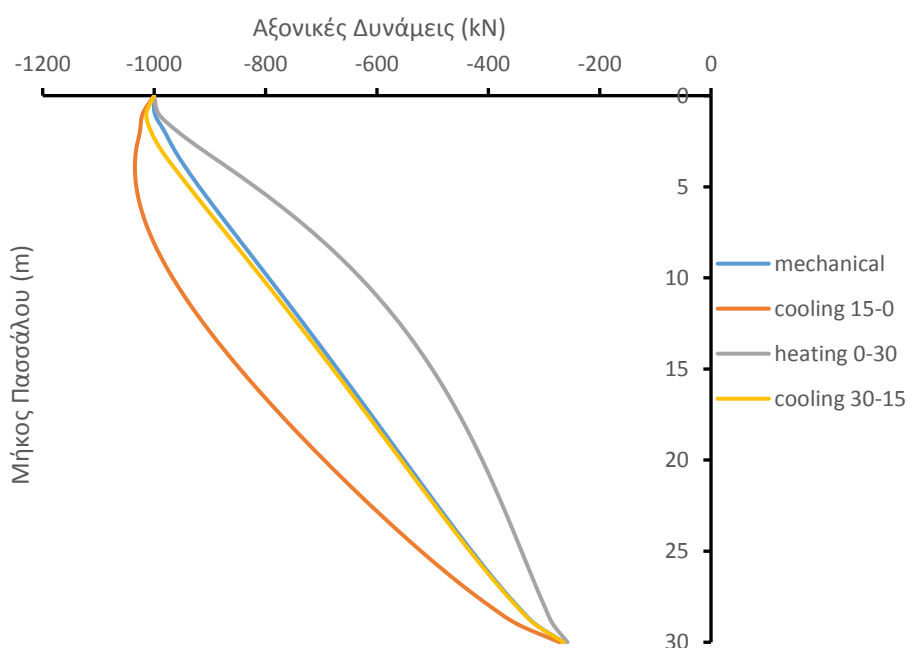
Αρχικά, όσον αφορά τις κατακόρυφες μετατοπίσεις υπό την επιβολή της μηχανικής φόρτισης 1000 kN για 6 μήνες βήμα θερμικής φόρτισης παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν του ίδιου βάρους στην κατανομή τους με μόνη διαφορά τη μικρή μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω για την ψύξη και προς τα πάνω για τη θέρμανση (βλ. Σχήμα 6.1.9). Σύμφωνα με τους (Rotta Loria et al, 2015) η θέση του ουδέτερου σημείου εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης.

Στη συνέχεια, όπως προκύπτει μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.1.10) η τοποθέτηση μηχανικής φόρτισης 1000 kN στην κεφαλή του πασσάλου με την ταυτόχρονη ψύξη του επιφέρει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο άνω μέρος του πασσάλου (μέχρι $z < 10$) και μικρότερες αξονικές δυνάμεις στο κάτω μέρος κατά μήκος του πασσάλου (μέχρι $z > 10$). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιβολή μικρής μηχανικής φόρτισης, με αποτέλεσμα η πλευρική τριβή που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του πασσάλου να είναι μικρότερη στο πάνω και στο κάτω μέρος του πασσάλου σε σύγκριση με αυτή που εμφανίζεται κατά την απουσία ψύξης και μεγαλύτερη στο μεσαίο τμήμα του (Σχήμα 6.1.13). Σε αντιδιαστολή, η θέρμανση του πασσάλου επιφέρει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται ο πάσσαλος κατά τη θέρμανση σε σύγκριση με το έδαφος, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μη-μόνιμης θερμικής ροής. Επιπλέον, αξίζει να επισημανθεί ότι παραπλήσια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στην έρευνα των Tsetoulidis et al. (2016) σε αργιλικό έδαφος για μη μόνιμη θερμική ροή. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η πλευρική τριβή που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του πασσάλου είναι μικρότερη στο πάνω μέρος του πασσάλου σε σύγκριση με αυτή που εμφανίζεται κατά την απουσία ψύξης και μεγαλύτερη στο κάτω με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας επιπλέον θλιπτικής αξονικής τάσης κατά μήκος του πασσάλου. Τέλος, για απουσία μηχανικής φόρτισης, η τελική

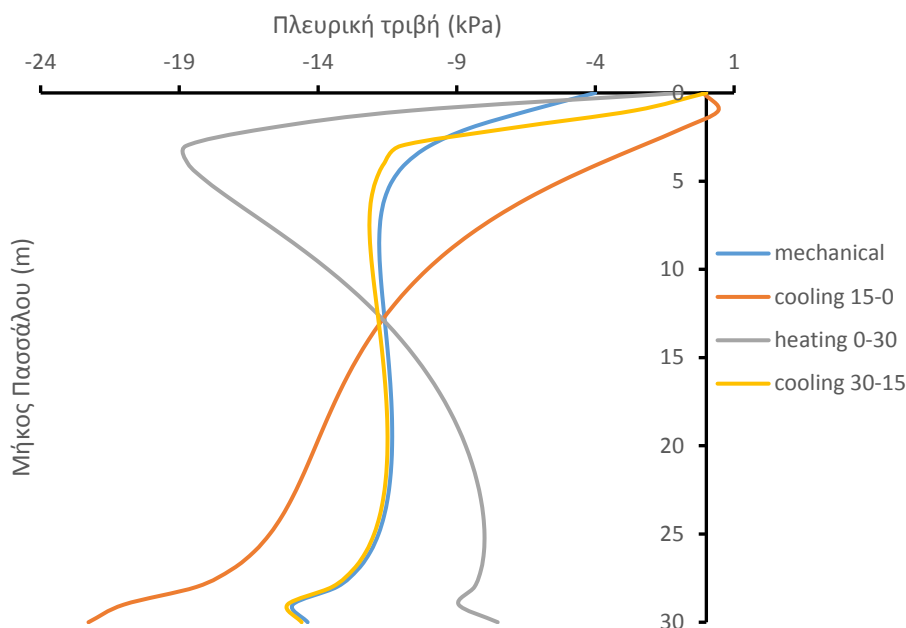
ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15 °C επιφέρει ανεπαίσθητα μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μηχανικές στην κορυφή του πασσάλου για ($z < 5\text{m}$) οι οποίες τείνουν να γίνουν ίσες κατά μήκος του υπόλοιπου πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη πλευρική τριβή που εμφανίζονται στην κορυφή του πασσάλου λόγω της συστολής του και της γένεσης επιπρόσθετων τάσεων στη διεπιφάνεια με φορά προς τα κάτω με αποτέλεσμα την αύξηση του αξονικού φορτίου σε αυτήν την περιοχή.

Στην περίπτωση επιβολής μηχανικής φόρτισης 1000 kN η πλευρική τριβή (βλ. Σχήμα 6.1.11) που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια κατά την ψύξη του πασσάλου ακολουθεί παραπλήσια κατανομή με αυτή του ιδίου βάρους, δηλαδή είναι μικρότερη από αυτή που δημιουργείται από τη μηχανική φόρτιση για ($z < 5\text{m}$) και ($z > 20\text{m}$), ενώ είναι μεγαλύτερη για ($z = 5 - 20\text{m}$). Αντιστρόφως, κατά τη θέρμανση του πασσάλου η πλευρική τριβή είναι μικρότερη στο άνω μέρος του πασσάλου από αυτή της μηχανικής φόρτισης ($z < 18\text{m}$) και μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του για ($z > 18\text{m}$). Επίσης, για το βήμα της τελικής ψύξης παρουσιάζεται μικρότερη πλευρική τριβή από την αντίστοιχη μηχανική στο άνω τμήμα του πασσάλου για ($z < 5\text{m}$), μεγαλύτερη για ($z = 5 - 20\text{m}$) και στο κάτω μέρος του πασσάλου για ($z > 20\text{m}$) τείνουν να γίνουν παραπλήσιες.

Γενικότερα η θέρμανση-ψύξη του πασσάλου επηρεάζει αρκετά το μέγεθος και την κατανομή των αξονικών δυνάμεων ιδιαίτερα για τις μικρές αξονικές φορτίσεις. Ειδικότερα, κατά την ψύξη του πασσάλου, η κατανομή των αξονικών δυνάμεων μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της επιβολής του μηχανικού φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου (Tsetoulidis et al., 2016). Για παράδειγμα, για μηδενικές ή μικρές μηχανικές φορτίσεις, παρατηρείται μείωση των αξονικών δυνάμεων στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου.



Σχήμα 6.1.12) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμης ροής και υπό την επίδραση 1000 kN μηχανικής φόρτισης.

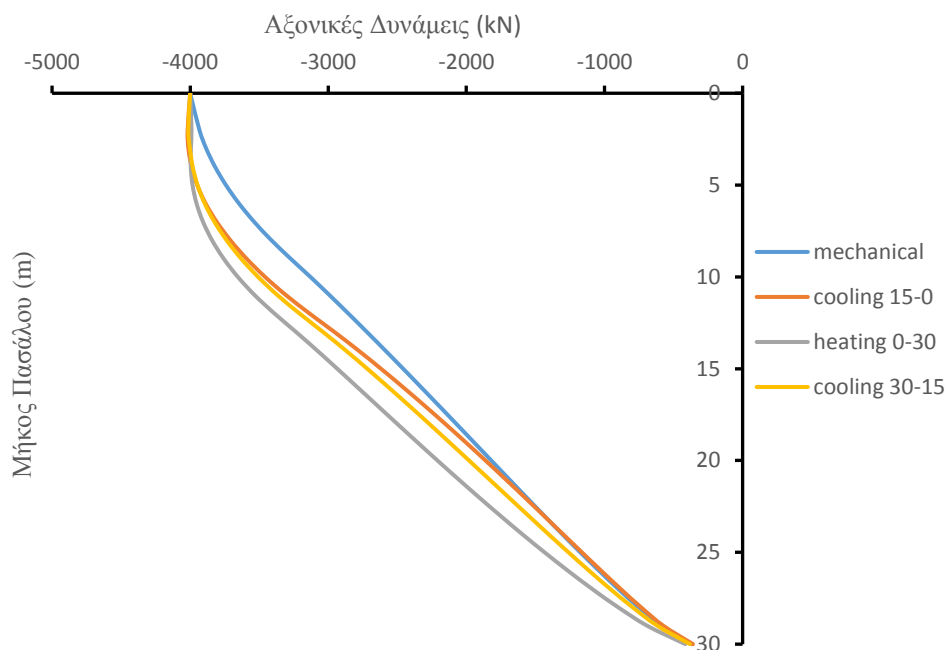


Σχήμα 6.1.13) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμης ροής και υπό την επίδραση 1000 kN μηχανικής φόρτισης.

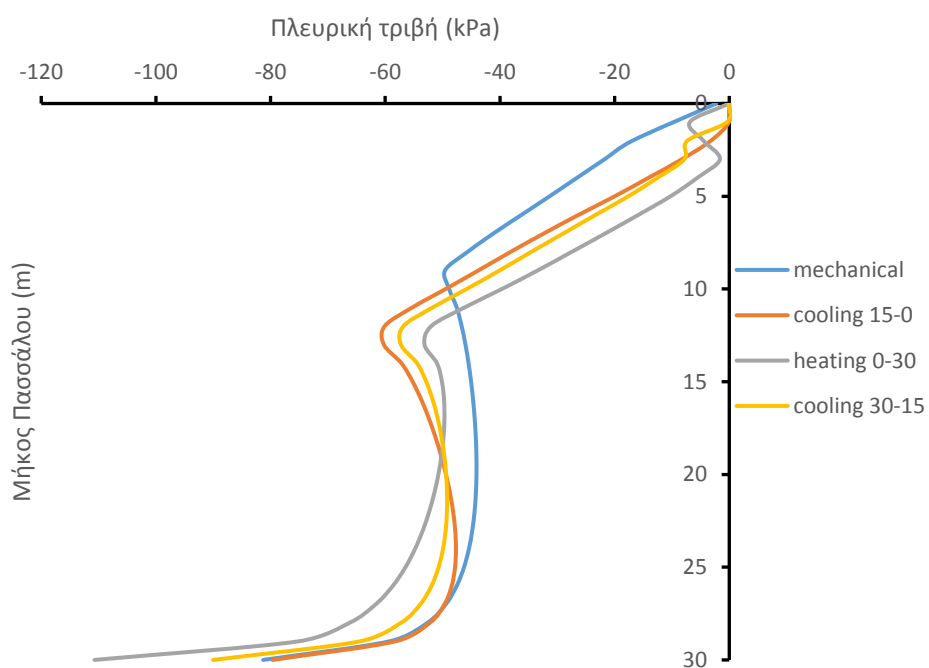
Όσον αφορά την τοποθέτηση μηχανικής φόρτισης 1000 kN (Σχήμα 6.1.12) στην κεφαλή του πασσάλου με μόνιμο βήμα θερμικής φόρτισης, η ψύξη επιφέρει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο μήκος όλου του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος κατά την ψύξη σε σύγκριση με τον πάσσαλο, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μόνιμης θερμικής ροής (steady state) και του λόγου $\alpha_s/\alpha_p = 3$. Αντιθέτως, η θέρμανση του πασσάλου επιφέρει μικρότερες αξονικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται το έδαφος κατά τη θέρμανση σε σύγκριση με τον πάσσαλο, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μόνιμης θερμικής ροής και του λόγου $\alpha_s/\alpha_p = 3$. Επίσης, για μηχανική φόρτιση 1000 kN η τελική ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15 °C επιφέρει παρόμοιες αξονικές δυνάμεις σε σύγκριση με αυτές της μηχανικής φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην παρόμοια πλευρική τριβή που εμφανίζεται στον πάσσαλο λόγω του όμοιου θερμοκρασιακού πεδίου με το αρχικό των 15 °C.

Από το Σχήμα 6.1.13 προκύπτει ότι για μηχανική φόρτιση στην αρχική ψύξη η πλευρική τριβή που παράγεται στην κορυφή του πασσάλου ($z < 14\text{m}$) είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει από την επιβολή της μηχανικής φόρτισης, ενώ αυτή που δημιουργείται στο κάτω μέρος για ($z > 14\text{m}$) είναι μεγαλύτερη. Αντιθέτως, για τη θέρμανση παρατηρείται η ανάστροφη συμπεριφορά δηλαδή, η πλευρική τριβή που παράγεται στην κορυφή του πασσάλου από ($z < 14\text{m}$) είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από την επιβολή της μηχανικής φόρτισης, ενώ αυτή που δημιουργείται στο κάτω μέρος για ($z > 14\text{m}$) είναι μικρότερη. Επιπλέον, όσον αφορά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C η πλευρική τριβή είναι παραπλήσια με αυτή που δημιουργείται από τη μηχανική φόρτιση στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου εκτός από την κορυφή, στην οποία εμφανίζει ελαφρώς μικρότερες τιμές.

Επιβολή μηχανικής φόρτισης 4000 kN



Σχήμα 6.1.14) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 4000 kN μηχανικής φόρτισης.

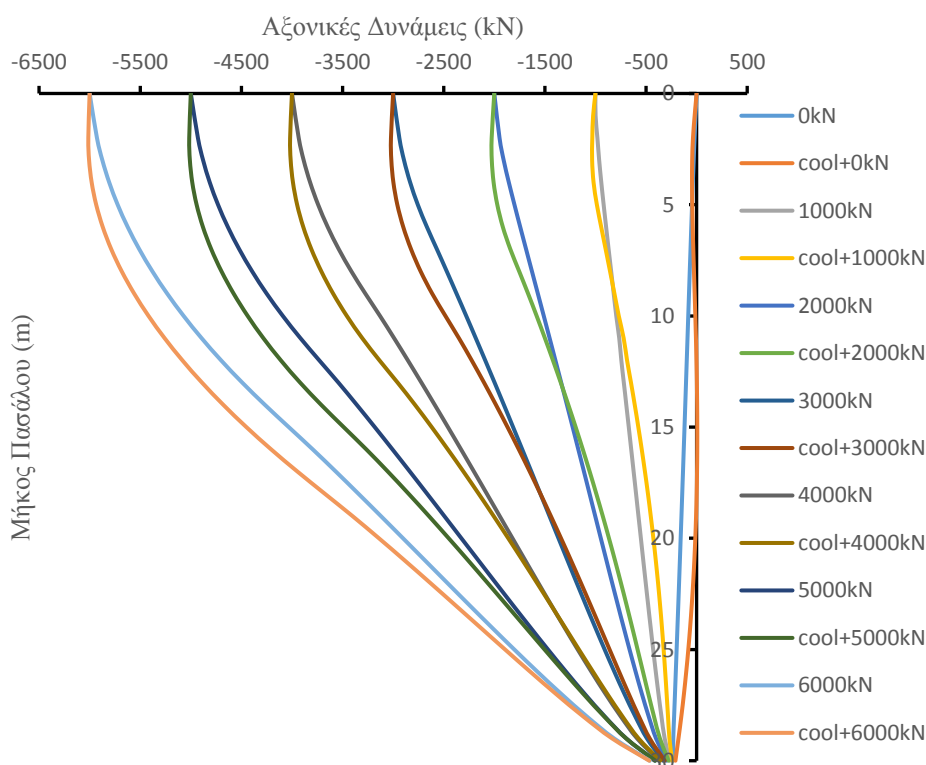


Σχήμα 6.1.15) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 4000 kN μηχανικής φόρτισης.

Η αύξηση του μηχανικού φορτίου συνεπάγεται την αύξηση των αξονικών δυνάμεων, η οποία ξεκινάει από το πάνω μέρος του πασσάλου και συνεχίζεται προς τα κάτω. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, για την παρούσα μελέτη στον ελεύθερο μεμονωμένο

πάσσαλο σε αμμώδες υπόβαθρο η μηχανική φόρτιση 4000 kN αποτελεί σημείο ορόσημο για τη μετέπειτα αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε όλο το μήκος του πασσάλου κατά την ψύξη. Παρακάτω, παρατίθενται τα σχήματα 6.1.14, 6.1.15 τα οποία απεικονίζουν την κατανομή των αξονικών δυνάμεων και των διατμητικών τάσεων για ένα κύκλο θέρμανσης. Αξίζει να επισημανθεί ότι η συμπεριφορά τους είναι παραπλήσια με αυτήν σε περίπτωση επίδρασης 6000 kN που θα αναπτυχθεί εκτενώς παρακάτω οπότε δεν κρίνεται απαραίτητο να αναλυθούν περαιτέρω τα παρακάτω σχήματα.

Γενικότερα, κατά την ψύξη εμφανίζεται μία αύξηση της πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και μία μείωση στο κάτω, λόγω της συστολής που υφίσταται. Το φαινόμενο αυτό απαντάται κατά βάση κατά την επιβολή μικρών μηχανικών φορτίσεων. Αντιθέτως, σε περίπτωση επιβολής μεγάλων μηχανικών φορτίσεων με καθεστώς ψύξης, κατά τις οποίες η μέγιστη διατμητική αντοχή έχει ήδη εμφανιστεί σε ένα σημείο του πασσάλου λόγω της αστοχίας της διεπιφάνειας εξαιτίας της μεγάλης μηχανικής φόρτισης, με αποτέλεσμα να παρατηρείται ότι η αύξηση αυτή είναι αδύνατο να συμβεί, γεγονός που επιφέρει τη μείωση της πλευρικής τριβής, το οποίο απαντάται και στη θέρμανση, ενώ παράλληλα προκαλείται αύξηση των αξονικών δυνάμεων (Tsetoulidis et al., 2016).

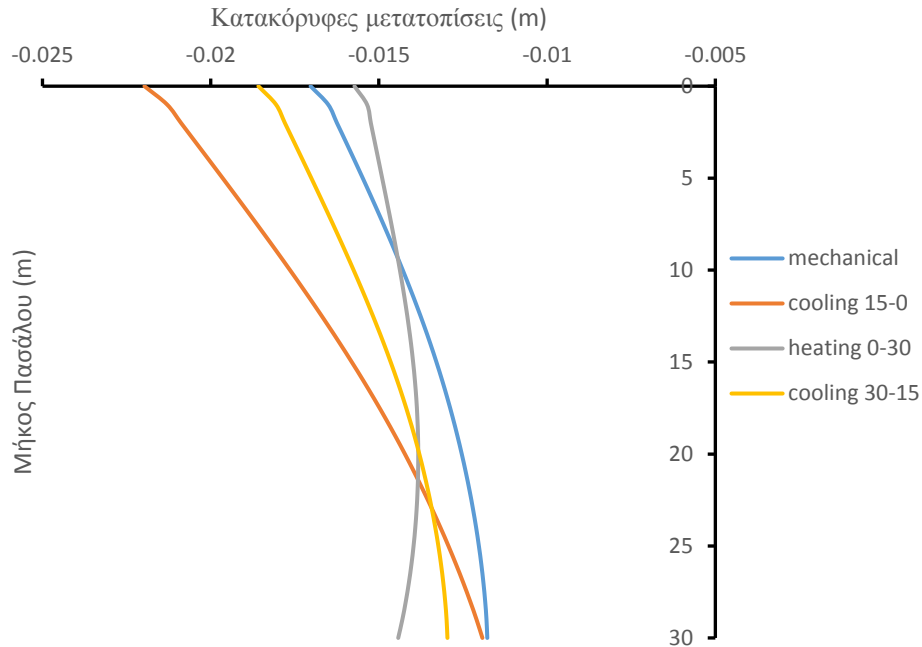


Σχήμα 6.1.16) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ψύξη 15 - 0 °C μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 0 - 6000 kN μηχανικής φόρτισης.

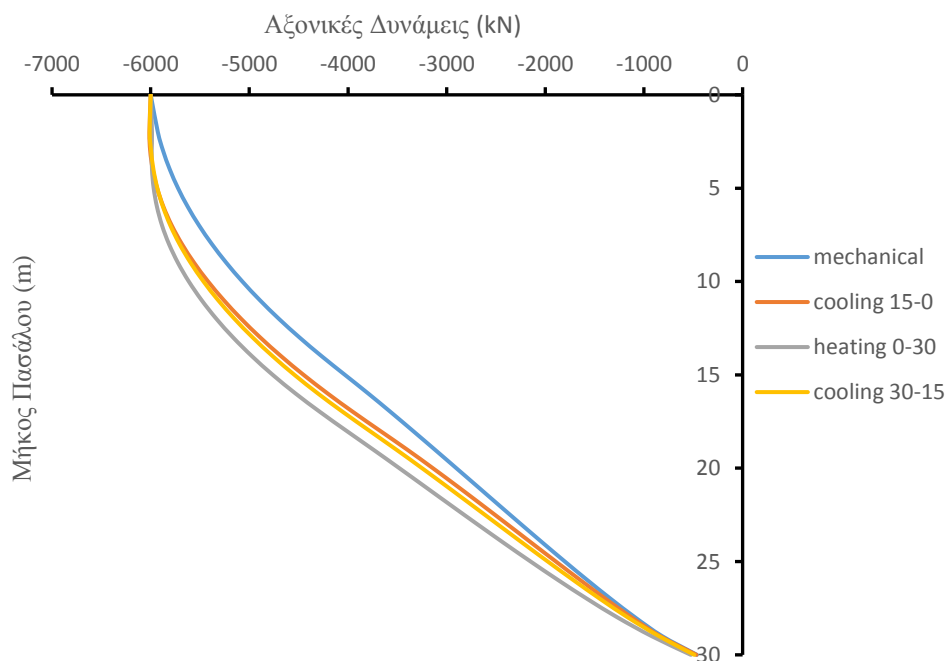
Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει από το Σχήμα 6.1.16 η ψύξη του πασσάλου προκαλεί όπως προαναφέρθηκε μια ιδιόζουσα συμπεριφορά στις αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως με την αύξηση του μηχανικού φορτίου παρουσιάζεται μια αύξηση των αξονικών δυνάμεων κατά την ψύξη

η οποία δημιουργεί την εμφάνιση μεγαλύτερων θλιπτικών δυνάμεων στον πάσσαλο. Αυτή η συμπεριφορά εμφανίζεται από το πάνω μέρος του πασσάλου και σταδιακά με την αύξηση του μηχανικού φορτίου εξελίσσεται προς τα κάτω.

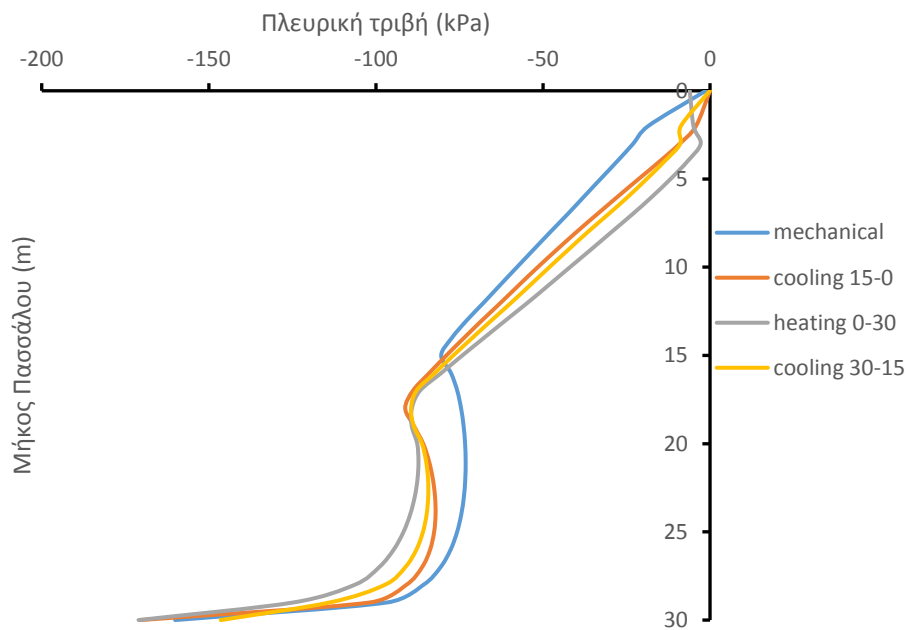
Επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN



Σχήμα 6.1.17) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.1.18) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.1.19) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης.

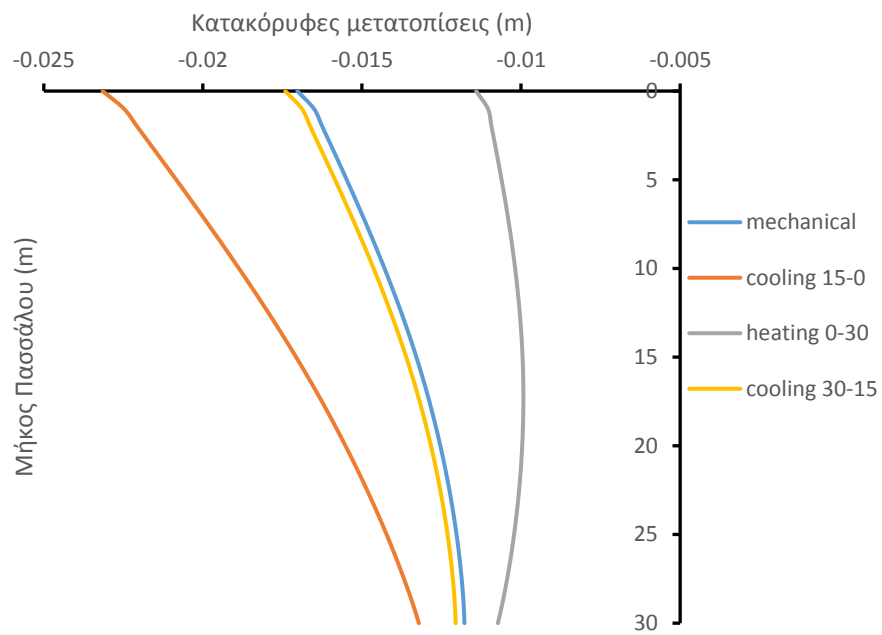
Αντίστοιχα, για πρόσθετη φόρτιση 6000 kN με βήμα θερμικής φόρτισης 6 μηνών βλ. Σχήμα 6.1.17, οι μεγαλύτερες καθιζήσεις απαντώνται στην κεφαλή του πασσάλου για όλες τις θερμοκρασιακές μεταβολές του πασσάλου όπως και στην έλλειψη μηχανικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, για πρόσθετη φόρτιση 6000 kN στην κεφαλή, η ψύξη από του 15 °C στους 0 °C δίνει μεγαλύτερες καθιζήσεις από τη μηχανική μετατόπιση σε όλο το μήκος του πασσάλου λόγω της συστολής που υφίσταται η επιφάνεια του πασσάλου. Επίσης, για πρόσθετη φόρτιση 6000 kN στην κεφαλή, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί μικρότερες καθιζήσεις από τη μηχανική καθίζηση στο άνω τμήμα και μεγαλύτερες καθιζήσεις στο κάτω τμήμα του πασσάλου λόγω της διαστολής που υφίσταται η επιφάνεια του πασσάλου. Επιπλέον, για πρόσθετη φόρτιση 6000 kN στην κεφαλή, η ψύξη από του 30 °C στους 15 °C δίνει καθιζήσεις από τη μηχανική καθίζηση σε όλο το μήκος του πασσάλου λόγω της συστολής που υφίσταται η επιφάνεια του πασσάλου, οι οποίες είναι παράλληλες με τις καθιζήσεις της μηχανικής φόρτισης, λόγω της ταύτισης της θερμοκρασίας του πασσάλου μετά από την ψύξη με την αρχική θερμοκρασία.

Τέλος, παρατηρείται ότι για τη ψύξη όσο αυξάνεται η μηχανική φόρτιση στην κεφαλή του πασσάλου με παρουσία ψύξης προκύπτει μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε σχέση με το μήκος του πασσάλου. Αντίστροφα, για επιβολή θέρμανσης με την αύξηση της μηχανικής φόρτισης το ουδέτερο σημείο μεταφέρεται προς τα πάνω σε σύγκριση με το μήκος πασσάλου παρατήρηση η οποία παρουσιάστηκε και στις αναλύσεις των (Rotta Loria et al, 2015). Με τον όρο ουδέτερο

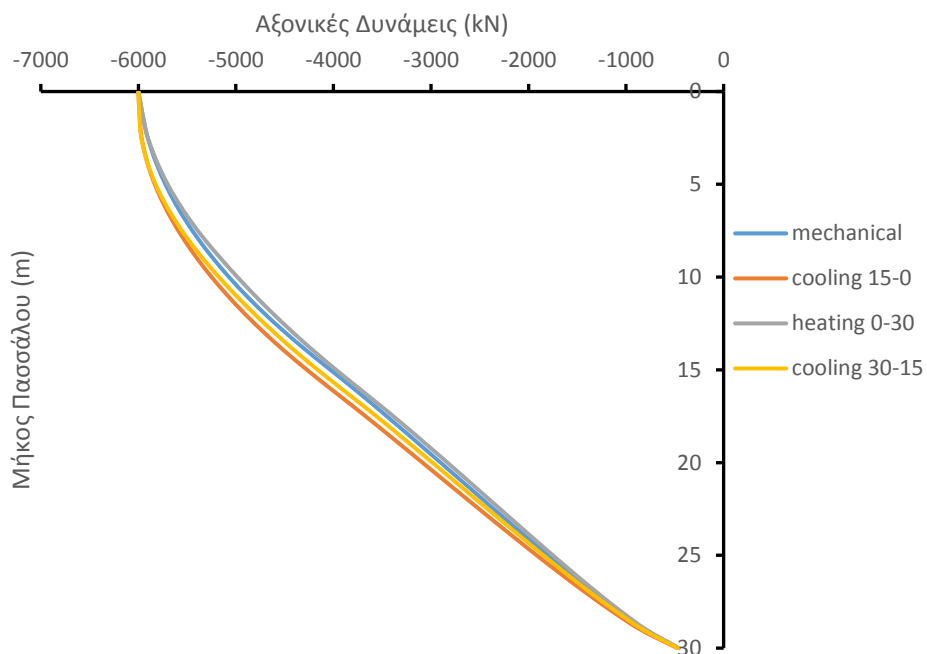
σημείο αναφέρεται το σημείο στο οποίο ο πάσσαλος δεν εμφανίζει θλίψη ή εφελκυσμό κατά τη ψύξη και τη θέρμανση αντίστοιχα.

Επιπλέον, σχετικά με την τοποθέτηση μηχανικής φόρτισης 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου με βήμα θερμικής φόρτισης 6 μηνών βλ. Σχήμα 6.1.18, η αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C επιφέρει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις κατά μήκος όλου του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιβολή μεγάλης μηχανικής φόρτισης, με αποτέλεσμα η πλευρική τριβή να είναι μικρότερη στο πάνω μέρος του πασσάλου σε σύγκριση με αυτή που εμφανίζεται κατά την απουσία ψύξης (Σχήμα 6.1.18) και μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του. Αντίστοιχα, η θέρμανση του πασσάλου επιφέρει μεγαλύτερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται ο πάσσαλος κατά τη θέρμανση σε σύγκριση με το έδαφος, γεγονός που συμβαίνει λόγω της μη-μόνιμης θερμικής ροής και προκαλεί την ελάττωση της μηχανικής πλευρικής τριβής. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους Tsetoulidis et al. (2016) σε αργιλικό έδαφος για μη-μόνιμη θερμική ροή. Επίσης, για την τελική ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15 °C επιφέρει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις σε σύγκριση με την μηχανική φόρτιση κατά μήκος όλου του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μικρότερη πλευρική τριβή που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του πασσάλου στο πάνω μέρος σε σύγκριση με αυτή που εμφανίζεται κατά την απουσία ψύξης (Σχήμα 6.1.18) και στη μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη μηχανική φόρτιση που ασκείται στην κεφαλή με αποτέλεσμα την εμφάνιση διατμητικής αστοχίας σε ένα σημείο της διεπιφάνειας. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι οι αξονικές δυνάμεις που παρατηρούνται ανάμεσα στις τρεις θερμικές φορτίσεις είναι σχετικά παραπλήσιες και εμφανίζουν αριθμητικά μικρές αποκλίσεις.

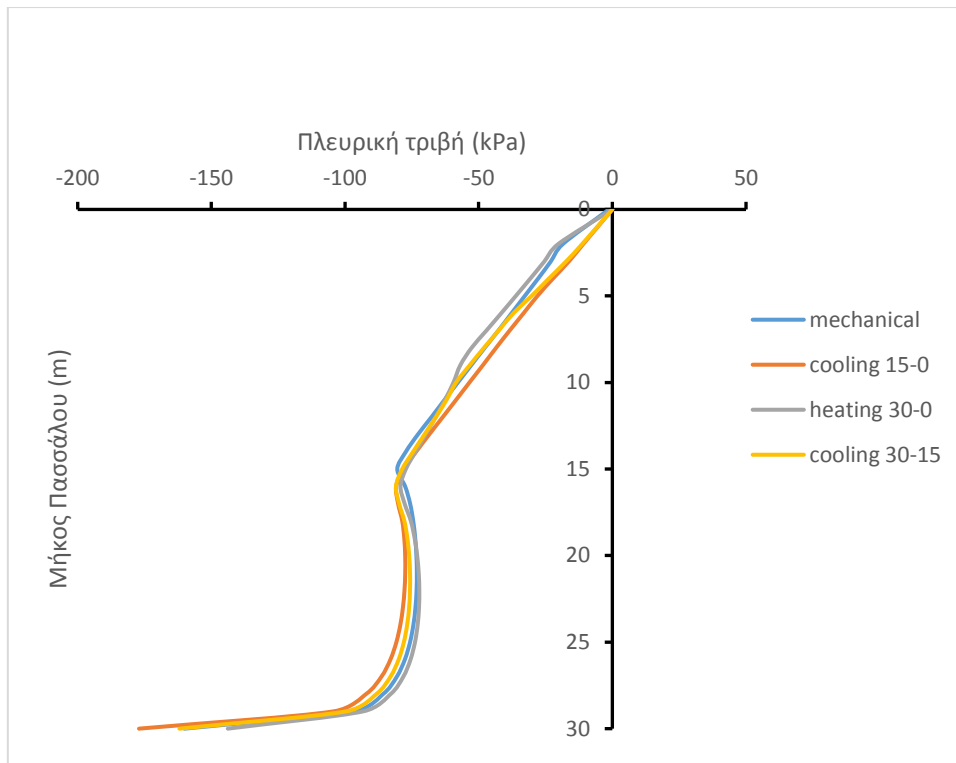
Για την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου (Βλ. Σχήμα 6.1.19) η παραγόμενη πλευρική τριβή και των 3 μη-μόνιμων θερμικών φορτίσεων παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτή της μηχανικής φόρτισης στο άνω μέρος του πασσάλου ($z < 15\text{m}$) και μικρότερη στο κάτω μέρος του πασσάλου ($z > 15\text{m}$). Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται επειδή με την επιβολή μεγάλων μηχανικών φορτίσεων η μέγιστη διατμητική αντοχή έχει ήδη εμφανιστεί από το μηχανικό φορτίο σε ένα σημείο του πασσάλου οπότε η πλευρική τριβή στο άνω μέρος του πασσάλου είναι αναγκασμένη με τη θερμική φόρτιση να ελαττωθεί. Αξίζει να αναφερθεί ότι παραπλήσια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για τη θέρμανση του πασσάλου με $\Delta T = +30$ και στην έρευνα του Freitas Assunção (2014).



Σχήμα 6.1.20) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμης ροής και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.1.21) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμης ροής και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.1.22) Κατανομή πλευρική τριβή για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μόνιμης ροής και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης.

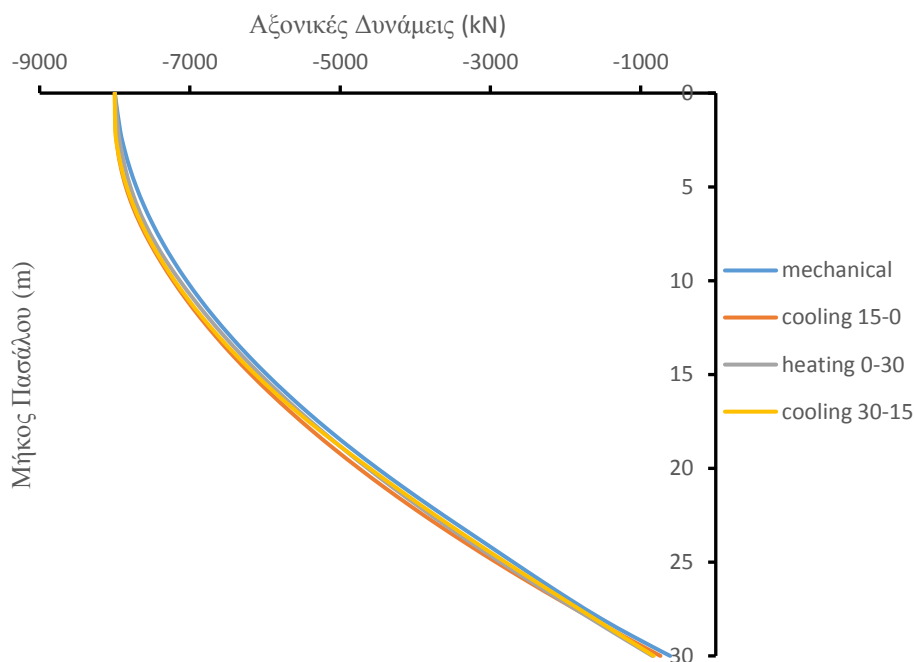
Από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.1.20) παρατηρείται ότι για μηχανική φόρτιση 6000 kN, για μόνιμη ροή αρχικής ψύξης του πασσάλου από του 15 °C στους 0 °C προκαλούνται μεγαλύτερες καθιζήσεις κατά μήκος του πασσάλου σε σύγκριση με τις καθιζήσεις που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση (με τη μεγαλύτερη καθίζηση να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου). Αντιθέτως, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί μικρότερες καθιζήσεις σε όλο το μήκος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη καθίζηση να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παραπλήσια αποτελέσματα για την κατανομή των καθιζήσεων για μόνιμο χρονικό διάστημα θέρμανσης παρουσιάστηκαν και στην έρευνα του Rui Assunção (2014). Επιπρόσθετα, κατά την τελική ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15°C εμφανίζονται παραπλήσιες καθιζήσεις με αυτές που παρουσιάζονται κατά τη μηχανική φόρτιση.

Επιπλέον, σχετικά με την τοποθέτηση μηχανικής φόρτισης 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου, όπως παρατηρείται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.1.21) οι θερμικές φορτίσεις (αρχική ψύξη-θέρμανση-τελική ψύξη) επιφέρουν παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πασσάλου. Αυτό οφείλεται στην παρόμοια πλευρική τριβή που προκύπτει από τις θερμικές φορτίσεις σε σύγκριση με τη μηχανική φόρτιση. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι σε αυτήν την περίπτωση το έδαφος συστέλλεται ή διαστέλλεται περισσότερο από τον πάσσαλο λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή του θερμικής διόγκωσης.

Για την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου η παραγόμενη πλευρική τριβή και των 3 θερμικών φορτίσεων παρουσιάζει παρόμοια

συμπεριφορά και σχεδόν ταυτίζεται αριθμητικά με αυτή που αναπτύσσεται με την επιβολή μηχανικής φόρτισης (βλ. Σχήμα 6.1.22). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι έχει ήδη εμφανιστεί η διατμητική αντοχή σε ένα σημείο του πασσάλου με την επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN.

Επιβολή μηχανικής φόρτισης 8000 kN



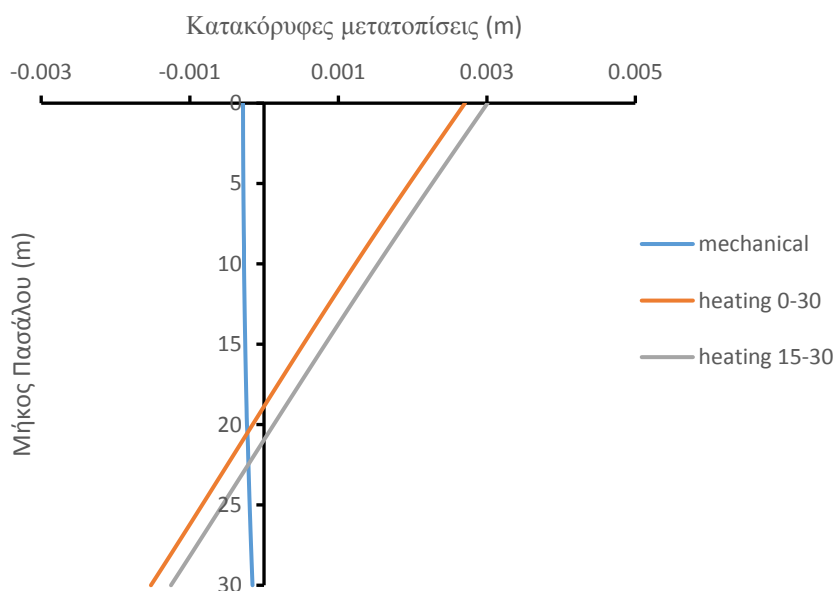
Σχήμα 6.1.23) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 8000 kN μηχανικής φόρτισης.

Γενικότερα, με την αύξηση του φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου οι αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου για όλες τις θερμικές αναλύσεις τείνουν να ταυτιστούν με τη μηχανική αξονική δύναμη. Για αυτόν ακριβώς το λόγο στο Σχήμα 6.1.23 που παρατίθεται παραπάνω, στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με μηχανική φόρτιση 8000 kN παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις, όπως αυτές προκύπτουν από τις διαφορετικές θερμικές φορτίσεις, εμφανίζουν σχεδόν πλήρη ταύτιση με τη μηχανική αξονική δύναμη. Σύμφωνα με τους (Rotta Loria et al, 2015) γίνεται μια αναφορά στις δοκιμές των (Laloui et al.) οι οποίες αποδεικνύουν ότι στους ενεργειακούς πασσάλους για συνθήκες λειτουργίας η επιρροή που προκαλείται στις αξονικές δυνάμεις από την επιβολή θερμικών φορτίσεων καθορίζεται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, οι μεταβολές που εμφανίζονται στην κατανομή λόγω των θερμικών φορτίσεων γίνονται λιγότερο εμφανής με την αύξηση της μηχανικής φόρτισης, επειδή η μηχανική επίδραση είναι πιο σημαντική για την

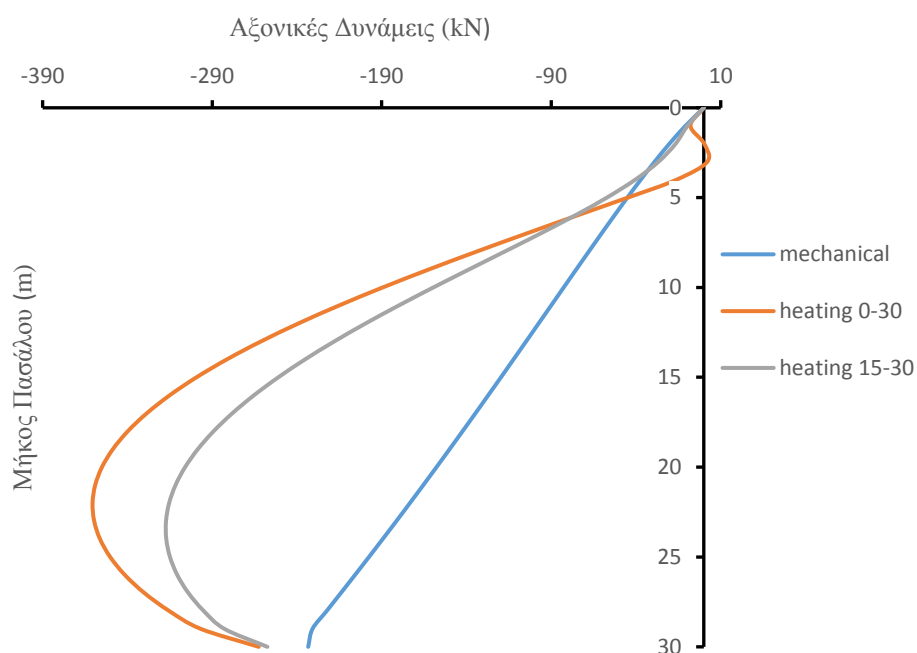
κατανομή των αξονικών δυνάμεων από αυτήν των θερμικών φορτίσεων. Δηλαδή, οι κυριότερες διαφορές απαντώνται στις μικρές μηχανικές φορτίσεις όπως προαναφέρθηκε.

6.2) Διαφορές μεταξύ των υπολογισθέντων καθιζήσεων, αξονικών δυνάμεων και διατμητικών τάσεων για δύο διαφορετικές διαδρομές θερμικής φόρτισης του πασσάλου.

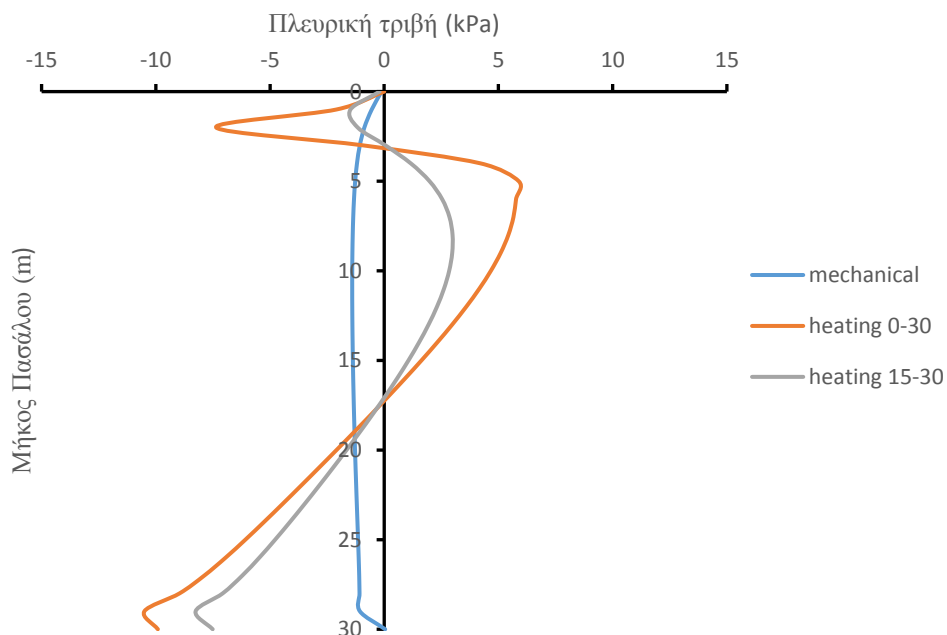
Τα διαγράμματα που εμφανίζονται παρακάτω συγκρίνουν την επίδραση στην απόκριση του πασσάλου, δύο διαφορετικών διαδρομών θέρμανσης του πασσάλου, την προαναφερθείσα θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C που ανήκει στον κύκλο θερμικής φόρτισης που εφαρμόστηκε (15°C → 0°C → 30°C) και μια απευθείας θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για διάρκεια θερμικής φόρτισης ίση με έξι μήνες, με λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ συντελεστή αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$. Στόχος της ανάλυσης είναι να δειχθούν οι πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η αρχική ψύξη του πασσάλου στις τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών που προκύπτουν από τη μετέπειτα θέρμανση. Αξίζει να επισημανθεί ότι τα θερμικά πεδία που προέκυψαν από τις θερμικές αναλύσεις για τις δύο θερμάνσεις είναι παραπλήσια.



Σχήμα 6.2.1) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων με επιβολή δύο διαφορετικών θερμάνσεων για διάρκεια 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.2.2) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων με επιβολή δύο διαφορετικών θερμάνσεων για διάρκεια 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.

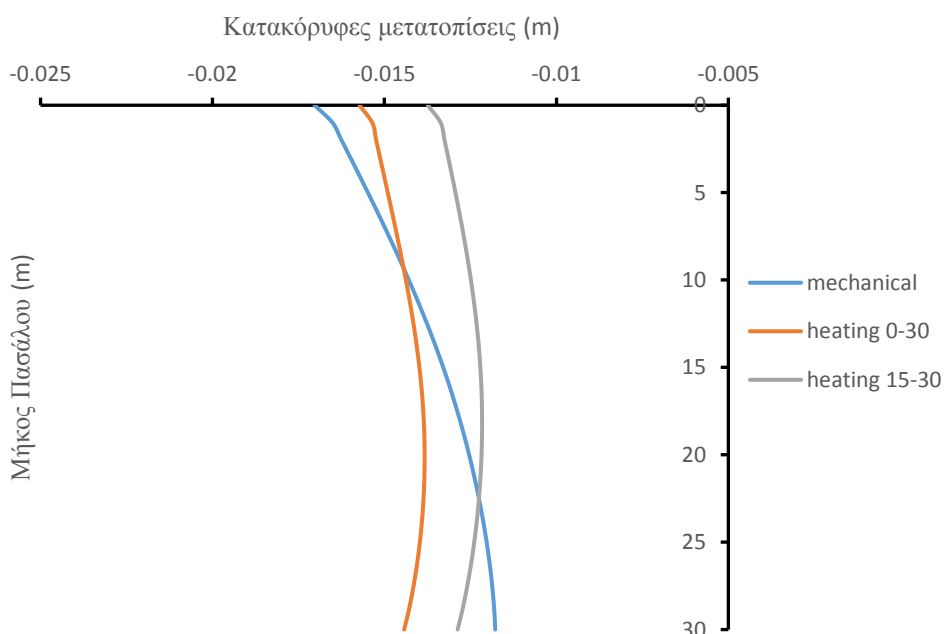


Σχήμα 6.2.3) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής με επιβολή δύο διαφορετικών θερμάνσεων για διάρκεια 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.

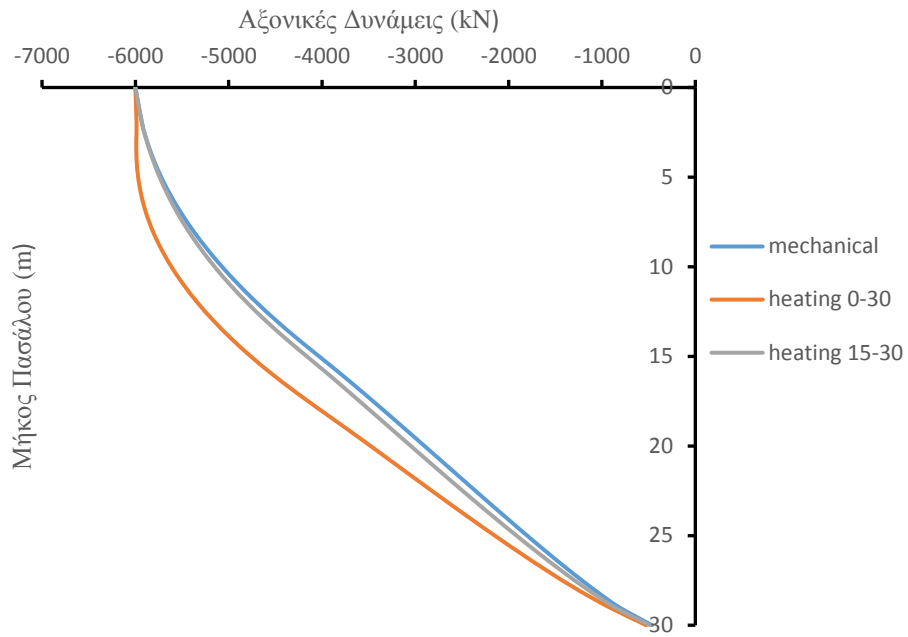
Από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.2.1) παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C που ανήκει στον κύκλο θερμικής φόρτισης το διάγραμμα των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι μετατοπισμένο κατά περίπου -0.4mm σε σχέση με αυτό για απευθείας θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην προϋπάρχουσα ψύξη η οποία μεταβάλλει τις ιδιότητες της διεπιφάνεια για τη διάρκεια των έξι μηνών με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγαλύτερες καθιζήσεις για τη θέρμανση του κύκλου.

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.2.2) παρατηρείται ότι κατά τη θέρμανση από 0 °C στους 30 °C εμφανίζονται μικρότερες αξονικές δυνάμεις στην κορυφή του πασσάλου (από 0 - 5 m) ενώ αντιθέτως παρουσιάζονται μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο υπόλοιπο μήκος του πασσάλου. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην προγενέστερη ψύξη του πασσάλου, πριν από τη θέρμανση, από 0 °C στους 30 °C, όπως εφαρμόστηκε στον κύκλο θερμικής μεταβολής του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκής ο χρόνος θερμικής φόρτισης των έξι μηνών, ώστε να αποφευχθούν οι επιρροές της ψύξης στην τιμή των αξονικών δυνάμεων.

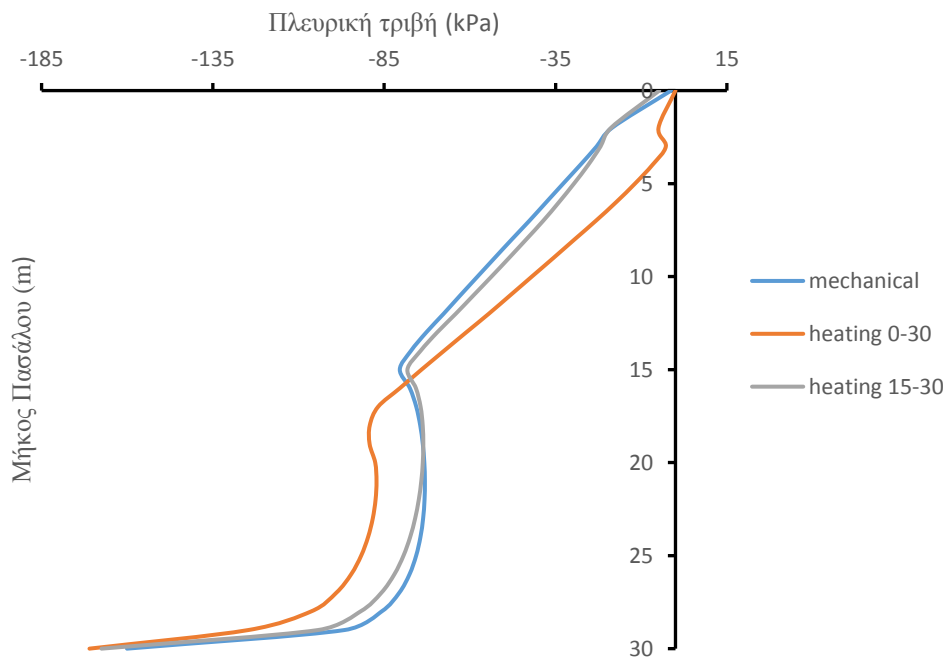
Όπως παρατηρεί κανείς μέσα από το Σχήμα 6.2.3 εμφανίζεται μεγαλύτερη αρνητική ή θετική αριθμητική τιμή πλευρικής τριβής σε σύγκριση με τη θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην προγενέστερη ψύξη του πασσάλου, πριν από τη θέρμανση, από 0 °C στους 30 °C, όπως εφαρμόστηκε στον κύκλο θερμικής μεταβολής του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκής ο χρόνος θερμικής φόρτισης των έξι μηνών, ώστε να αποφευχθούν οι επιρροές της ψύξης στη διεπιφάνεια εδάφους πασσάλου.



Σχήμα 6.2.4) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων με επιβολή δύο διαφορετικών θερμάνσεων για διάρκεια 6 μηνών και επιβολή 6000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.2.5) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων με επιβολή δύο διαφορετικών θερμάνσεων για διάρκεια 6 μηνών και επιβολή 6000 kN μηχανικής φόρτισης.



Σχήμα 6.2.6) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής με επιβολή δύο διαφορετικών θερμάνσεων για διάρκεια 6 μηνών και επιβολή 6000 kN μηχανικής φόρτισης.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι προκύπτουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των καθιζήσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής που υφίστανται, υπό την επιρροή των δύο θερμικών φορτίσεων, οι οποίες όσο αυξάνεται η επιβολή της μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου, διευρύνονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που θεωρηθεί κατάσταση μόνιμης θερμικής ροής (steady state) αναμένεται οι δύο διαφορετικές θερμάνσεις να προκαλέσουν παραπλήσια αποτελέσματα στις τιμές των παραπάνω εξεταζόμενων μεγεθών.

Πιο συγκεκριμένα, από το Σχήμα 6.2.4. παρατηρείται ότι για την πρόσθετη φόρτιση 6000 kN στην κεφαλή η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C που ανήκει στον κύκλο θερμικής φόρτισης προκαλεί μεγαλύτερες καθιζήσεις από την ανεξάρτητη θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C σε όλο το μήκος του πασσάλου, η διαφορά των οποίων αντιστοιχεί περίπου στο 14.5%. Επιπλέον, οι καμπύλες καθιζήσης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου των δύο θερμάνσεων είναι παράλληλες, όπως ακριβώς αναμένεται. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην προγενέστερη ψύξη του πασσάλου, πριν από τη θέρμανση, από 0 °C στους 30 °C ,όπως εφαρμόστηκε στον κύκλο θερμικής μεταβολής του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκής ο χρόνος θερμικής φόρτισης των έξι μηνών, ώστε να αποφευχθούν οι επιρροές της ψύξης στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους γεγονός που αυξάνει την τιμή των καθιζήσεων. Σύμφωνα με την έρευνα των Amatya et al. (2012) με την εναλλαγή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση) είναι δυνατό να προκληθούν μεγαλύτερες καθιζήσεις λόγω της μεταβολής στην αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους πασσάλου.

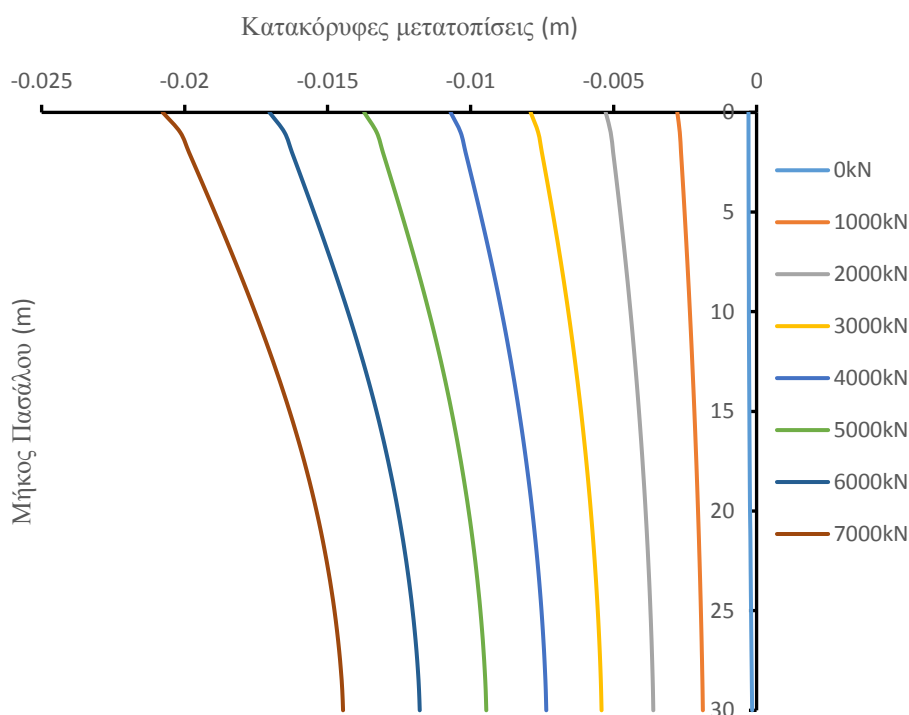
Επιπλέον από το Σχήμα 6.2.5, μπορεί κανείς να διακρίνει ότι κατά τη θέρμανση του κύκλου από 0 °C στους 30 °C για την φόρτιση των 6000 kN εμφανίζονται μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις οι οποίες φτάνουν έως και (περίπου 15 %) στο κέντρο του πασσάλου για το φορτίο λειτουργίας σε σύγκριση με τη θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην προγενέστερη ψύξη του πασσάλου, πριν από τη θέρμανση, από 0 °C στους 30 °C ,όπως εφαρμόστηκε στον κύκλο θερμικής μεταβολής του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκής ο χρόνος θερμικής φόρτισης των έξι μηνών, ώστε να αποφευχθούν οι επιρροές της ψύξης στις ιδιότητες της διεπιφάνειας και να προκαλείται αύξηση στην τιμή των αξονικών δυνάμεων. Σύμφωνα με την έρευνα των Amatya et al. (2012) η εναλλαγή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση) είναι δυνατό να επιφέρει μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις λόγω της μεταβολής στην αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους πασσάλου με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου.

Τέλος, από το Σχήμα 6.2.6 φαίνεται ότι κατά τη θέρμανση από 0 °C στους 30 °C εμφανίζεται μικρότερη πλευρική τριβή στο άνω μέρος του πασσάλου και μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του σε σύγκριση με τη θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C. Επιπροσθέτως, για την επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN η πλευρική τριβή που παράγεται κατά τη θέρμανση από τους 15 °C στους 30 °C είναι παραπλήσια με αυτή που δημιουργείται παρουσία μόνο μηχανικής φόρτισης. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην προγενέστερη ψύξη του πασσάλου, πριν από τη θέρμανση, από 0 °C στους 30 °C ,όπως εφαρμόστηκε στον κύκλο θερμικής μεταβολής του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκής η διάρκεια θερμικής φόρτισης των έξι μηνών, ώστε να

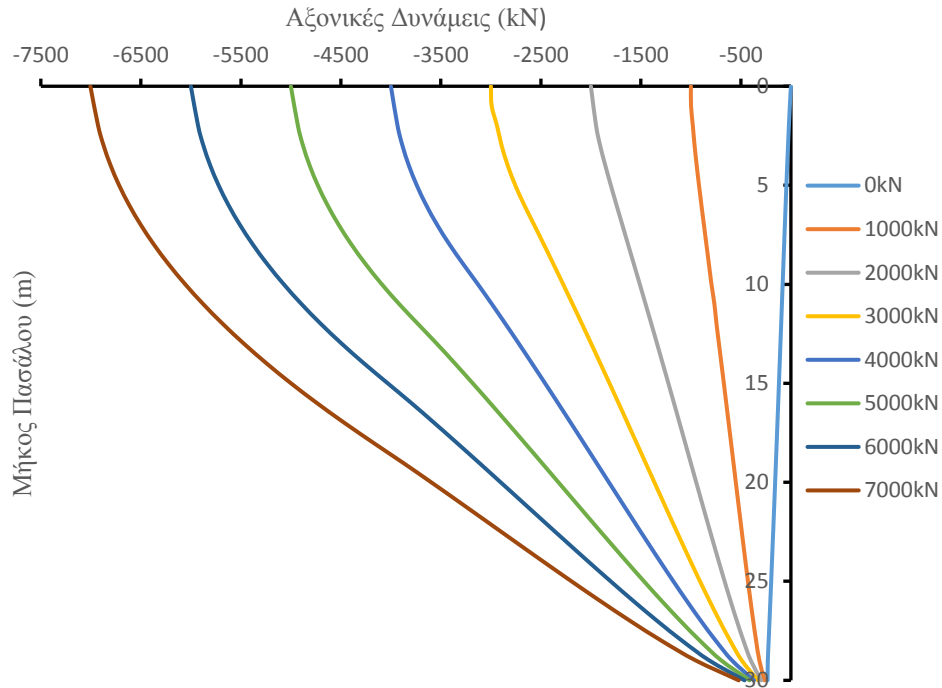
αποφευχθούν οι επιρροές της ψύξης στην τιμή της πλευρικής τριβής. Σύμφωνα με την έρευνα των Amatya et al. (2012) η εναλλαγή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση) είναι δυνατό να επιφέρει αλλαγή στην κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου λόγω της μεταβολής στην αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους πασσάλου.

6.3) Επιρροή του μηχανικού φορτίου

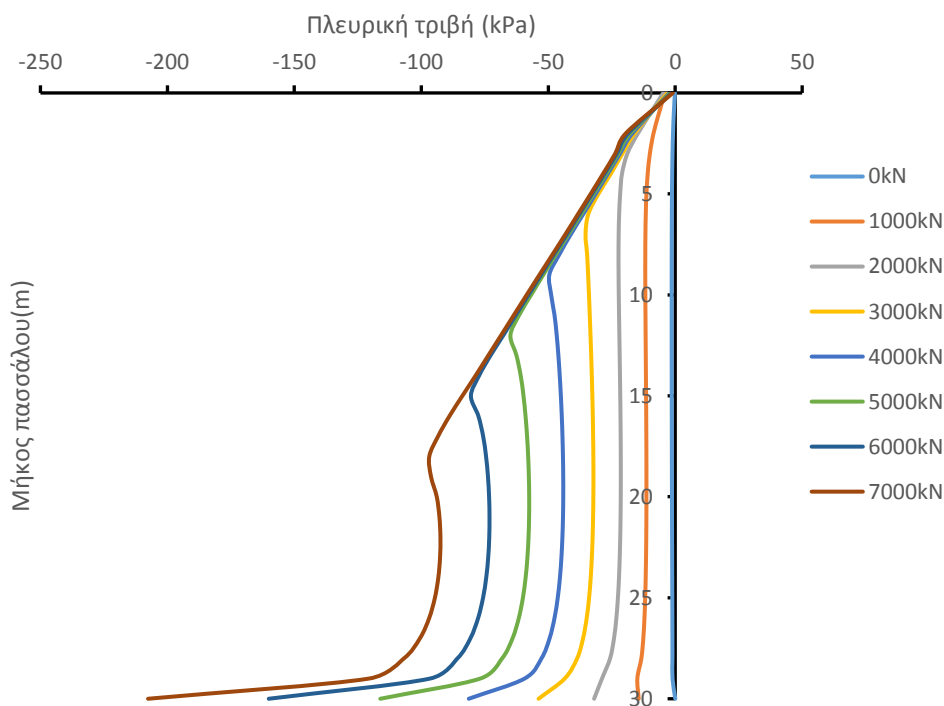
Πραγματοποιήθηκαν οχτώ αναλύσεις για παρουσία φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου 0 kN, 1000 kN, 2000 kN, 3000 kN, 4000 kN, 5000 kN, 6000 kN, 7000 kN με σκοπό την εύρεση της μεταβολής των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής για κάθε θερμική φόρτιση με την αλλαγή του επιβαλλόμενου φορτίου στην κεφαλή. Οι αναλύσεις ολοκληρώθηκαν με τη χρήση διάρκειας θερμικής φόρτισης των 6 μηνών, λόγου $\alpha_s/\alpha_p = 3$, συντελεστή αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$. Τα αποτελέσματα των εξεταζόμενων μεγεθών θα παρατεθούν για απουσία θερμικής φόρτισης, για την αρχική επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C και για τη μετέπειτα θέρμανση του κύκλου από τους 0 °C στους 30 °C.



Σχήμα 6.3.1) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης.



Σχήμα 6.3.2) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης.



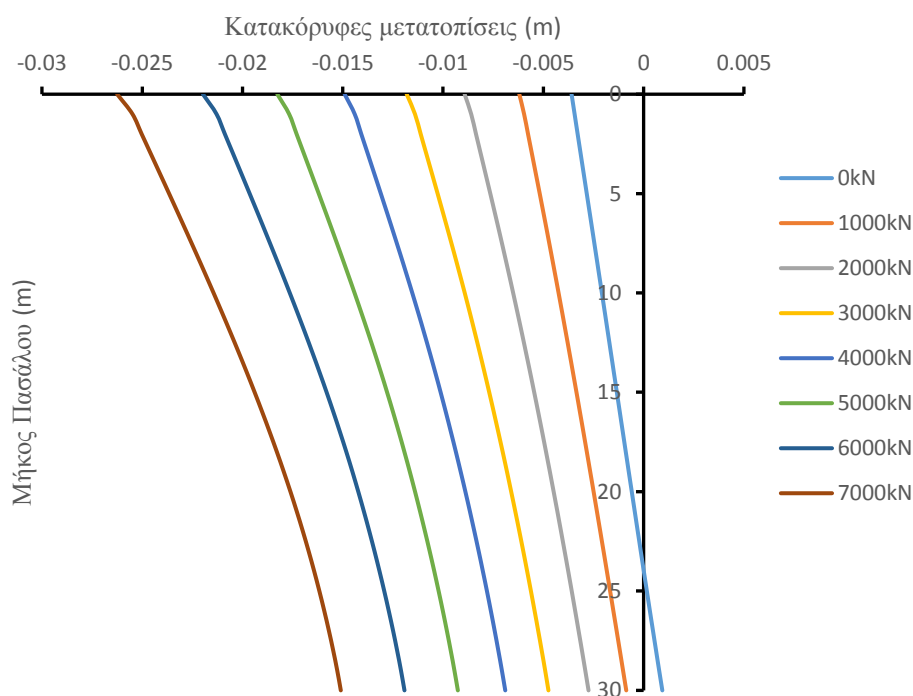
Σχήμα 6.3.3) Κατανομή πλευρικής τριβής σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης.

Αρχικά, για την επιβολή μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης παρατηρείται από το Σχήμα 6.3.1 μια σχετικά ομοιόμορφη αύξηση των καθιζήσεων, καθώς αυξάνεται το μηχανικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου. Η

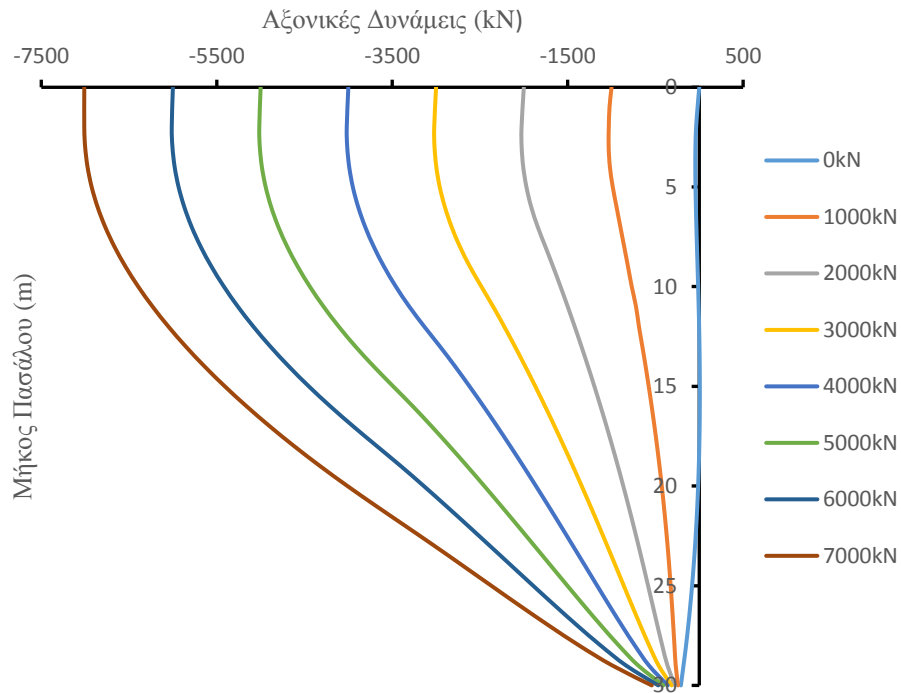
συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη επειδή με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου προκαλείται αύξηση των καθιζήσεων. Οι μεγαλύτερες καθιζήσεις απαντώνται στην κεφαλή του πασσάλου και στη συνέχεια μειώνονται κατά μήκος του με τις μικρότερες να εμφανίζονται στην αιχμή του.

Επιπλέον, μέσα από τα Σχήμα 6.3.2 φαίνεται ότι για την επιβολή μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης εμφανίζεται μια σχετικά παραπλήσια αύξηση της αξονικής δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου, με την μεγέθυνση του μηχανικού φορτίου. Επίσης, παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις τείνουν να εκτονωθούν στην αιχμή του πασσάλου με την εμφάνιση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους οι οποίες δημιουργούνται λόγω της τριβής που εμφανίζεται και ενισχύουν την αντίσταση έναντι στην κίνηση του πασσάλου εξαιτίας της θλιπτικής κατακόρυφης φόρτισης. Παρόμοια συμπεριφορά στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων παρουσιάζεται και στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους (Rotta Loria et al, 2015) οι οποίοι πραγματοποίησαν παραπλήσια αριθμητική ανάλυση σε αμμώδες έδαφος για μηχανική φόρτιση του πασσάλου.

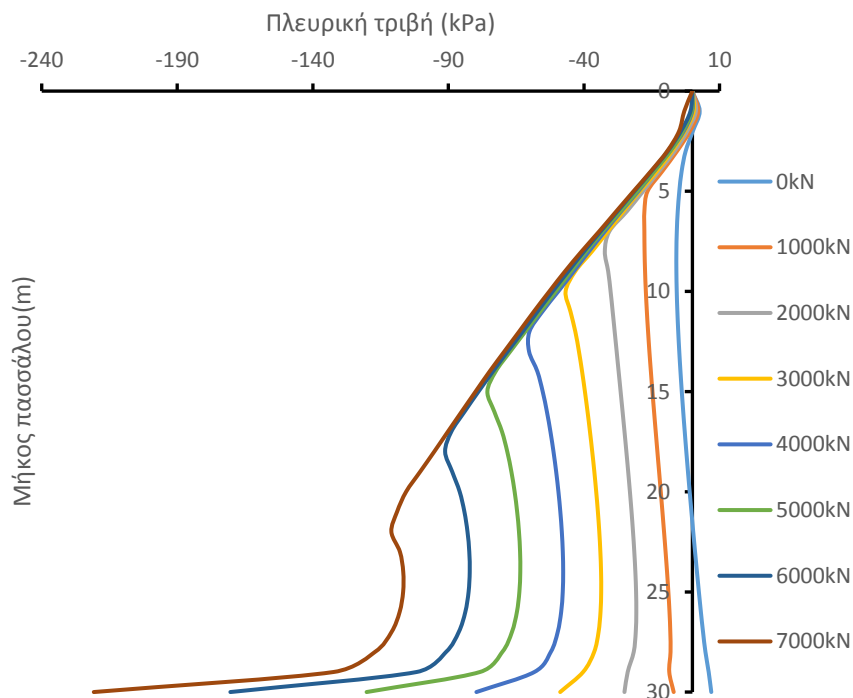
Τέλος, όπως παρατηρείται μέσα από το Σχήμα 6.3.3 για την επιβολή μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης εμφανίζεται μια σχετικά ομοιόμορφη αύξηση της πλευρικής τριβής, η οποία με την αύξηση του μηχανικού φορτίου αρχίζει να εκδηλώνεται προς το κάτω μέρος του πασσάλου με την εμφάνιση της διατμητικής αντοχής. Πιο συγκεκριμένα στην κορυφή του πασσάλου παρουσιάζονται μικρές αριθμητικές τιμές για την πλευρική τριβή, η οποία αυξάνεται κατά μήκος του πασσάλου και αποκτά τη μέγιστη τιμή της στην αιχμή.



Σχήμα 6.3.4) Κατακόρυφες μετατοπίσεις σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 -7000 kN με επιβολή ψύξης 15 °C -0 °C για διάρκεια έξι μηνών.



Σχήμα 6.3.5) Αξονικές δυνάμεις σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN με επιβολή ψύξης 15 °C - 0 °C για διάρκεια έξι μηνών.

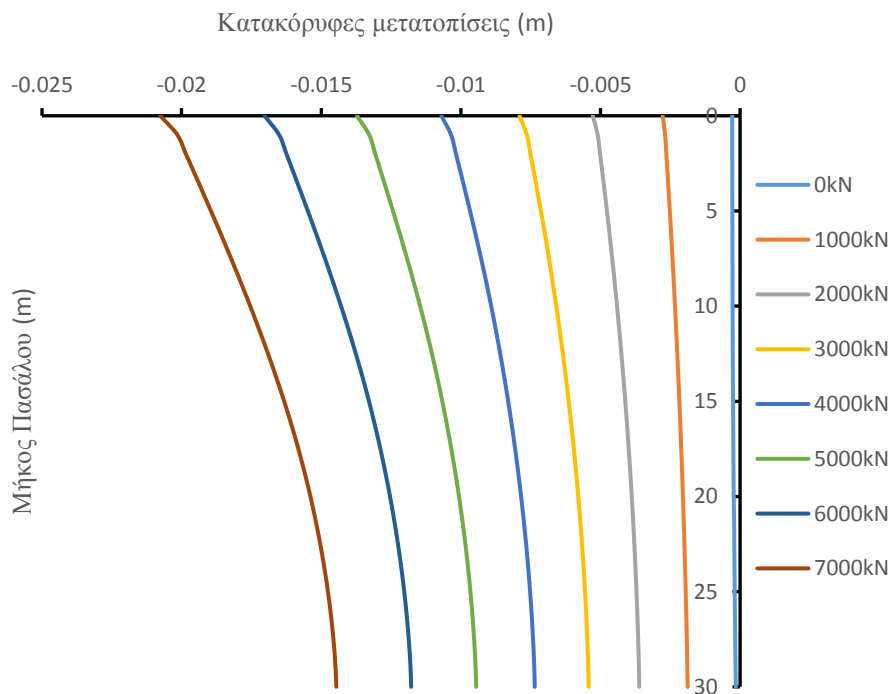


Σχήμα 6.3.6) Κατανομή πλευρικής τριβής σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN με επιβολή ψύξης 15 °C - 0 °C για διάρκεια έξι μηνών.

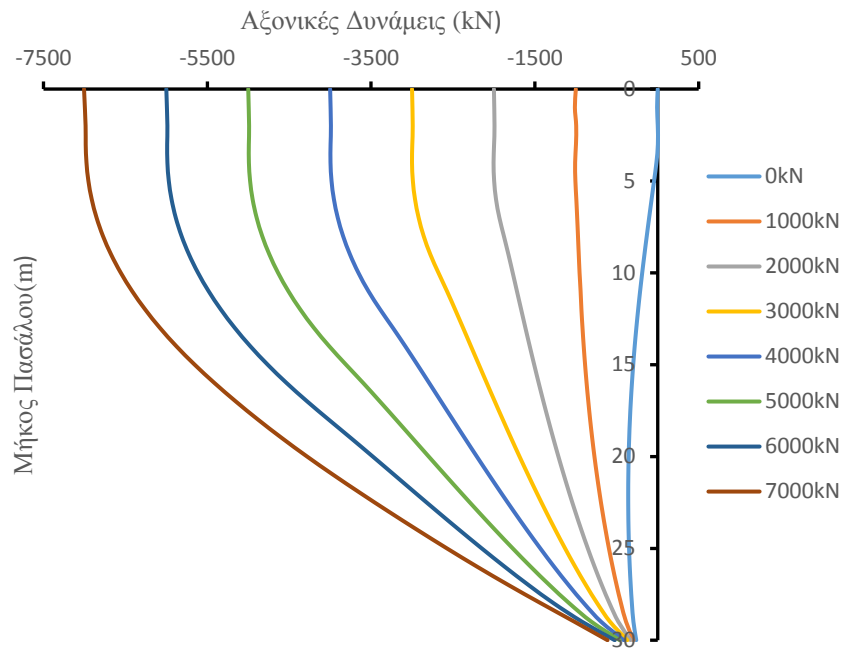
Αρχικά, για την επιβολή μηχανικής φόρτισης με παρουσία ψύξης παρατηρείται από το Σχήμα 6.3.4 μια σχετικά ομοιόμορφη αύξηση της καθίζησης, καθώς αυξάνεται το μηχανικό θλιπτικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου και κατά μήκος του. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παραπάνω κατανομή είναι παραπλήσια με αυτήν που εμφανίζεται υπό την επίδραση μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία ψύξης.

Επιπλέον, μέσα από τα Σχήμα 6.3.5 φαίνεται ότι για την επιβολή μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης εμφανίζεται μια σχετικά παραπλήσια αύξηση της αξονικής δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου, με την μεγέθυνση του μηχανικού φορτίου. Επίσης, παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις τείνουν να εκτονωθούν στην αιχμή του πασσάλου. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παραπάνω κατανομή είναι παραπλήσια με αυτήν που εμφανίζεται υπό την επίδραση μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία ψύξης.

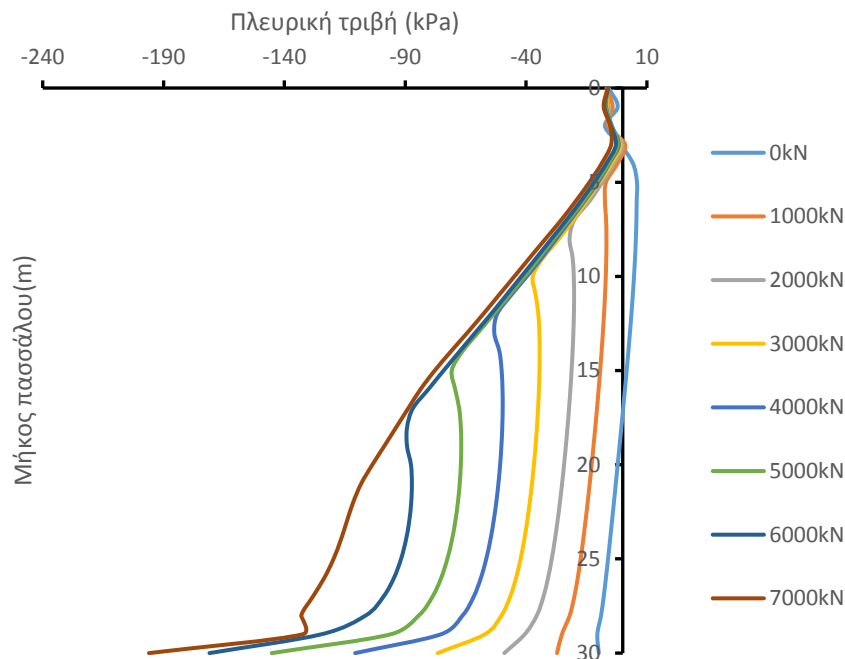
Τέλος, όπως παρατηρείται μέσα από το Σχήμα 6.3.6 για την επιβολή μηχανικής φόρτισης με την επιβολή ψύξης εμφανίζεται μια σχετικά ομοιόμορφη αύξηση της πλευρικής τριβής, η οποία με την αύξηση του μηχανικού φορτίου αρχίζει να εκδηλώνεται προς το κάτω μέρος του πασσάλου με την εμφάνιση της διατμητικής αντοχής. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι παραπλήσια συμπεριφορά συναντάται για τη μηχανική πλευρική τριβή χωρίς την ψύξη του πασσάλου.



Σχήμα 6.3.7) Κατακόρυφες μετατοπίσεις σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN με επιβολή θέρμανσης 0 °C -30 °C για διάρκεια έξι μηνών.



Σχήμα 6.3.8) Αξονικές δυνάμεις σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN με επιβολή θέρμανσης 0 °C -30 °C για διάρκεια έξι μηνών.



Σχήμα 6.3.9) Κατανομή πλευρικής τριβής σε συνάρτηση με το μήκος πασσάλου για μηχανικές φορτίσεις 0 - 7000 kN με επιβολή θέρμανσης 0 °C -30 °C για διάρκεια έξι μηνών.

Αρχικά, για την επιβολή μηχανικής φόρτισης με παρουσία θέρμανσης παρατηρείται από το Σχήμα 6.3.7 μια σχετικά ομοιόμορφη αύξηση της καθίζησης, καθώς αυξάνεται το μηχανικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου και κατά μήκος του. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παραπάνω κατανομή είναι παραπλήσια με αυτήν που εμφανίζεται υπό την επίδραση μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία θέρμανσης.

Επιπλέον, μέσα από τα Σχήμα 6.3.8 φαίνεται ότι για την επιβολή μηχανικής φόρτισης με την ταυτόχρονη παρουσία θέρμανσης εμφανίζεται μια σχετικά παραπλήσια αύξηση της αξονικής δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου, με την μεγέθυνση του μηχανικού φορτίου. Επίσης, παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις τείνουν να εκτονωθούν στην αιχμή του πασσάλου. Παρόμοια συμπεριφορά στην κατανομή των αξονικών τάσεων παρουσιάζεται και στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους Rotta Loria et al. (2015), οι οποίοι πραγματοποίησαν παραπλήσια αριθμητική ανάλυση σε αμμώδες έδαφος για θέρμανση του πασσάλου $\Delta T = +15^\circ\text{C}$ και $\Delta T = +30^\circ\text{C}$.

Τέλος, όπως παρατηρείται μέσα από το Σχήμα 6.3.9 για την επιβολή μηχανικής φόρτισης μέχρι την τιμή των 7000 kN με την παρουσία θέρμανσης εμφανίζεται μια σχετικά ομοιόμορφη αύξηση της πλευρικής τριβής, η οποία με την αύξηση του μηχανικού φορτίου αρχίζει να εκδηλώνεται προς το κάτω μέρος του πασσάλου με την εμφάνιση της διατμητικής αντοχής, συμπεριφορά που εμφανίζεται και στην αντίστοιχη μηχανική πλευρική τριβή. Αξίζει να επισημανθεί ότι οι διατμητικές τάσεις που προκύπτουν στη διεπιφάνεια από τη θέρμανση έχουν επηρεαστεί από την προγενέστερη ψύξη εξαιτίας της μεταβολής που προκαλείται στις ιδιότητες της διεπιφάνειας.

6.4) Επιρροή της διάρκειας της θερμικής φόρτισης

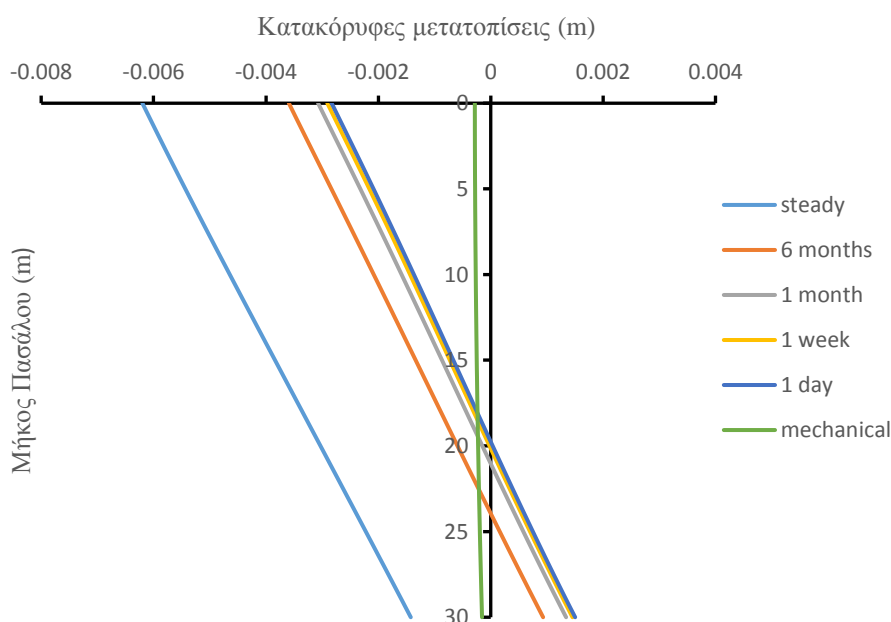
Τα διαγράμματα επιρροής του χρόνου ολοκλήρωσης του κάθε βήματος της θερμικής ανάλυσης στις κατακόρυφες μετατοπίσεις, στις αξονικές δυνάμεις και στην πλευρική τριβή κατά μήκος του πασσάλου εξήχθησαν μέσα από αναλύσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$, $\alpha_s/\alpha_p = 1$, $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$, $\alpha_s/\alpha_p = 0$, συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με απουσία μηχανικής φόρτισης και παρουσία 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου με προσομοίωση διαφορετικής χρονικής διάρκειας $T(\text{s})$ για την ολοκλήρωση του καθενός βήματος της θερμικής ανάλυσης. Όπως αναφέρθηκε, ο χρόνος εκτέλεσης κάθε θερμικής ανάλυσης (ψύξη, θέρμανση) του πασσάλου επιδρά σημαντικά στην κατανομή των θερμοκρασιακών πεδίων στην ευρύτερη περιοχή του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο, με αποτέλεσμα να επηρεάζει την αριθμητική τιμή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, ανάλογα με τον λόγο α_s/α_p που θα προκύψει από τους συντελεστές θερμικής διόγκωσης του

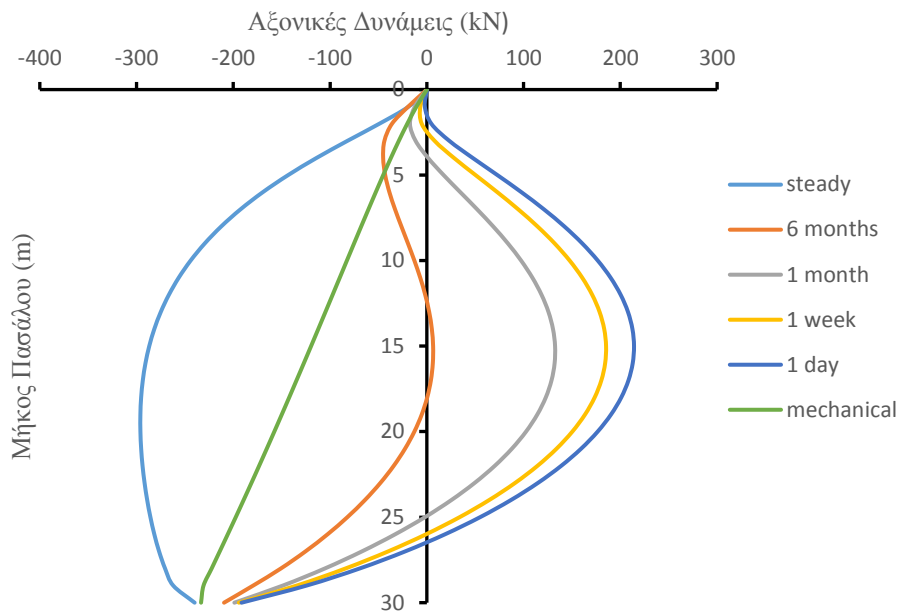
εδάφους δια του πασσάλου η χρονική διάρκεια εκτέλεσης της θερμικής φόρτισης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη φορά των επιπρόσθετων διατμητικών τάσεων που θα προκύψουν από αυτήν στη διεπιφάνεια.

Ο χρόνος εισέρχεται στις θερμικές αναλύσεις στα βήματα ολοκλήρωσης (steps) τους με τη μορφή δευτερολέπτων (s). Τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν περιέχουν αναλύσεις, στις οποίες τα θερμικά τους βήματα εκτελέστηκαν σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady state) και σε μη-μόνιμη ροή (transient state) χρονικού διαστήματος 6 μηνών, 1 μήνα, 1 εβδομάδας, 1 ημέρας.

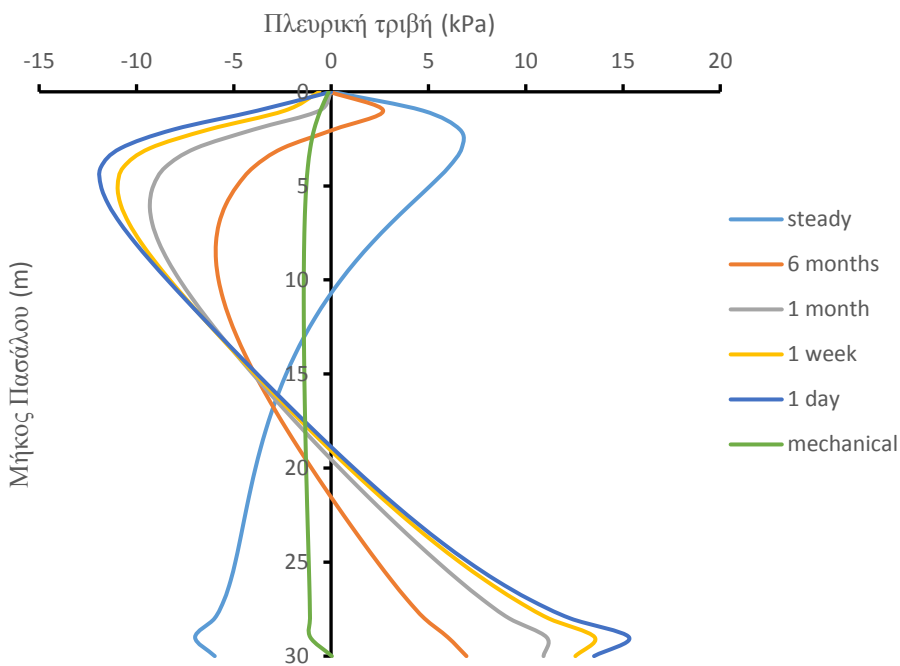
Αναμένεται ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ θα προκύψουν οι μέγιστες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής λόγω της προσομοίωσης διαφορετικής χρονικής διάρκειας και επομένως δεν κρίνεται απαραίτητο να παρατεθούν τα διαγράμματα σύγκρισης κύκλων θερμικής φόρτισης για τους λόγους $\alpha_s/\alpha_p = 1$, $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$. Ωστόσο, όσον αφορά τις τιμές των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής της, λόγω των διαφορών που προκύπτουν στην κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου εξαιτίας της διαφορετικής χρονικής διάρκειας προσομοίωσης, θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$ για απουσία μηχανικής φόρτισης. Επιπλέον, αξίζει να επισημανθεί στην περίπτωση που θεωρηθεί το έδαφος ως θερμικά αδρανές δηλαδή για συντελεστή θερμικής διόγκωσης $\alpha_s = 0$ όπως στην έρευνα των Bourne – Webb et al. (2011) που παρατέθηκε παραπάνω στο υποκεφάλαιο 2.3 η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της κάθε θερμικής φόρτισης δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής που εμφανίζεται.



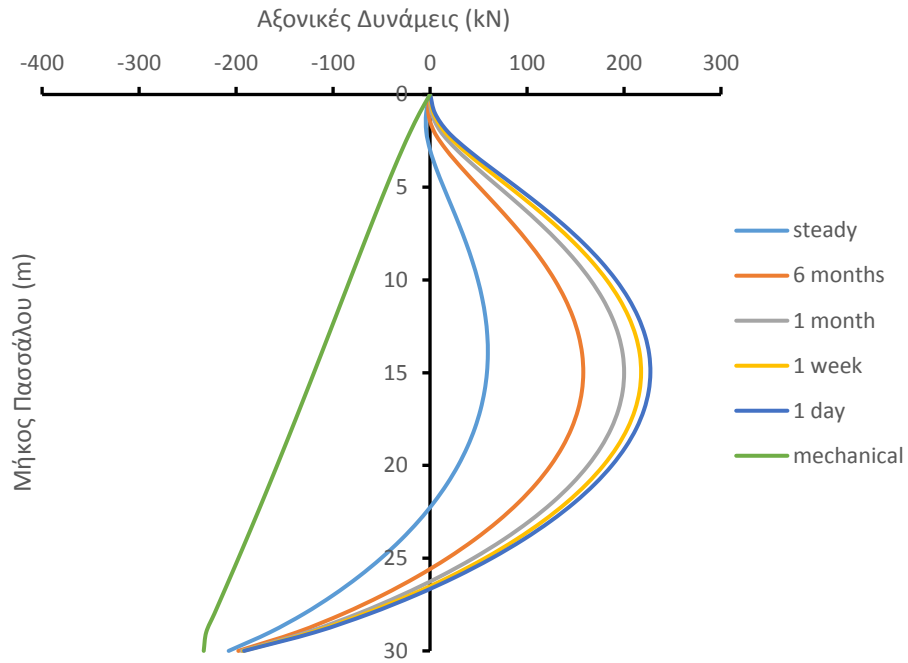
Σχήμα 6.4.1) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



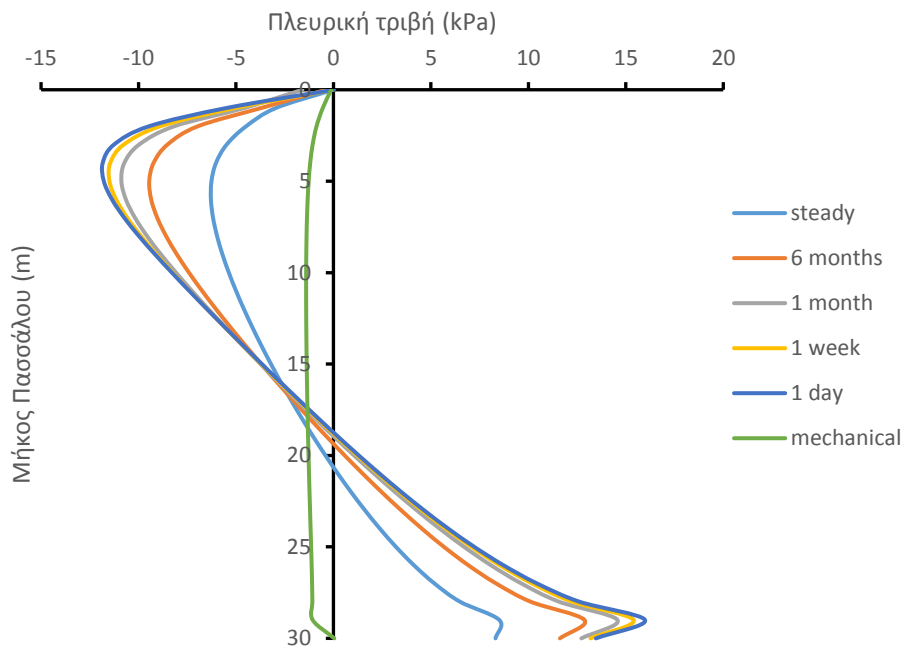
Σχήμα 6.4.2) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.3) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.4) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 1$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.5) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 1$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.

Όπως παρατηρεί κανείς μέσα από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.4.1) για την επιβολή της αρχικής ψύξης $15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ με λόγο $a_s/a_p = 3$ και απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται, ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας $T(s)$ εκτέλεσης του βήματος της αυξάνεται και η καθίζηση κατά μήκος του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που παρουσιάζει η εδαφική επιφάνεια με τη μεγαλύτερη πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο. Ειδικότερα, για τη μόνιμη χρονική διάρκεια θερμικής φόρτισης παρατηρούνται καθιζήσεις σε όλο το μήκος του πασσάλου επειδή για $a_s/a_p = 3$ συστέλλεται περισσότερο το έδαφος με αποτέλεσμα ολόκληρος ο πάσσαλος να καθιζάνει. Η χρονική διάρκεια της 1 εβδομάδας και της 1 ημέρας παράγουν παρόμοιες κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου και για τις δύο φορτίσεις, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για οποιοδήποτε χρόνο μικρότερο της μίας εβδομάδας στο βήμα της θερμικής ανάλυσης, οι αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων θα είναι παραπλήσιες κατά μήκος του πασσάλου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η αλλαγή της χρονικής διάρκειας του εδάφους δεν επηρεάζει την μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, για αύξηση του επιβαλλόμενου χρονικού διαστήματος ψύξης παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Αναλόγως, όπως προαναφέρθηκε, για λόγο $a_s/a_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος a_s/a_p .

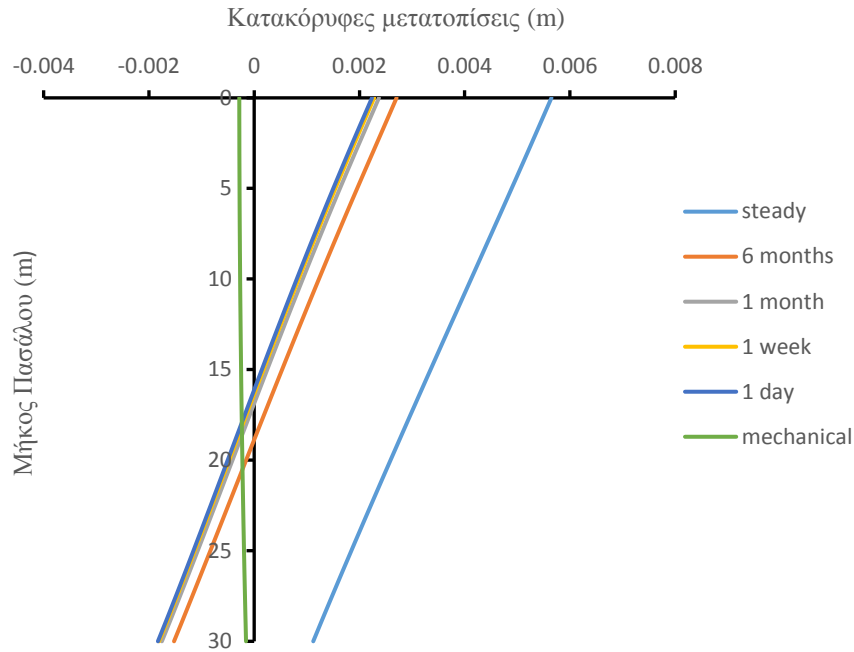
Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.4.2), για την επιβολή της αρχικής ψύξης $15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ με λόγο $a_s/a_p = 3$ και απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται, ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας (T) εκτέλεσης της ψύξης μειώνονται οι εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου οι οποίες για 6 μήνες και μόνιμου βήματος ψύξη μετατρέπονται σε θλιπτικές. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που παρουσιάζει το έδαφος με τη μεγαλύτερη πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία όλο και μικρότερων επιπρόσθετων εφελκυστικών δυνάμεων στη διεπιφάνεια λόγω της ψύξης. Για τα χρονικά διαστήματα του 1 μήνα, 1 εβδομάδας, 1 ημέρας εμφανίζονται στο μεγαλύτερο μήκος του πασσάλου εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις. Για μόνιμη χρονική διάρκεια ψύξης παράγονται επιπρόσθετες θλιπτικές τάσεις κατά μήκος του πασσάλου λόγω της μεγαλύτερης συστολής που υφίσταται το έδαφος για το λόγο $a_s/a_p = 3$ σε σύγκριση με τον πάσσαλο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη επιπρόσθετων τάσεων με φορά προς τα κάτω στη διεπιφάνεια στο άνω μέρος του πασσάλου και με φορά προς τα κάτω στο κάτω μέρος του πασσάλου. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση ψύξης για 6 μήνες στην κορυφή του πασσάλου για ($z < 5\text{m}$) προκύπτουν μεγαλύτερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις από τις αντίστοιχες μηχανικές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια παραπλήσια συμπεριφορά με αυτήν του μόνιμου χρονικού διαστήματος που αναπτύχθηκε παραπάνω.

Αντιθέτως, για το λόγο $a_s/a_p = 1$ (βλ. Σχήμα 6.4.4) το έδαφος για οποιοδήποτε χρονική διάρκεια ψύξης θα συστέλλεται λιγότερο σε σύγκριση με τον πάσσαλο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται γενικότερα μικρότερες εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις όσο αυξάνεται η χρονική διάρκεια της επιβολής της ψύξης. Το γεγονός αυτό

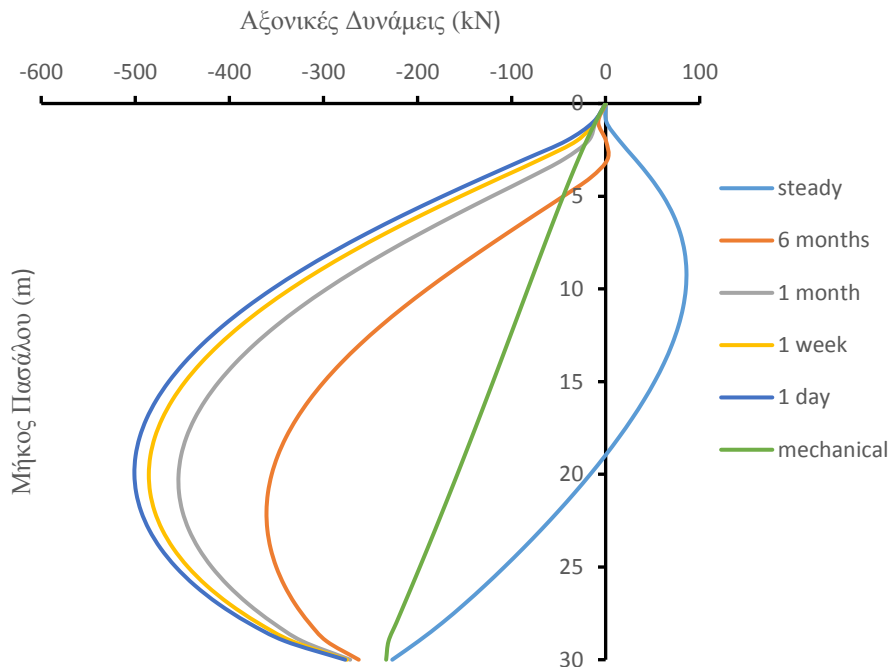
οφείλεται στη δημιουργία μικρότερων διατμητικών τάσεων με φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και με φορά προς τα κάτω στο κάτω μέρος του πασσάλου αντίστοιχα, με την αύξηση της χρονικής διάρκειας της ψύξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται να εμφανιστεί και για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$ του εδάφους αλλά με μικρότερες διακυμάνσεις.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.4.3) για την επιβολή της αρχικής ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ με λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ και απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του βήματος της ψύξης μειώνονται η πλευρική τριβή στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντιστρέφεται το πρόσημο της στο κάτω μέρος του. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται σε όλο τον πάσσαλο για τα χρονικά διαστήματα του 1 μήνα, 1 εβδομάδας, 1 ημέρας και για το μεγαλύτερο μήκος πασσάλου πλην της κορυφής για ψύξη 6 μηνών. Για μόνιμη ροή ψύξης, κατά την οποία το έδαφος συστέλλεται περισσότερο από τον πάσσαλο εξαιτίας του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης παρουσιάζεται για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ μία αντίστροφη συμπεριφορά στην κατανομή της πλευρικής τριβής. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται θετικές τιμές πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου λόγω της εμφάνισης διατμητικών τάσεων με φορά προς τα κάτω και αρνητικές τιμές πλευρικής τριβής στο κάτω μέρος του εξαιτίας της εμφάνισης διατμητικών τάσεων με φορά προς τα πάνω. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι για ψύξη 6 μηνών η πλευρική τριβή στην κορυφή του πασσάλου παρουσιάζει παραπλήσια συμπεριφορά με την περίπτωση της μόνιμης θερμικής ροής (steady state) όπου τείνει να γίνει θετική για ($z < 3\text{m}$).

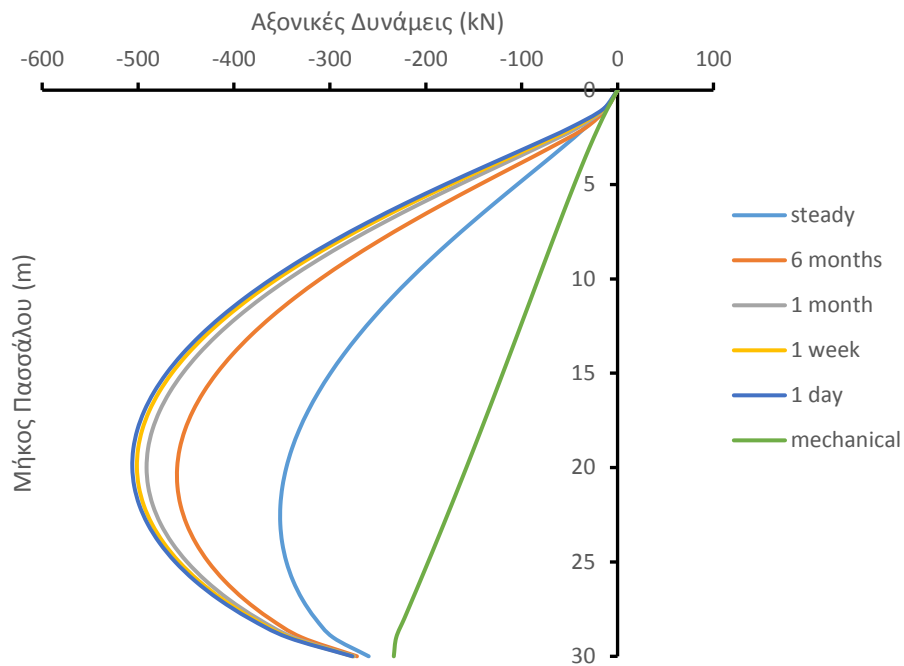
Αντιθέτως, για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$ (βλ. Σχήμα 6.4.5) όπου το έδαφος παρουσιάζει μικρότερη συστολή από την αντίστοιχη του πασσάλου παρατηρείται παραπλήσια συμπεριφορά για όλα τα χρονικά διαστήματα. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της χρονικής διάρκειας κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του βήματος της ψύξης μειώνονται οι διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και παρομοίως ελαττώνονται οι διατμητικές τάσεις με φορά προς τα κάτω στο κάτω μέρος του. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$ του εδάφους αλλά με μικρότερες διακυμάνσεις.



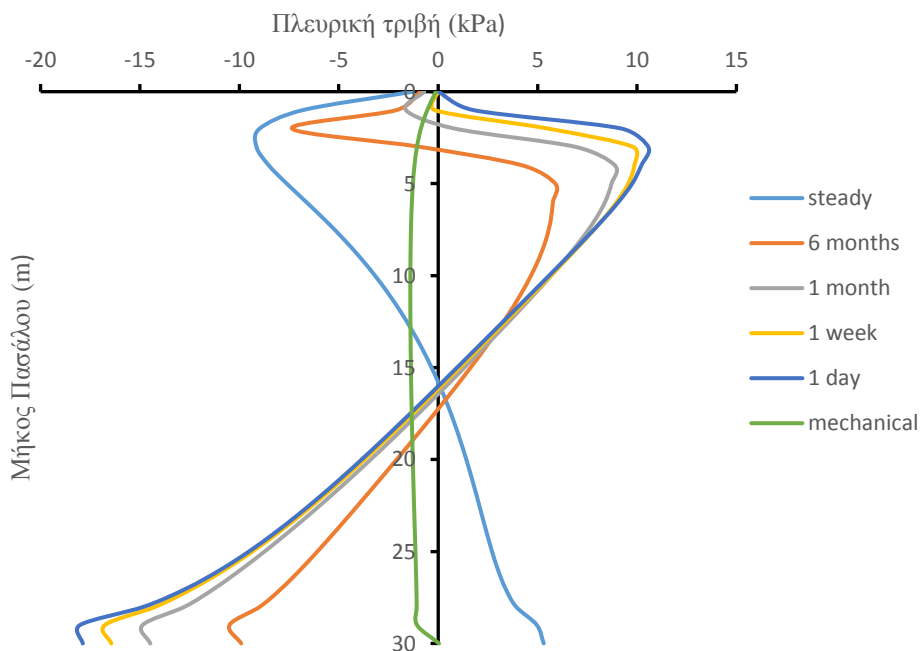
Σχήμα 6.4.6) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



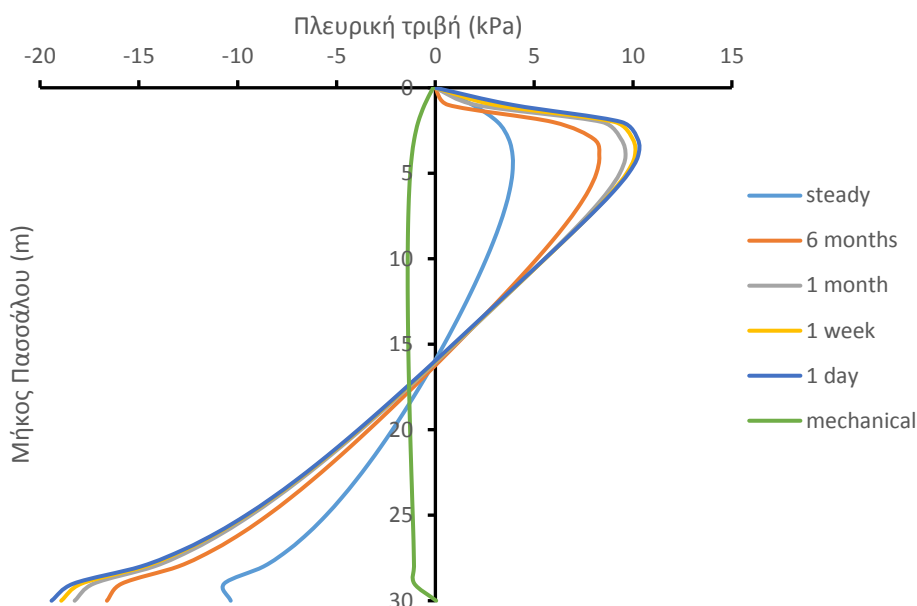
Σχήμα 6.4.7) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.8) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 1$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.9) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.10) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής χωρίς μηχανική φόρτιση, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 1$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.

Παράλληλα, για την επιβολή της θέρμανσης 0 °C – 30 °C χωρίς μηχανικής φόρτισης και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρείται βάσει του διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.4.6) ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας (T) εκτέλεσης του βήματος της θερμικής ανάλυσης μεγεθύνονται οι θετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που παρουσιάζει το έδαφος με την ολοένα μεγαλύτερη πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και ενισχύει την ανύψωση του. Οι κυριότερες διαφορές αναπτύσσονται για μόνιμο χρόνο (steady state) θερμικής μεταβολής, όπου για προκύπτουν μόνο θετικές μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου, επειδή για $\alpha_s/\alpha_p = 3$ διαστέλλεται περισσότερο το έδαφος με αποτέλεσμα ολόκληρος ο πάσσαλος να ανυψώνεται. Επιπλέον, για αύξηση του επιβαλλόμενου χρονικού διαστήματος θέρμανσης παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Αναλόγως, όπως προαναφέρθηκε, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p .

Μέσα από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.4.7) για την επιβολή της θέρμανσης 0 °C – 30 °C, με απουσία μηχανικής φόρτισης και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρείται, ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας T(s) εκτέλεσης του βήματος της θερμικής ανάλυσης μειώνονται οι θλιπτικές αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου. Ειδικότερα, στο μεγαλύτερο μήκος του πασσάλου για θέρμανση 6 μηνών και σε όλο το μήκος του για τα χρονικά διαστήματα των, 1 μήνα, 1 εβδομάδας, 1 ημέρας παρουσιάζονται μεγαλύτερες θλιπτικές αξονικές τάσεις από τις μηχανικές που εμφανίζονται λόγω του ίδιου βάρους γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται ο πάσσαλος σε σύγκριση με το έδαφος. Σε αυτήν την

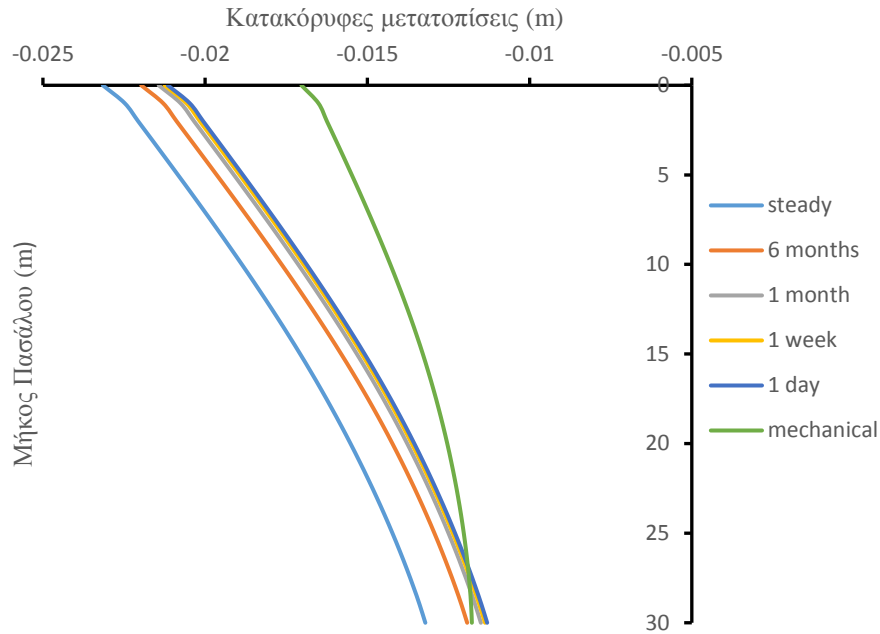
περίπτωση, η αύξηση της διάρκειας θέρμανσης του πασσάλου προκαλεί μεγέθυνση στη διαστολή που υφίσταται το έδαφος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ολοένα και μικρότερων επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο λόγω της θέρμανσης. Για μόνιμη χρονική διάρκεια το έδαφος εφελκύεται περισσότερο από τον πάσσαλο λόγω του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης με αποτέλεσμα να εμφανίζονται επιπρόσθετες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και με φορά προς τα κάτω στο κάτω μέρος του στη διεπιφάνεια λόγω της θέρμανσης γεγονός που προκαλεί την εμφάνιση εφελκυστικών αξονικών δυνάμεων στο άνω μέρος του πασσάλου ($z < 20\text{m}$) και μικρών θλιπτικών στο κάτω μέρος του ($z > 20\text{m}$). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση θέρμανσης για 6 μήνες στην κορυφή του πασσάλου για ($z < 5\text{m}$) προκύπτουν μικρότερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις από τις αντίστοιχες μηχανικές του ιδίου βάρους με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια παραπλήσια συμπεριφορά με αυτήν του μόνιμου χρονικού διαστήματος που αναπτύχθηκε παραπάνω.

Αντιθέτως, όπως διακρίνεται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.4.8) για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$ το έδαφος για οποιοδήποτε χρονική διάρκεια θα διαστέλλεται λιγότερο σε σύγκριση με τον πάσσαλο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα κάτω στο άνω μέρος του πασσάλου και με φορά προς τα κάτω στο κάτω μέρος του στη διεπιφάνεια εξαιτίας της θέρμανσης του πασσάλου οι οποίες προκαλούν τη μείωση των αξονικών δυνάμεων όσο αυξάνεται η χρονική διάρκεια επιβολής της θέρμανσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$ του εδάφους αλλά με μικρότερες διακυμάνσεις.

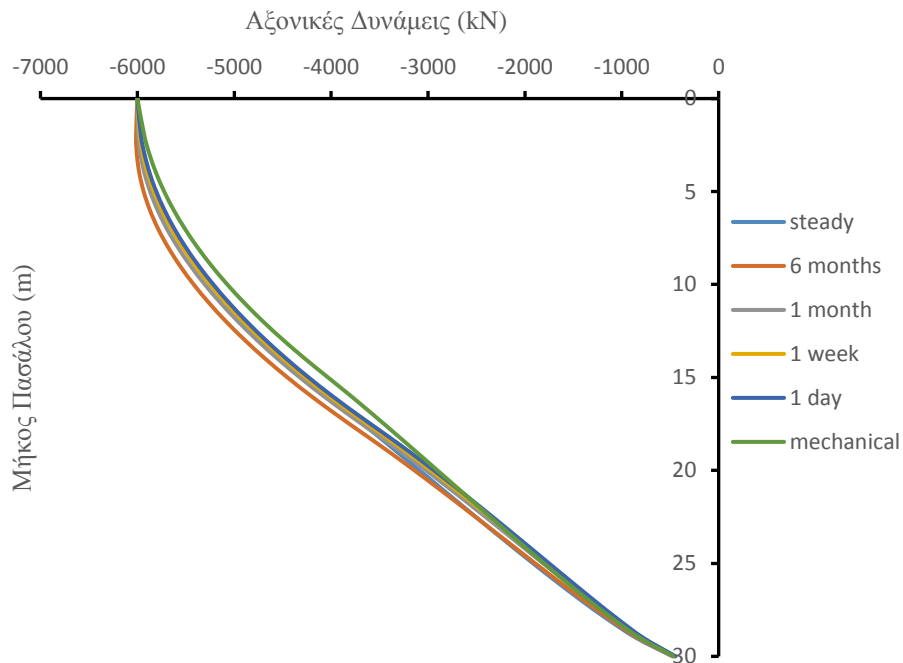
Μέσα από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.4.9) για την επιβολή της θέρμανσης $0^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ χωρίς μηχανική φόρτιση και λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρείται, ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας (T) κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του βήματος της θερμικής ανάλυσης παρουσιάζεται μία μείωση της θετικής πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου ενώ παράλληλα ελαττώνεται αντίστοιχα και η αρνητική πλευρικής τριβής στο κάτω μέρος του. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου για τη θέρμανση των 6 μηνών και σε ολόκληρο το μήκος για τα χρονικά διαστήματα του 1 μήνα, 1 εβδομάδας, 1 ημέρας και οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που εμφανίζει ο πάσσαλος από το έδαφος. Για μόνιμη χρονική διάρκεια θέρμανσης εμφανίζεται για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ μία αντίστροφη συμπεριφορά στην κατανομή της πλευρικής τριβής. Ειδικότερα, παρατηρείται η εμφάνιση θετικής πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου εξαιτίας της εμφάνισης πρόσθετων διατμητικών τάσεων με φορά προς τα πάνω και αρνητικής πλευρικής τριβής στο κάτω μέρος του λόγω της εμφάνισης πρόσθετων διατμητικών τάσεων με φορά προς τα κάτω εξαιτίας του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους που προκαλεί τη μεγαλύτερη διαστολή του σε σύγκριση με τον πάσσαλο. Επιπλέον, αξίζει να επισημανθεί ότι για ψύξη 6 μηνών η πλευρική τριβή στην κορυφή του πασσάλου παρουσιάζει παραπλήσια συμπεριφορά με την περίπτωση της μόνιμης ροής όπου τείνουν να γίνει μεγαλύτερη των αντίστοιχων μηχανικών για ($z < 5\text{m}$).

Αντιθέτως, για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$ (βλ. Σχήμα 6.4.10) το έδαφος θα διαστέλλεται λιγότερο από τον πάσσαλο για οποιαδήποτε χρονική διάρκεια με αποτέλεσμα να

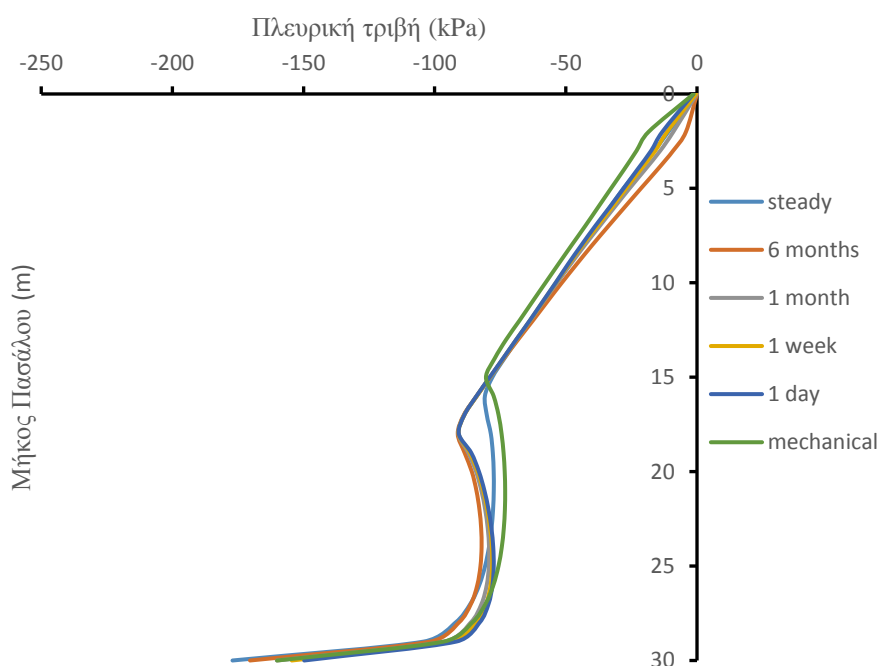
παρατηρείται ότι η αύξηση της χρονικής διάρκειας της θέρμανσης συντελεί στη μείωση της θετικής πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου και παρομοίως την ελάττωση της αρνητικής πλευρικής τριβής στο κάτω μέρος του. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$ του εδάφους αλλά με μικρότερες διακυμάνσεις.



Σχήμα 6.4.11) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων με επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.12) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων με επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγω θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.

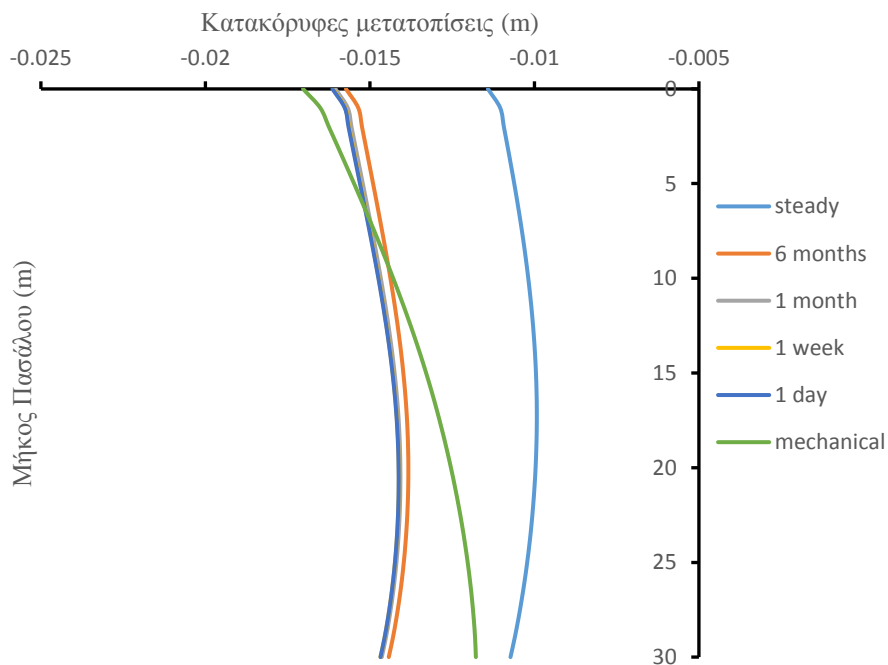


Σχήμα 6.4.13) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής με επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN, επιβολή ψύξης από τους 15 °C – 0 °C και λόγο θερμικής διόγκωσης $a_s/a_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.

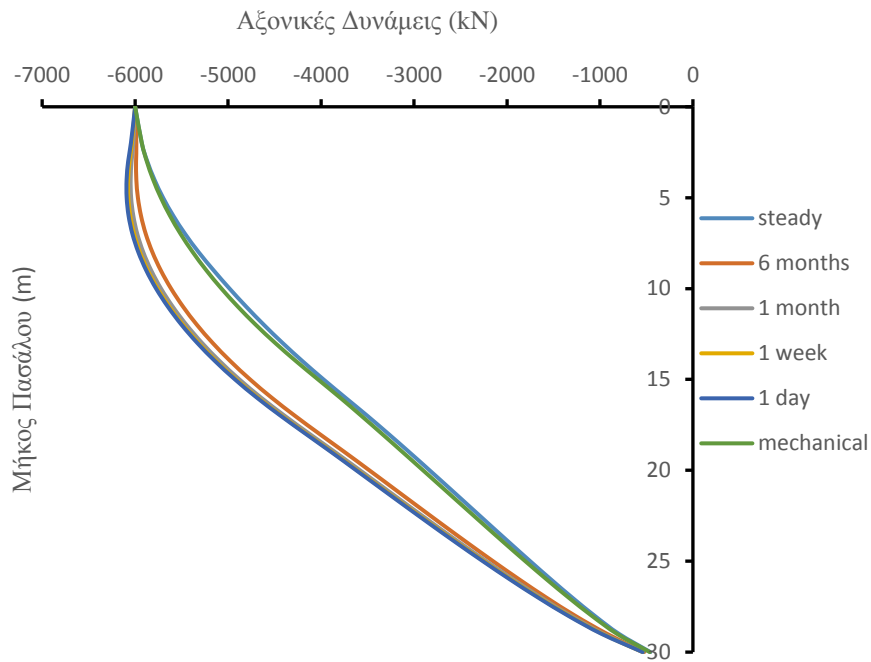
Μέσα από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.4.11) στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για λόγο $a_s/a_p = 3$, για την επιβολή της αρχικής ψύξης 15 °C – 0 °C παρατηρείται, ότι η αύξηση της χρονικής διάρκειας $T(s)$ εκτέλεσης του βήματος της θερμικής ανάλυσης συνεπάγεται στην αύξηση της καθίζησης κατά μήκος του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος εμφανίζει μεγαλύτερη συστολή με τη μεγαλύτερη πάροδο του χρόνου, με επακόλουθο να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να διευρύνει την καθίζηση του. Φαίνεται ότι για μόνιμο χρονικό διάστημα ψύξης παρουσιάζονται περίπου κατά 5,5 % μεγαλύτερες καθιζήσεις από ότι για διάστημα 6 μηνών. Επιπλέον, φαίνεται ότι παράγονται παρόμοιες καθιζήσεις κατά τη χρονική διάρκεια ψύξης της 1 εβδομάδας και της 1 ημέρας κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που συνεπάγεται ότι για οποιοδήποτε χρόνο μικρότερο της μίας εβδομάδας, οι αριθμητικές τιμές των καθιζήσεων θα είναι παρόμοιες κατά μήκος του πασσάλου. Σε αυτό το σημείο πρέπει είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της χρονικής διάρκειας του εδάφους. Επιπλέον, για αύξηση του επιβαλλόμενου χρονικού διαστήματος ψύξης παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Παρομοίως, όπως προαναφέρθηκε, για λόγο $a_s/a_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος a_s/a_p .

Για τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN με την επιβολή της αρχικής ψύξης $15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ παρατηρείται βάσει του διαγράμματος (Βλ. Σχήμα 6.4.12) στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ ότι η χρονική διάρκεια δε μεταβάλλει σημαντικά τις αριθμητικές τιμές των αξονικών δυνάμεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην προγενέστερη εμφάνιση της διατμητικής αντοχής σε κάποιο σημείο του πασσάλου εξαιτίας της μεγάλης μηχανικής φόρτισης που ασκείται στην κεφαλή, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται ανεπαίσθητα οι αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται κατά την ψύξη για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα επιβολής της. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται και για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$, για τον οποίο αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p .

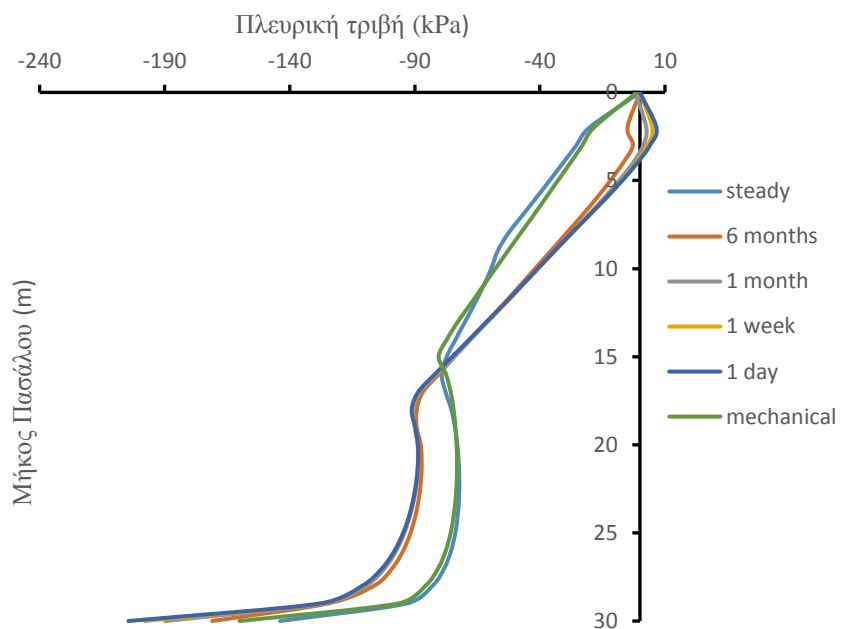
Με την επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN για αρχική ψύξη $15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ παρατηρείται βάσει του διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.4.13) στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ ότι οι αριθμητικές τιμές της πλευρικής τριβής δε μεταβάλλεται σημαντικά από τη χρονική διάρκεια στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου. Ωστόσο, για μόνιμη χρονική διάρκεια της ψύξης όπου το έδαφος λόγω του τριπλάσιου συντελεστή θερμικής διόγκωσης θα συστέλλεται περισσότερο από τον πάσσαλο η διατμητική αστοχία παρουσιάζεται σε μικρότερο μήκος πάνω στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται και για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$, για τον οποίο αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p .



Σχήμα 6.4.14) Αποτελέσματα κατακόρυφων μετατοπίσεων με επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN, επιβολή θέρμανσης από τους $0^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ και λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.15) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων με επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.4.16) Αποτελέσματα πλευρικής τριβής με επιβολή μηχανικής φόρτισης 6000 kN, επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C και λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για τους διαφορετικούς χρόνους του βήματος θερμικής ανάλυσης.

Παράλληλα, για την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ με την επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN και για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρείται μείωση της καθίζησης (βλ. Σχήμα 6.4.14) κατά μήκος του πασσάλου με την αύξηση της χρονικής διάρκειας (T) εκτέλεσης του βήματος της θερμικής ανάλυσης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος με την ολοένα μεγαλύτερη πάροδο του χρόνου, παρουσιάζει προοδευτικά μεγαλύτερη διαστολή, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο ανυψώνοντας τον και να μειώνει την καθίζηση του. Οι κυριότερες διαφορές απαντώνται για μόνιμη ροή (steady state) θέρμανσης, κατά την οποία οι καθιζήσεις είναι εμφανώς μικρότερες για τη φόρτιση των 6000 kN (περίπου κατά 30 %). Η διαφορά αυτή εμφανίζεται επειδή το έδαφος για μόνιμη ροή διαστέλλεται περισσότερο από τον πάσσαλο, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον εφελκόμενο πάσσαλο ανυψώνοντας τον και να ελαττώνει τις καθιζήσεις του. Αξίζει ακόμα να επισημανθεί ότι κατά τις χρονικές διάρκειες του 1 μήνα, της 1 εβδομάδας και της 1 ημέρας παράγονται παρόμοιες καθιζήσεις κατά μήκος του πασσάλου και για τις δύο θερμικές φορτίσεις, γεγονός που συνεπάγεται ότι οι αριθμητικές τιμές των καθιζήσεων θα είναι παρόμοιες κατά μήκος του πασσάλου, για οποιοδήποτε χρόνο μικρότερο του ενός μήνα στο βήμα της θερμικής ανάλυσης. Η μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου δεν επηρεάζεται από την αλλαγή αυτή της χρονικής διάρκειας του εδάφους. Αντίστοιχα, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, όπως προαναφέρθηκε, με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p .

Παράλληλα, για την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ με την παρουσία μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρείται βάση του παραπάνω διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.4.15) μια παρόμοια συμπεριφορά στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων για τις μη-μόνιμες διάρκειες των 6 μηνών, 1 μήνα, 1 εβδομάδας, 1 ημέρας, γεγονός που προκύπτει από την ταύτιση των διαγραμμάτων της πλευρικής τριβής. Αντ' αυτού στην περίπτωση μόνιμης διάρκειας θερμικής φόρτισης εμφανίζονται αρκετά μικρότερες αξονικές δυνάμεις (περίπου 16,5 % στο κέντρο του πασσάλου) κατά μήκος του πασσάλου, οι οποίες είναι σχεδόν παραπλήσιες με τις αξονικές δυνάμεις της μηχανικής φόρτισης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται το έδαφος από τον πάσσαλο για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$, με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπρόσθετων εφελκυστικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο και την ελάττωση της αξονικής δύναμης, γεγονός που υποδηλώνεται και από το διάγραμμα της πλευρικής τριβής. Όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p αναμένεται να διατηρηθεί η συμπεριφορά που εμφανίστηκε παραπάνω με την ταυτόχρονη ελάττωση της διαφοράς στη διακύμανση μεταξύ μόνιμης και μη μόνιμης χρονικής διάρκειας.

Τέλος, με την επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN για τη θέρμανση $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ και για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρείται βάσει του διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.4.16) ότι οι αριθμητικές τιμές της πλευρικής τριβής δε μεταβάλλονται σημαντικά για μη-μόνιμες χρονικές διάρκειες θερμικής ροής, ενώ για μόνιμη χρονική διάρκεια παρουσιάζουν παραπλήσια συμπεριφορά με τη μηχανική πλευρική τριβή. Ειδικότερα, στο πάνω μέρος του πασσάλου εμφανίζονται μεγαλύτερες αριθμητικές τιμές στην πλευρική τριβή εξαιτίας των επιπρόσθετων εφελκυστικών τάσεων, ενώ στο κάτω μέρος του πασσάλου είναι μικρότερες. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται και για λόγο

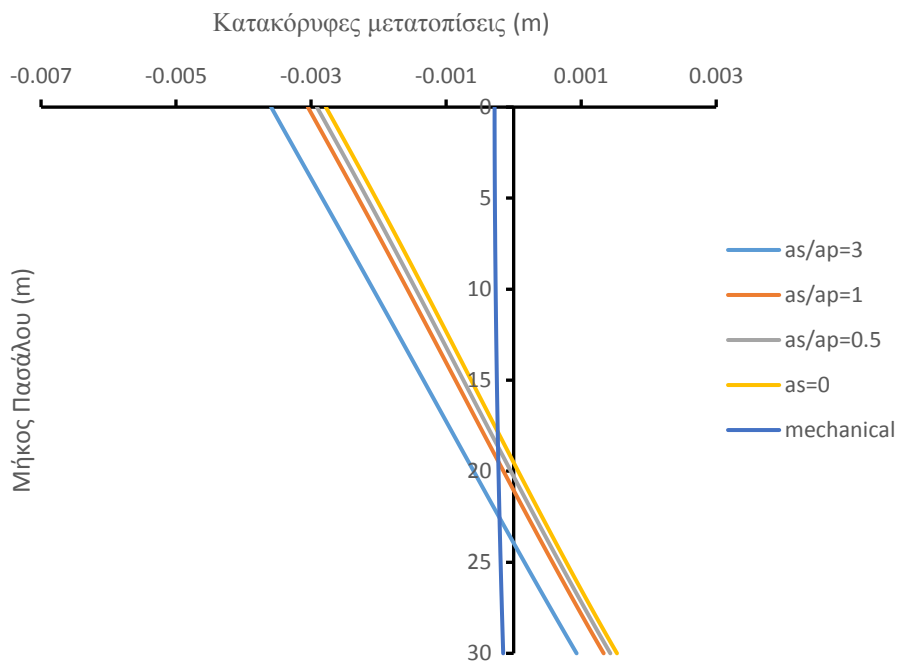
$\alpha_s/\alpha_p < 3$, για τον οποίο αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p .

6.5) Επιρροή των θερμικών παραμέτρων του εδάφους

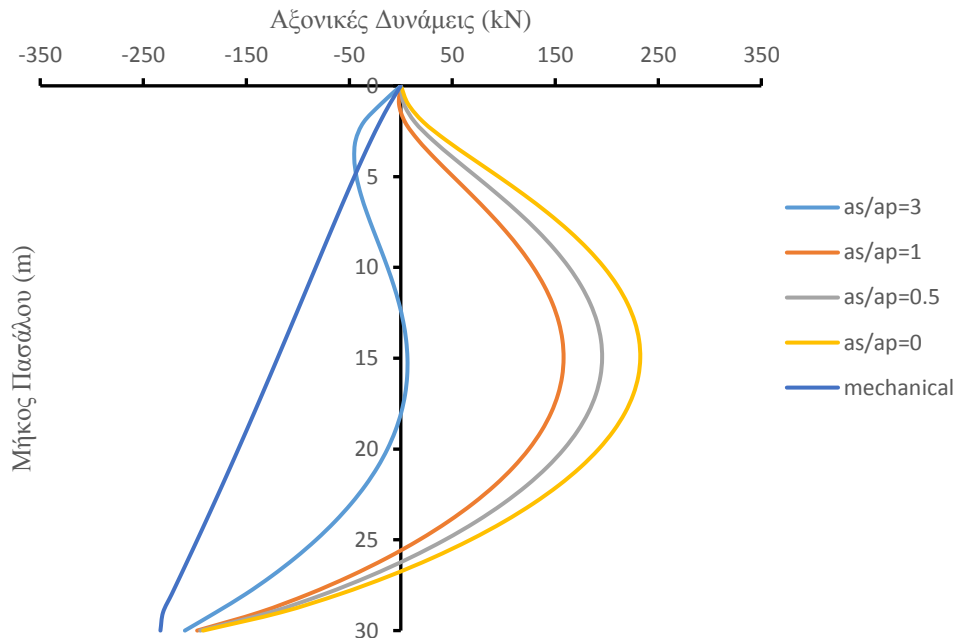
Διεξάχθηκαν αναλύσεις για απουσία μηχανικής φόρτισης και με επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN με τις οποίες μελετήθηκε η επιρροή της μεταβολής των θερμικών χαρακτηριστικών του εδάφους στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή θερμικών φορτίσεων. Οι τρεις θερμικές μεταβλητές του εδάφους που εξετάστηκαν είναι ο συντελεστής θερμικής διόγκωσης α (m/m/K), ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) και ο συντελεστής ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τα τρία βήματα του κύκλου θερμικής φόρτισης του Κεφαλαίου Α. δηλαδή, για αρχική ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C, μετέπειτα θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C και τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C. Το χρονικό διάστημα προσομοίωσης της θερμικής φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε είναι των 6 μηνών και της μόνιμης ροής για το συντελεστή θερμικής διόγκωσης α (m/m/K), ενώ για τους συντελεστές λ (W/m/K) και c_p (J/kg/K) τα διαγράμματα που παρατίθενται είναι για το διάστημα των έξι μηνών.

6.5.1) Επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης α (m/m/K)

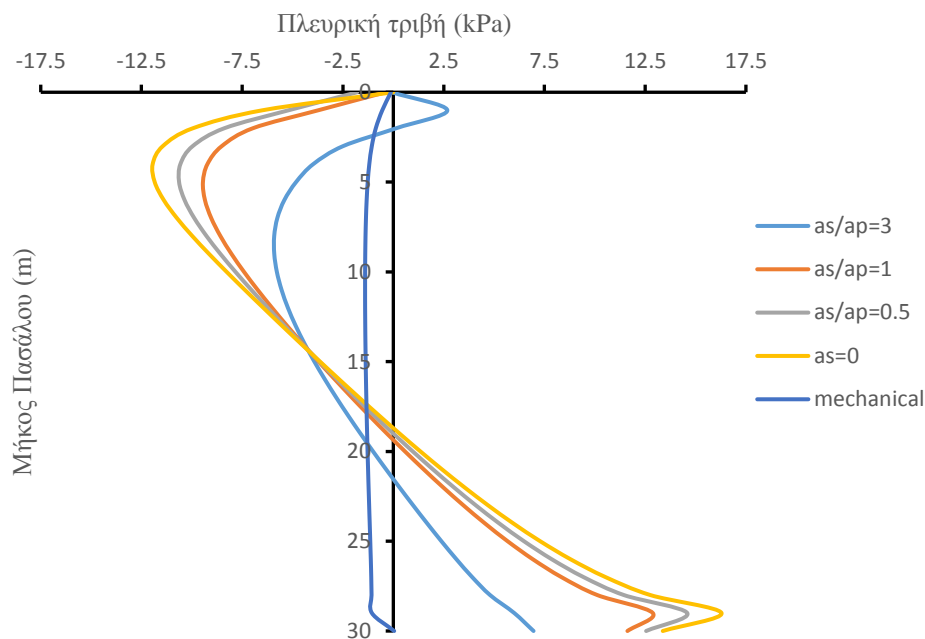
Ο συντελεστής θερμικής διόγκωσης (α) καθορίζει την ικανότητα που έχει το έδαφος και ο πάσσαλος να συστέλλονται ή να διαστέλλονται με την ψύξη και τη θέρμανση του πασσάλου αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αριθμητική τιμή των κατακόρυφων διατμητικών τάσεων, των αξονικών τάσεων και της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου. Επειδή, εξετάζεται η επιρροή λόγω της μεταβολής του συντελεστή (α) του εδάφους πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της συστολής ή της διαστολής που υφίσταται το έδαφος συμπαρασύρει ανάλογα τον πάσσαλο και επίσης καθορίζει τη συμπεριφορά της πλευρικής τριβής στη διεπιφάνεια. Τα διαγράμματα θα παρουσιαστούν για τον κύκλο θερμικής φόρτισης που προαναφέρθηκε και θα παρουσιάζουν την επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0$, $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$, $\alpha_s/\alpha_p = 1$, $\alpha_s/\alpha_p = 3$ στα εξεταζόμενα μεγέθη του πασσάλου για θερμική φόρτιση 6 μηνών και μόνιμης ροής, με συντελεστή αγωγιμότητας $\lambda = 2.5$ (W/m/K) και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200$ (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και παρουσία 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 6.5.1.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 6 μηνών.



Σχήμα 6.5.1.2) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 6 μηνών.



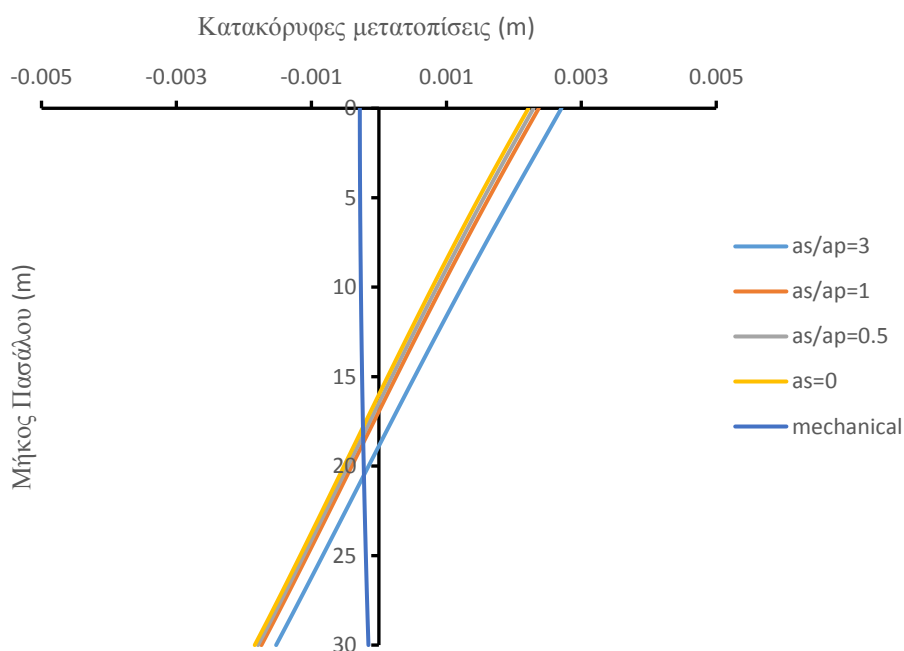
Σχήμα 6.5.1.3) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 6 μηνών.

Όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.1), κατά την επιβολή της ψύξης 15 °C -0 °C παρατηρείται μια αύξηση των αρνητικών κατακόρυφων μετατοπίσεων στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου και μείωση των θετικών μετατοπίσεων στο κάτω μέρος του με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $a_s/a_p = 3$ συναντώνται οι μεγαλύτερες καθιζήσεις στον πασσάλο, ενώ για λόγο $a_s/a_p = 0$ οι μικρότερες καθιζήσεις. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται λόγω της ιδιότητας του εδάφους να συστέλλεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου a_s/a_p στην ψύξη, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η συστολή που υφίσταται ο πασσάλος και να αυξάνονται οι καθιζήσεις. Η αλλαγή βέβαια αυτή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, για αύξηση του λόγου a_s/a_p παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point), δηλαδή του σημείου στο οποίο είναι ίσες η μηχανική καθιζήση με αυτήν που προκαλείται από την ψύξη, προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Σύμφωνα με τους (Rotta Loria et al, 2015) η θέση του ουδέτερου σημείου εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης και της θερμικής φόρτισης που δέχεται ο πασσάλος.

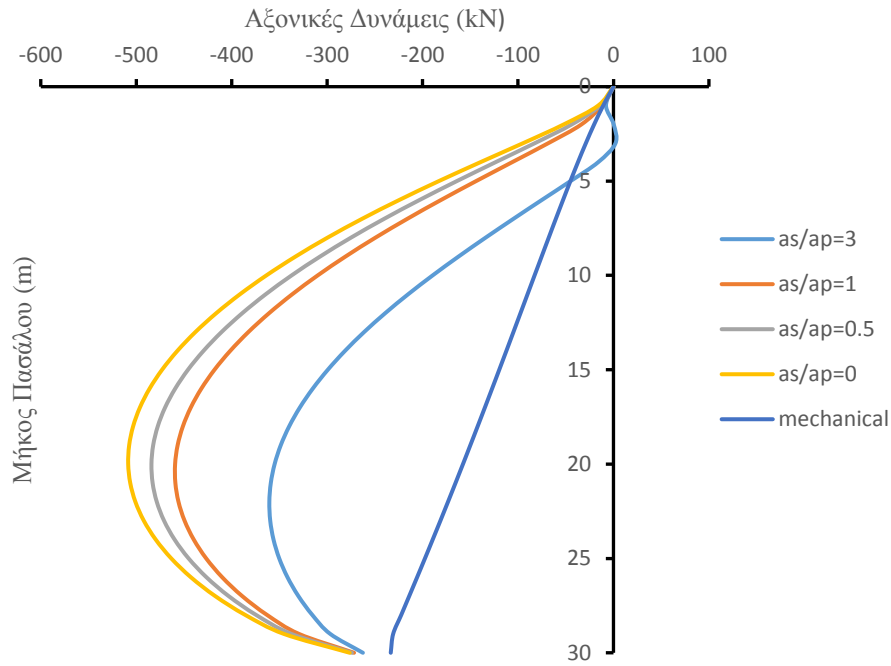
Επιπλέον, όσον αφορά τις τιμές των αξονικών δυνάμεων όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.2), κατά την επιβολή της ψύξης 15 °C - 0 °C παρατηρείται μια αύξηση των θλιπτικών (αρνητικών αξονικών τάσεων) και κατ' επέκταση των αξονικών δυνάμεων σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος με συνέπεια την ελάττωση των

εφελκυστικών τάσεων στη διεπιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, με απουσία μηχανικής φόρτισης για λόγο $a_s/a_p = 3$ παράγονται αρνητικές αξονικές δυνάμεις μικρότερες όμως σε σύγκριση με αυτές του ίδιου βάρους στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου ($z > 5\text{m}$), επειδή για το χρονικό διάστημα των 6 μηνών το έδαφος εξακολουθεί να συστέλλεται σε αυτό το διάστημα λιγότερο από τον πάσσαλο. Επιπλέον, για λόγο $a_s/a_p \leq 1$ παρουσιάζονται θετικές αξονικές δυνάμεις το έδαφος συστέλλεται λιγότερο από τον πάσσαλο στη χρονική διάρκεια των 6 μηνών εξαιτίας του παρόμοιου ή μικρότερου συντελεστή θερμικής διόγκωσης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και αντίστροφα στο κάτω μέρος του λόγω της αλληλεπίδρασης στη διεπιφάνεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος a_s/a_p τόσο θετικά μεγαλύτερες είναι αξονικές δυνάμεις με μέγιστες για συντελεστή διόγκωσης του εδάφους $a_s = 0$.

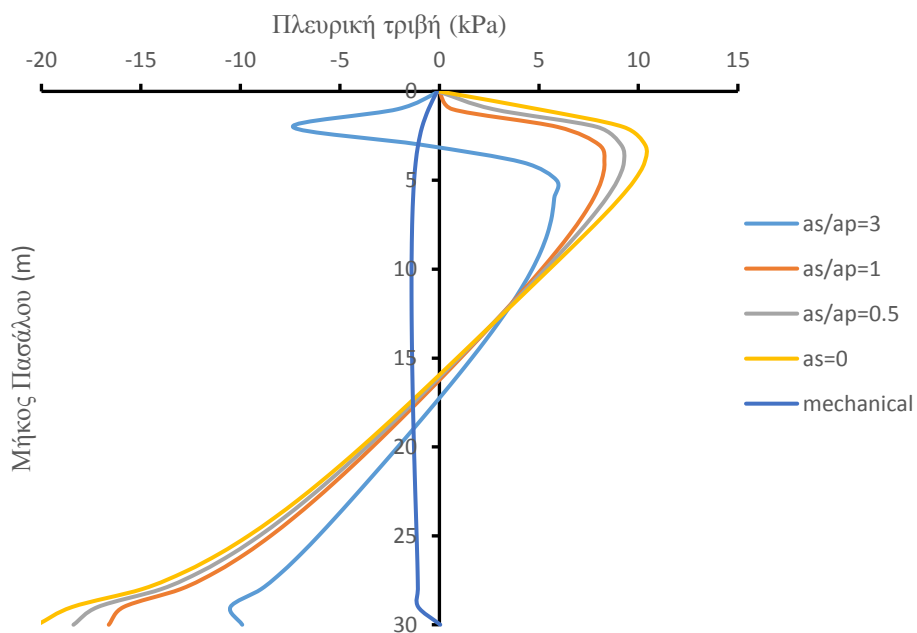
Τέλος, όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το Σχήμα 6.5.1.3, κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται μια μείωση της αρνητικής πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα ελάττωση της θετικής πλευρικής τριβής στο κάτω μέρος του με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $a_s/a_p = 3$ συναντώνται οι μικρότερες αριθμητικές τιμές της πλευρικής τριβής (αρνητικές ή θετικές) στον πάσσαλο ενώ στην περίπτωση που το έδαφος προσομοιωθεί ως θερμικά αδρανές δηλαδή για $a_s = 0$ εμφανίζονται οι μεγαλύτερες αριθμητικές τιμές.



Σχήμα 6.5.1.4) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p , χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή θέρμανσης από τους $0\text{ }^\circ\text{C}$ στους $30\text{ }^\circ\text{C}$ για διάρκεια 6 μηνών.



Σχήμα 6.5.1.5) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p , χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C για διάρκεια 6 μηνών.

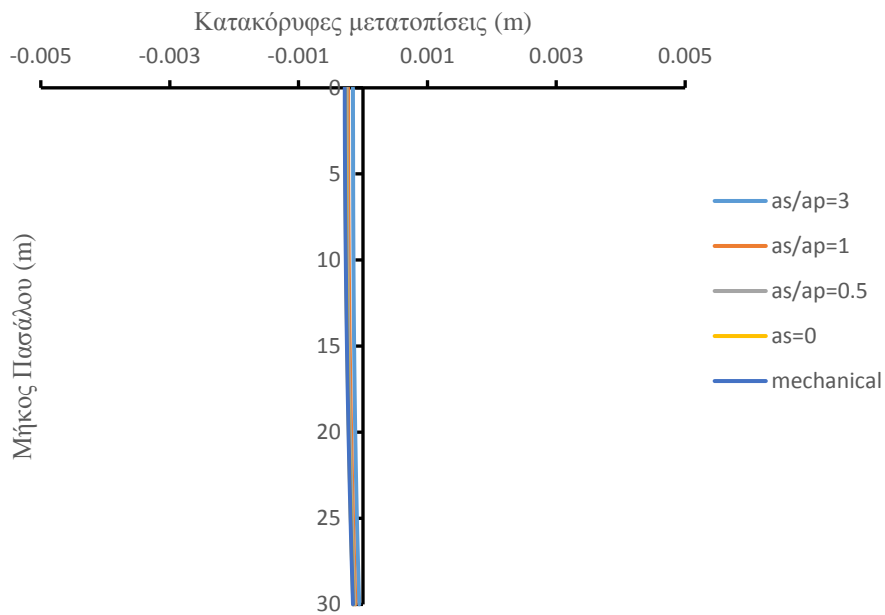


Σχήμα 6.5.1.6) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p , χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C για διάρκεια 6 μηνών.

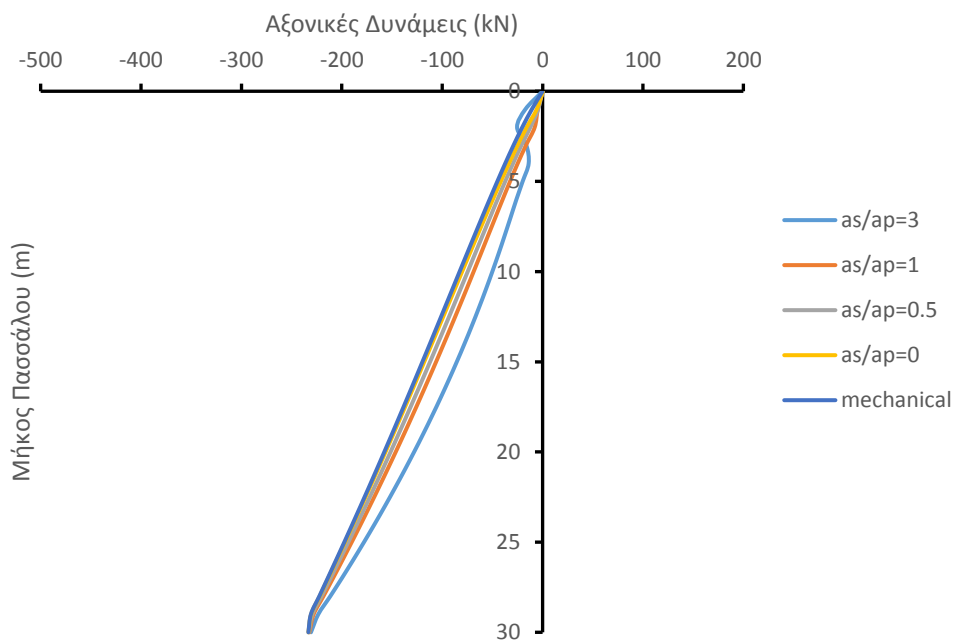
Αναφορικά με τις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων (Σχήμα 6.5.1.4) κατά την επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης όσο αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής διόγκωσης (α) του εδάφους τόσο αυξάνονται οι θετικές μετατοπίσεις στο άνω τμήμα του πασσάλου και μειώνονται οι καθιζήσεις στην αιχμή του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην ιδιότητα του εδάφους να εφελκύεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου α_s/α_p στη θέρμανση, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο, δηλαδή να τον ανυψώνει και να αυξάνονται οι θετικές μετατοπίσεις. Επιπλέον, για αύξηση του λόγου α_s/α_p παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point), δηλαδή του σημείου στο οποίο είναι ίσες η μηχανική καθίζηση με αυτήν που προκαλείται από τη θέρμανση, προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Σύμφωνα με τους Rotta Loria et al. (2015) η θέση του ουδέτερου σημείου εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης και της θερμικής φόρτισης που δέχεται ο πάσσαλος.

Επιπλέον, κατά την επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C αντίστοιχα στις τιμές των αξονικών δυνάμεων (βλ. Σχήμα 6.5.1.5) παρατηρείται η μείωση τους σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται το έδαφος, με επακόλουθη συνέπεια τη δημιουργία λιγότερων επιπρόσθετων τάσεων με φορά προς τα κάτω στο άνω μέρος του πασσάλου και αντίστροφα στο κάτω μέρος του στη διεπιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, χωρίς μηχανική φόρτιση για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παράγονται οι μικρότερες αρνητικές αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου, επειδή το έδαφος διαστέλλεται σε μεγαλύτερο μέγεθος από ότι για τους υπόλοιπους λόγους α_s/α_p στη χρονική διάρκεια των 6 μηνών λόγω της αύξησης του συντελεστή θερμικής διόγκωσης. Αντιθέτως, όσο μειώνεται ο λόγος $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ τόσο λιγότερο διαστέλλεται το έδαφος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι αξονικές δυνάμεις επειδή για το χρονικό διάστημα των 6 μηνών.

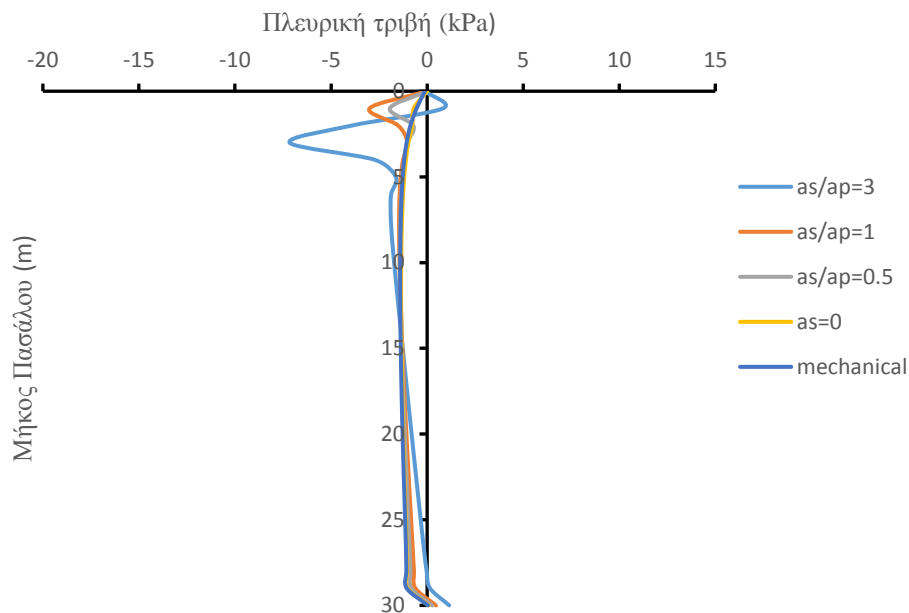
Τέλος, σχετικά με τα αποτελέσματα της πλευρικής τριβής (βλ. Σχήμα 6.5.1.6) κατά το βήμα της επιβολής της θέρμανσης 0 °C - 30 °C παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης προκαλείται μια μείωση των θετικών αριθμητικών τιμών της πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα ελάττωση των αρνητικών τιμών της στο κάτω μέρος του με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ απαντώνται οι μικρότερες τιμές της πλευρικής τριβής στον πάσσαλο. Αντιθέτως, στην περίπτωση που το έδαφος προσομοιωθεί ως θερμικά αδρανές δηλαδή για $\alpha_s = 0$ εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές της πλευρικής τριβής (θετικές ή αρνητικές).



Σχήμα 6.5.1.7) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C για διάρκεια 6 μηνών.



Σχήμα 6.5.1.8) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C για διάρκεια 6 μηνών.

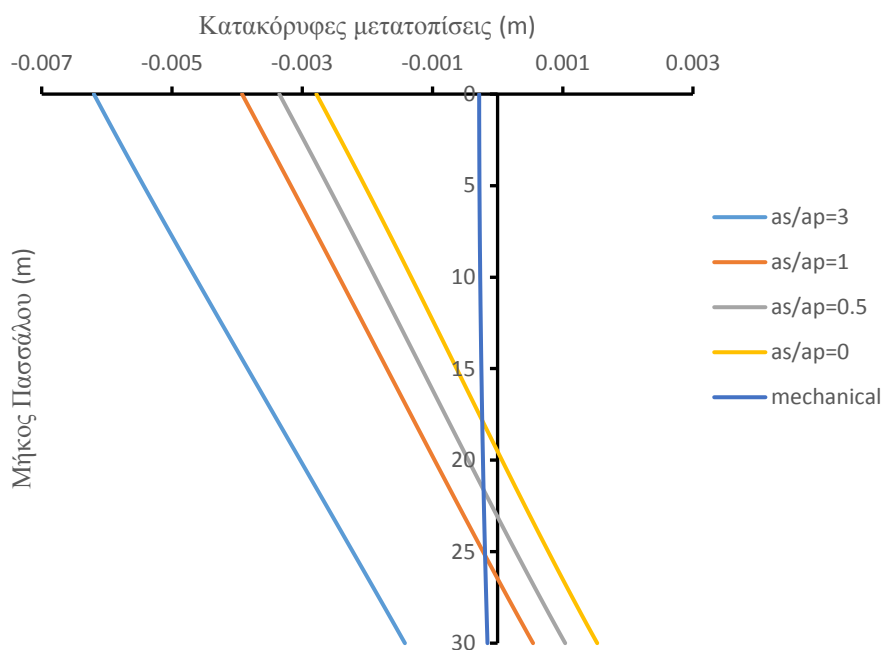


Σχήμα 6.5.1.9) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς μηχανική φόρτιση για επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C για διάρκεια 6 μηνών.

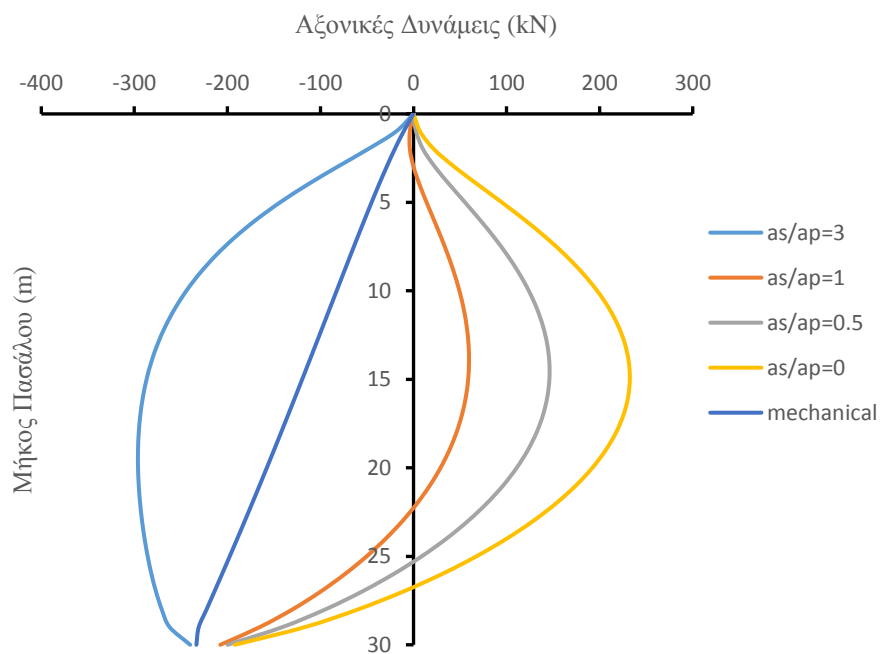
Βάσει του Σχήματος 6.5.1.7, κατά την επιβολή της τελικής ψύξης 30°C - 15 °C παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, ο λόγος a_s/a_p δε δημιουργεί σημαντική επίδραση στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πρακτικά πολύ μικρή τιμή των καθιζήσεων, με αποτέλεσμα οι διαφορές να κρίνονται αμελητέες.

Επιπλέον, παρατηρώντας κανείς το Σχήμα 6.5.1.8 κατά την επιβολή της τελικής ψύξης 30°C - 15 °C του θερμικού κύκλου παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης με την αύξηση του λόγου a_s/a_p παρουσιάζεται μια ανεπαίσθητη μείωση της αξονικής δύναμης για ($z > 3m$). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην αύξηση των εφελκυστικών αξονικών τάσεων (με φορά προς τα πάνω στην πάνω μέρος του πασσάλου) γεγονός που φαίνεται και στο Σχήμα 6.5.1.9 και αναπτύσσεται κυρίως για $a_s/a_p = 3$. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για λόγους $a_s/a_p \leq 1$, οι μηχανικές δυνάμεις που προκύπτουν είναι παραπλήσιες με τις μηχανικές.

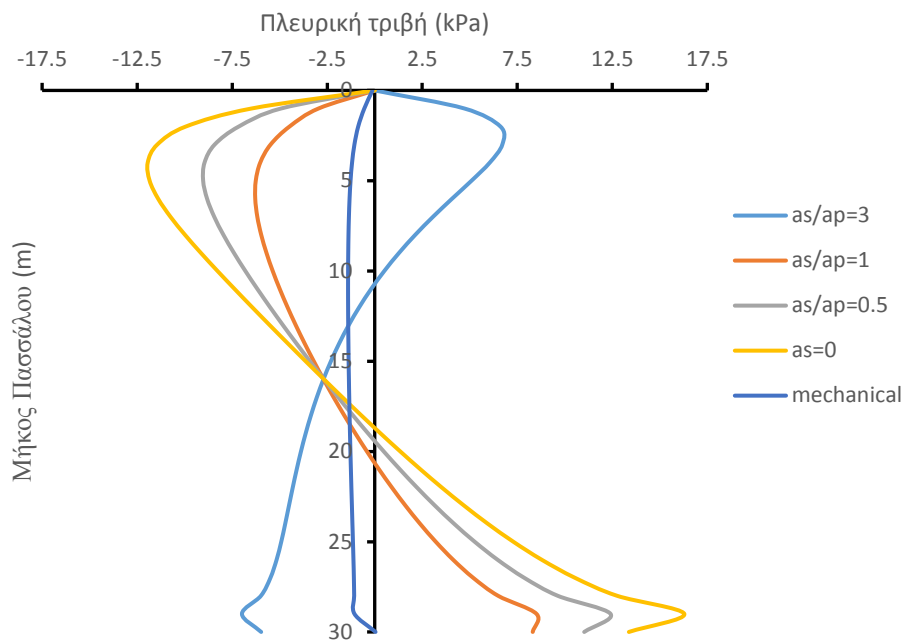
Τέλος, όπως συμπεραίνεται μέσα από το Σχήμα 6.5.1.9, κατά την επιβολή της τελικής ψύξης 30°C - 15 °C παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, όταν ο λόγος a_s/a_p ισούται με 3 τότε στην κορυφή του πασσάλου για ($z < 5m$) μεγεθύνονται οι αρνητικές τιμές της πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου, ενώ στο υπόλοιπο μήκος του μεταβάλλονται ανεπαίσθητα.



Σχήμα 6.5.1.10) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με απουσία μηχανικής φόρτισης για επιβολή ψύξης από τους $15\text{ }^\circ\text{C}$ στους $0\text{ }^\circ\text{C}$ για μόνιμη ροή (steady state).



Σχήμα 6.5.1.11) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με απουσία μηχανικής φόρτισης για επιβολή ψύξης από τους $15\text{ }^\circ\text{C}$ στους $0\text{ }^\circ\text{C}$ για μόνιμη ροή (steady state).



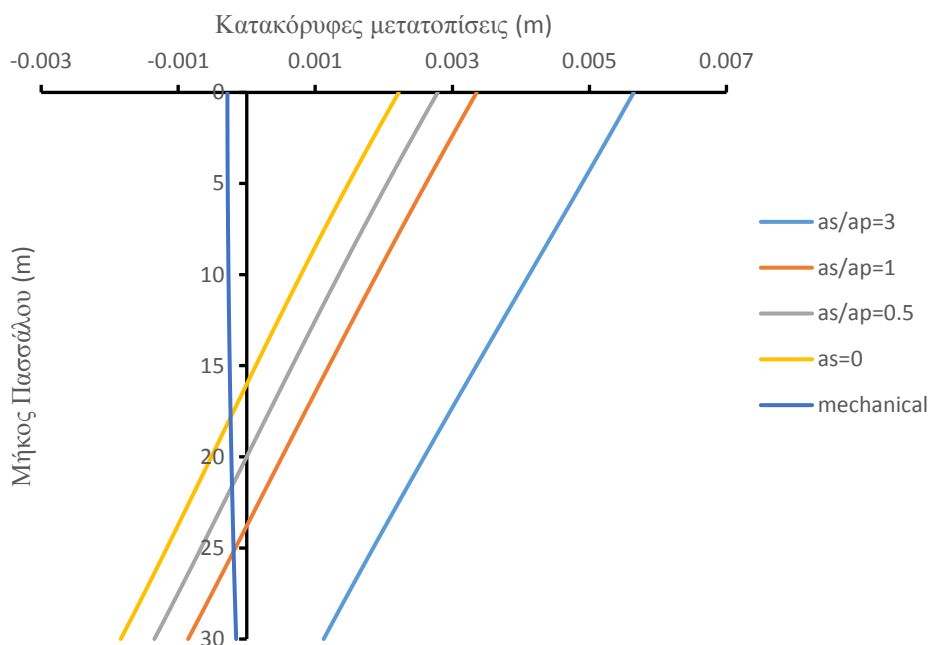
Σχήμα 6.5.1.12) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με απουσία μηχανικής φόρτισης για επιβολή ψύξης από τους $15\text{ }^\circ\text{C}$ στους $0\text{ }^\circ\text{C}$ για μόνιμη ροή (steady state).

Μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.10), παρουσιάζεται κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ μία αύξηση των καθιζήσεων σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $a_s/a_p = 3$ συναντώνται οι μεγαλύτερες καθιζήσεις στον πάσσαλο, ενώ για λόγο $a_s/a_p = 0$ εμφανίζονται οι μικρότερες καθιζήσεις, οι οποίες μάλιστα μετατρέπονται σε θετικές μετατοπίσεις στην αιχμή. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται λόγω της ιδιότητας του εδάφους να θλίβεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου a_s/a_p στην ψύξη, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να αυξάνονται οι καθιζήσεις. Επιπλέον, για αύξηση του λόγου a_s/a_p παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου κατά τη μόνιμη ψύξη. Η αλλαγή βέβαια αυτή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου.

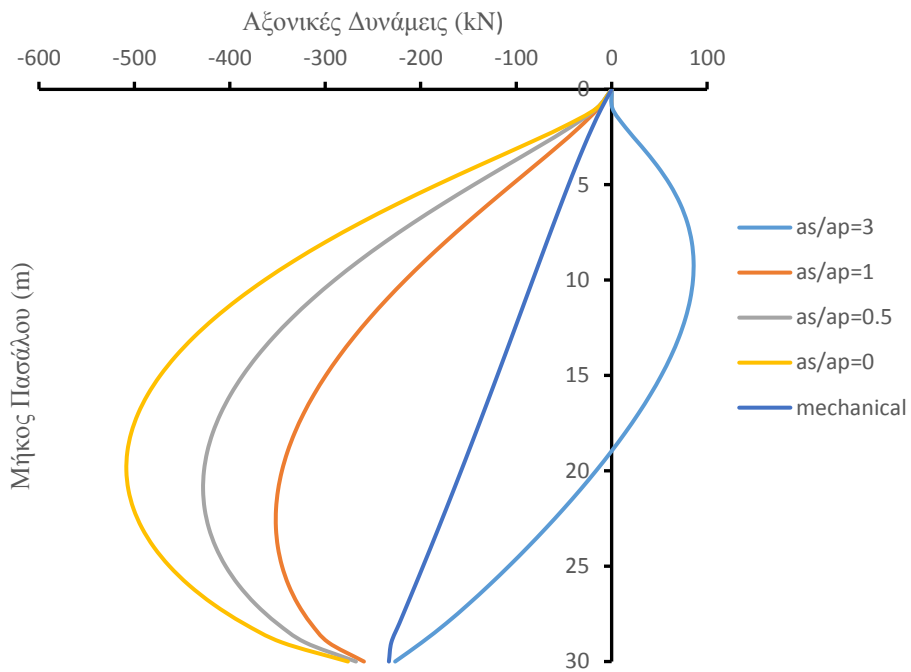
Όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το Διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.11) κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ με απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται ότι για λόγο $a_s/a_p = 3$ δημιουργούνται αρνητικές αξονικές δυνάμεις μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται λόγω του ίδιου βάρους κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος σε σχέση με τον πάσσαλο για μόνιμη χρονική διάρκεια, το οποίο επιφέρει τη δημιουργία επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο. Αντιθέτως, για λόγο $a_s/a_p \leq 1$ παρουσιάζονται κυρίως θετικές αξονικές δυνάμεις στο μεγαλύτερο μέρος του

πασσάλου, επειδή το έδαφος συστέλλεται λιγότερο από τον πάσσαλο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση επιπρόσθετων εφελκυστικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος a_s/a_p τόσο θετικά μεγαλύτερες είναι οι αξονικές δυνάμεις με τις μέγιστες να απαντώνται για συντελεστή διόγκωσης του εδάφους $a_s = 0$.

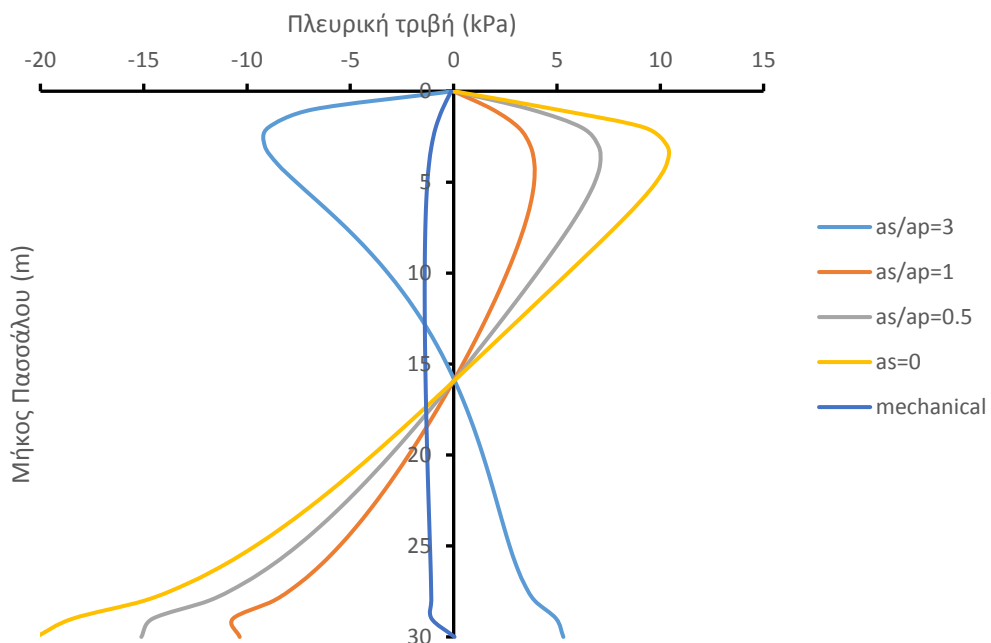
Τέλος, όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το Σχήμα 6.5.1.12, κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται για λόγο $a_s/a_p = 3$ η δημιουργία θετικής πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και αρνητικής στο κάτω μέρος του λόγω της μεγαλύτερης συστολής που υφίσταται το έδαφος σε σύγκριση με τον πάσσαλο για μόνιμο χρονικό διάστημα θερμικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται πρόσθετες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και αντίστροφες στο κάτω. Αντιθέτως, για λόγο $a_s/a_p \leq 1$ παρουσιάζεται μία μείωση της αρνητικής πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα ελάττωση της θετικής στο κάτω μέρος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμόδου εδάφους, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος, η οποία παρόλα αυτά παραμένει μικρότερη από τη συστολή του πασσάλου.



Σχήμα 6.5.1.13) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$ για μόνιμη θερμική ροή (steady state).



Σχήμα 6.5.1.14) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$ για μόνιμη θερμική ροή (steady state).

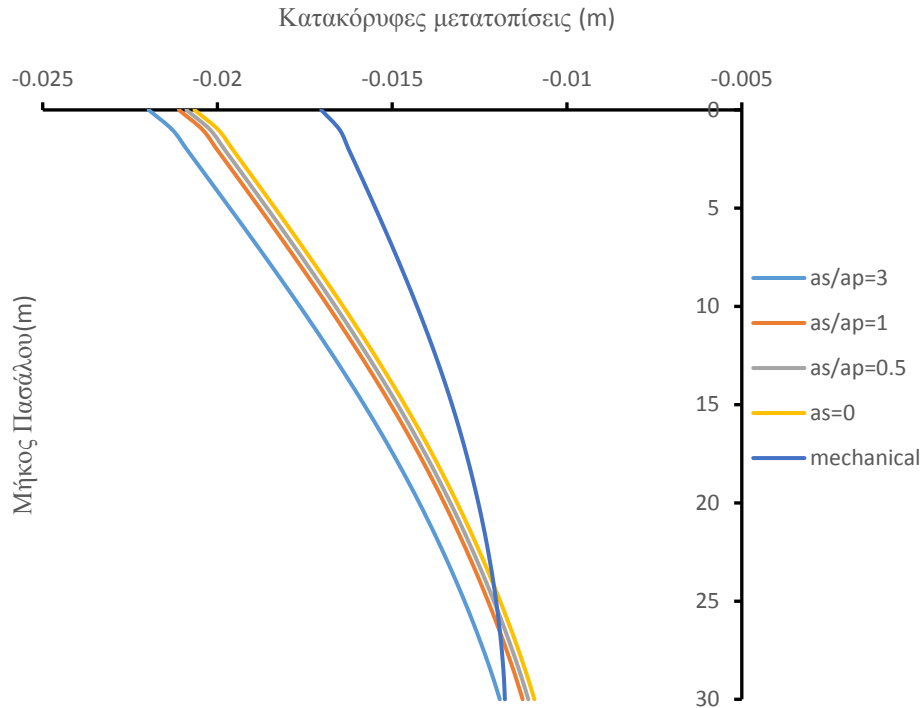


Σχήμα 6.5.1.15) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$ για μόνιμη θερμική ροή (steady state).

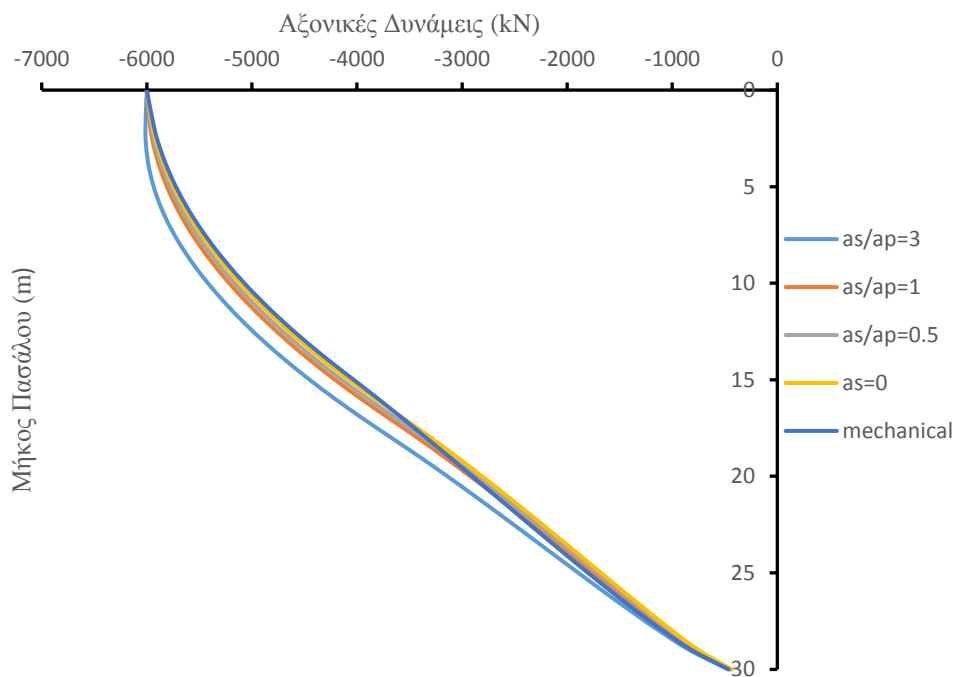
Βάσει του Σχήματος 6.5.1.13, παρουσιάζεται κατά την επιβολή της θέρμανσης 0 °C -30 °C μία αύξηση των θετικών μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ συναντώνται οι μεγαλύτερες θετικές μετατοπίσεις στον πάσσαλο, ενώ για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0$ οι μικρότερες θετικές μετατοπίσεις οι οποίες μάλιστα στην αιχμή γίνονται αρνητικές. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται λόγω της ιδιότητας του εδάφους να διαστέλλεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου α_s/α_p στη θέρμανση, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να συμβάλει στην ανύψωσή του. Η αλλαγή βέβαια αυτή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Επίσης, αξίζει να προστεθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε στην έρευνα του Rui Assunção (2014) για τη μεταβολή του λόγου α_s/α_p για ανάλυση σε μεμονωμένο πάσσαλο που πραγματοποιήθηκε για μόνιμη ροή θέρμανσης. Τέλος, για αύξηση του λόγου α_s/α_p παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου στη μόνιμη θέρμανση του πασσάλου.

Παρατηρώντας κανείς το Σχήμα 6.5.1.14 κατά την επιβολή της θέρμανσης 0 °C -30 °C με απουσία μηχανικής φόρτισης για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παράγονται θετικές αξονικές δυνάμεις στο πάνω μέρος του πασσάλου ($z < 19\text{m}$) και αρνητικές στο κάτω μέρος του ($z > 19\text{m}$) επειδή το έδαφος διαστέλλεται σε μεγαλύτερο μέγεθος από τον πάσσαλο στη μόνιμη ροή θέρμανσης λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή θερμικής διόγκωσης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες εφελκυστικές αξονικές τάσεις λόγω της αλληλεπίδρασης στη διεπιφάνεια, οι οποίες ελαττώνουν τις αρνητικές αξονικές δυνάμεις που δημιουργούνται από το ίδιο βάρος. Αντιθέτως, όσο μειώνεται ο λόγος $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ τόσο περισσότερο αυξάνονται οι αρνητικές αξονικές δυνάμεις εξαιτίας της μικρότερης διαστολής που υφίσταται το έδαφος, η οποία γενικότερα παραμένει μικρότερη από αυτήν του πασσάλου. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι παραπλήσια κατανομή παρατηρήθηκε στην έρευνα του Rui Assunção (2014) για τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης υπό την επιβολή θέρμανσης του πασσάλου για μόνιμο χρονικό διάστημα.

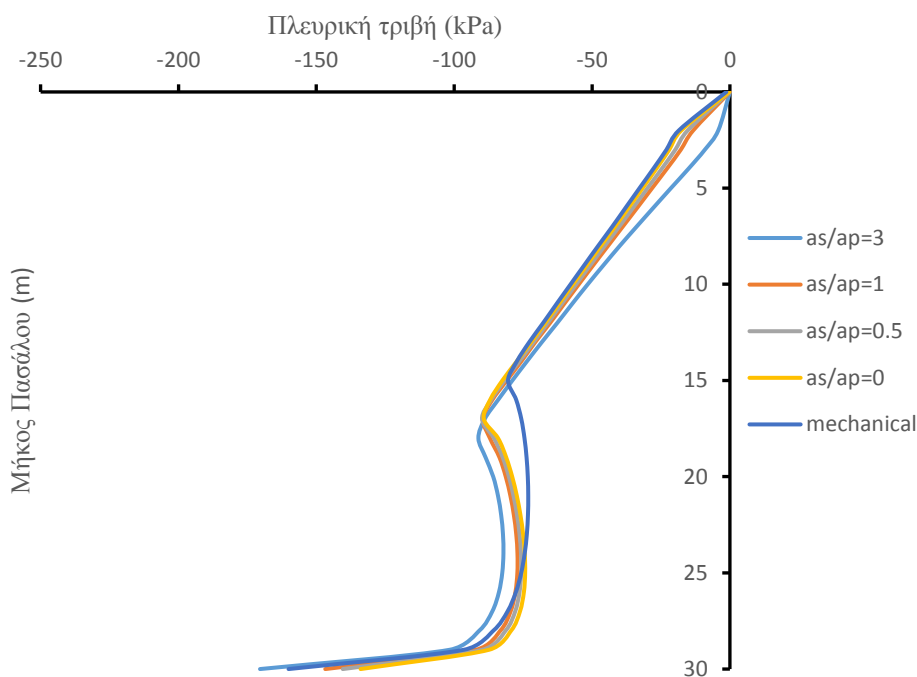
Τέλος, όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το Σχήμα 6.5.1.15, κατά την επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C για απουσία μηχανικής φόρτισης παρατηρείται για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ η δημιουργία αρνητικής πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και της θετικής στο κάτω μέρος του λόγω της μεγαλύτερης διαστολής που υφίσταται το έδαφος σε σύγκριση με τον πάσσαλο για μόνιμη ροή θέρμανσης. Αντιθέτως, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$, το έδαφος διαστέλλεται λιγότερο από τον πάσσαλο και παρουσιάζεται μία μείωση της θετικής πλευρικής τριβής στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα ελάττωση της αρνητικής στο κάτω μέρος του με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται το έδαφος. Σχετικά με την κατανομή των διατμητικών τάσεων βάσει της μεταβολής του συντελεστή $\alpha(\text{m/m/K})$ του εδάφους για μόνιμη χρονική διάρκεια θέρμανσης στον πάσσαλο παρόμοια με τα παραπάνω συμπεράσματα εξάχθηκαν και από την έρευνα του Rui Assunção (2014).



Σχήμα 6.5.1.16) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για διάρκεια 6 μηνών.



Σχήμα 6.5.1.17) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για διάρκεια 6 μηνών.



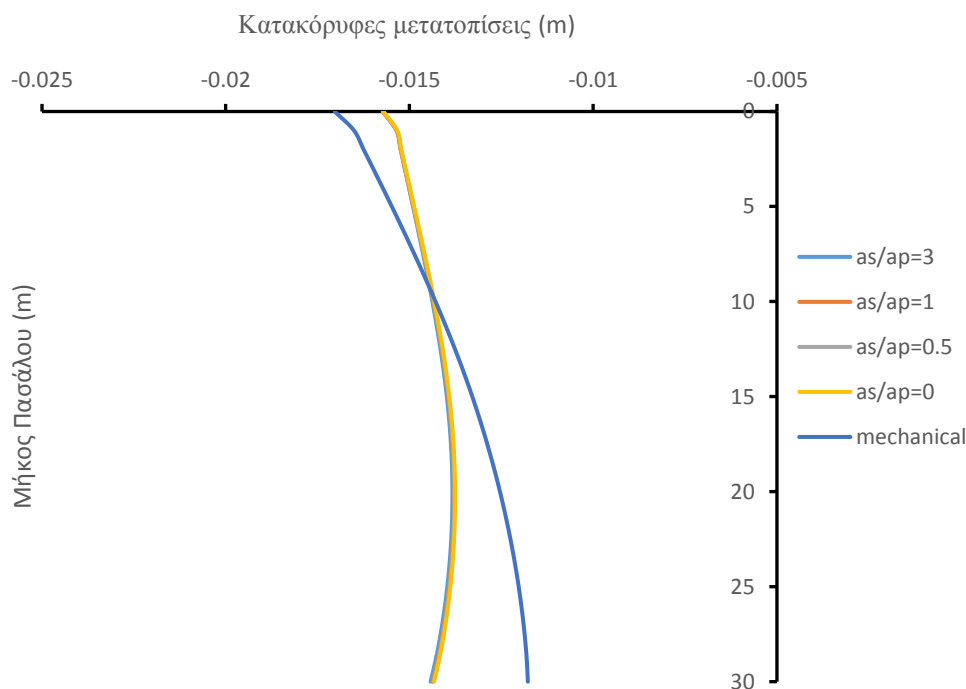
Σχήμα 6.5.1.18) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους α_s/α_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για διάρκεια 6 μηνών.

Όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.16), κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες παρατηρείται μια μικρή αύξηση των καθιζήσεων σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ συναντώνται οι μεγαλύτερες καθιζήσεις στον πάσσαλο, ενώ για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0$ οι μικρότερες καθιζήσεις με τη διαφορά τους να είναι περίπου στο 6%. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται λόγω της ιδιότητας του εδάφους να συστέλλεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου α_s/α_p στην ψύξη, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να ενισχύει τις καθιζήσεις του. Η αλλαγή βέβαια αυτή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, για αύξηση του λόγου α_s/α_p παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point), δηλαδή του σημείου στο οποίο είναι ίσες η μηχανική καθίζηση με αυτήν που προκαλείται από την ψύξη, προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Σύμφωνα με τους Rotta Loria et al. (2015) η θέση του ουδέτερου σημείου εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης και της θερμικής φόρτισης που δέχεται ο πάσσαλος.

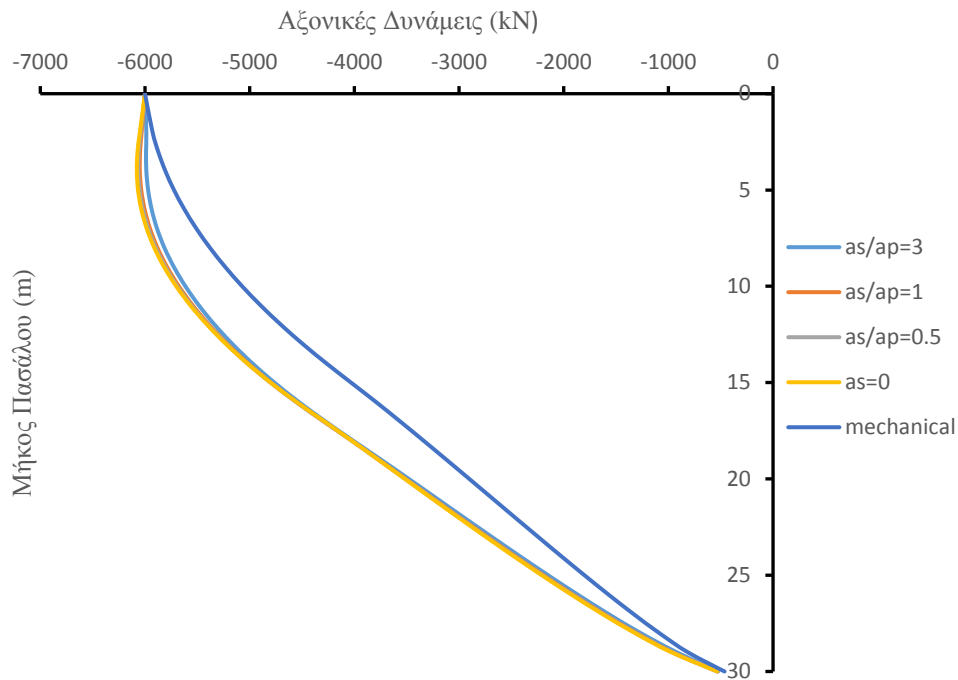
Όπως προαναφέρθηκε, κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες παρατηρείται μια μικρή αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος με

συνέπεια τη δημιουργία μεγαλύτερων επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων στη διεπιφάνεια. Ειδικότερα, όσον αφορά τις τιμές των αξονικών δυνάμεων κατά τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN (βλ. Σχήμα 6.5.1.17) στην κεφαλή του πασσάλου για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πασσάλου σε σχέση με τους υπόλοιπους λόγους λόγω της μεγαλύτερης συστολής που υφίσταται το έδαφος για τη συγκεκριμένη χρονική διάρκεια των 6 μηνών. Για τους υπόλοιπους λόγους $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ παρατηρούνται παρόμοιες αξονικές δυνάμεις οι οποίες είναι σχεδόν αριθμητικά ίδιες με την μηχανική κατάσταση.

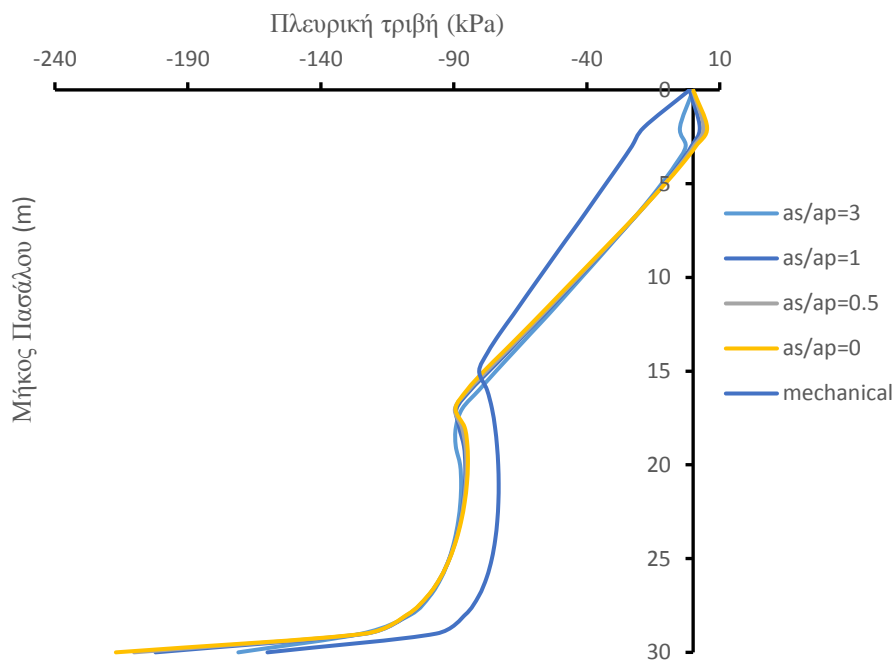
Τέλος, αναφορικά με την πλευρική τριβή, όπως παρατηρείται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.18) κατά την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για λόγο $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ δεν προκαλούνται σημαντικές μεταβολές. Ωστόσο, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παρουσιάζεται μία μείωση της πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και μία αύξηση στο κάτω μέρος του, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή του εδάφους.



Σχήμα 6.5.1.19) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους α_s/α_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C - 30 °C για διάρκεια 6 μηνών.



Σχήμα 6.5.1.20) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0°C - 30°C για διάρκεια 6 μηνών.

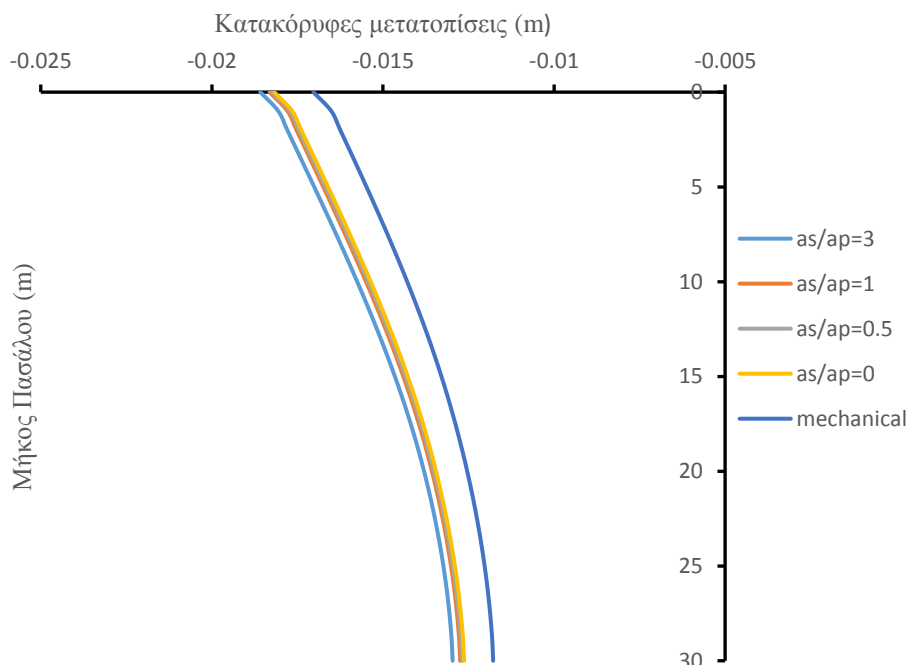


Σχήμα 6.5.1.21) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0°C - 30°C για διάρκεια 6 μηνών.

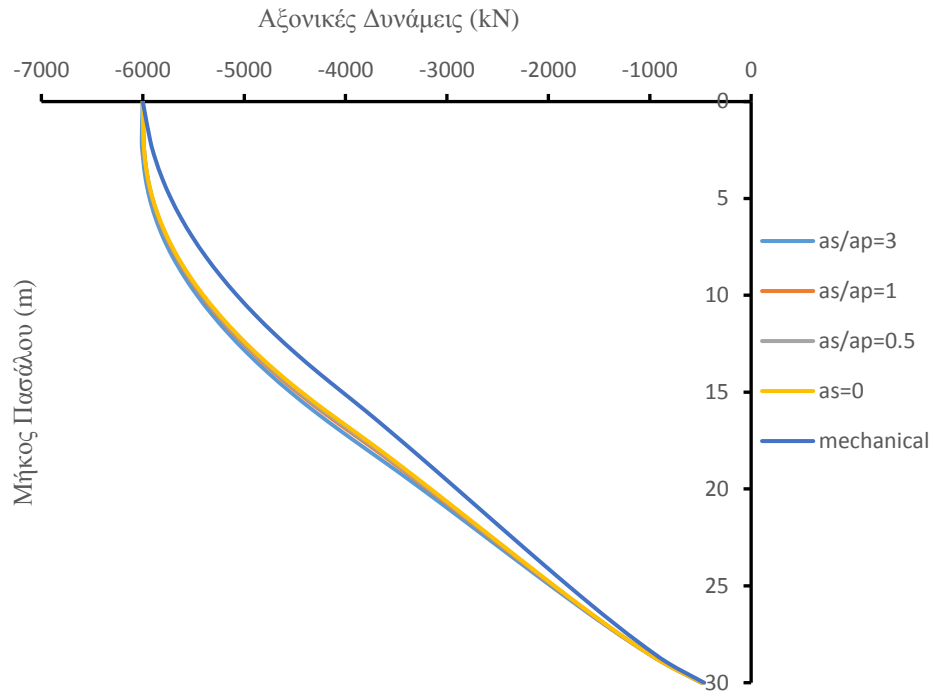
Παρατηρώντας κανείς το Σχήμα 6.5.1.19, όσον αφορά το βήμα με την πρόσθετη μηχανική φόρτιση 6000 kN με την επιβολή θέρμανσης για 6 μήνες παρατηρείται ότι η μεταβολή του λόγου a_s/a_p δεν επηρεάζει την αριθμητική τιμή των καθιζήσεων. Ειδικότερα, οι καθιζήσεις είναι περίπου ίσες για όλους τους διαφορετικούς λόγους a_s/a_p , γεγονός που οφείλεται στη διαστολή που υφίσταται το έδαφος για το χρονικό διάστημα των 6 μηνών για όλους τους λόγους a_s/a_p , η οποία δεν κρίνεται ικανή να ενισχύσει την ανύψωση του πασσάλου. Αντίστοιχα, στο παρόν θερμοκρασιακό πεδίο όπως και στο προηγούμενο, η αλλαγή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου.

Επιπλέον, όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις όπως μπορεί κανείς να διακρίνει μέσα από το Σχήμα 6.5.1.20 όσον αφορά τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου παρατηρούνται για τους διάφορους λόγους a_s/a_p παρόμοιες αξονικές δυνάμεις, γεγονός που οφείλεται στην ομοιότητα των διαγραμμάτων τους της πλευρικής τριβής. Πιο συγκεκριμένα, το παραπάνω γεγονός συντελεί στη δημιουργία παραπλήσιων επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων στη διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα τη μη εμφάνιση επιρροής του λόγου a_s/a_p στις τιμές των αξονικών δυνάμεων.

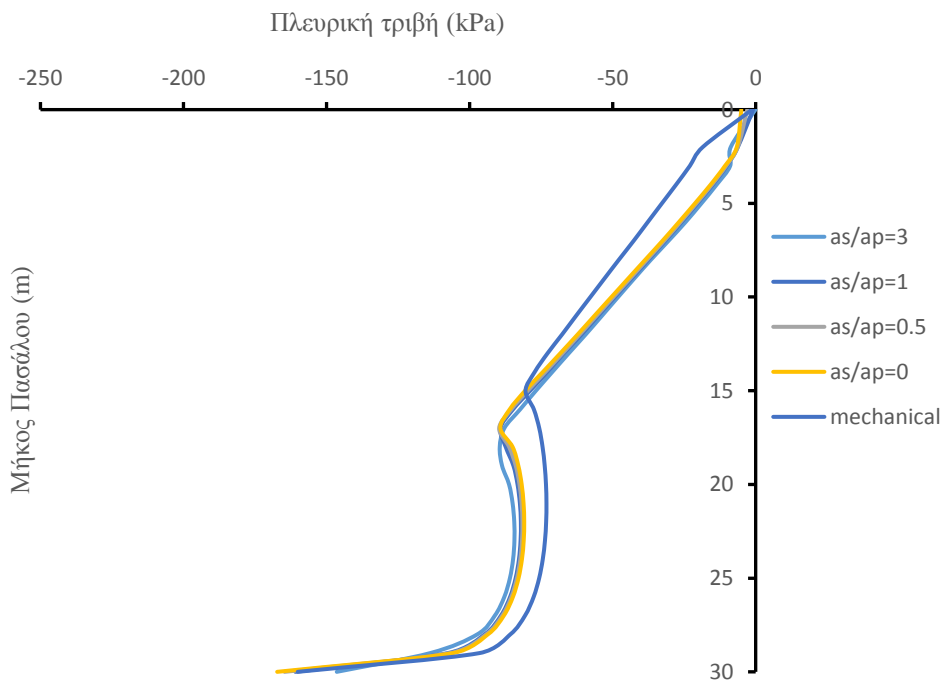
Τέλος, όσον αφορά την πλευρική τριβή κατά την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN (βλ. Σχήμα 6.5.1.21) δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές εξαιτίας του λόγου a_s/a_p . Το γεγονός αυτό οφείλεται στη χρονική διάρκεια των 6 μηνών που δεν κρίνεται ικανή να αναδείξει διαφορές εξαιτίας της προγενέστερης ψύξης.



Σχήμα 6.5.1.22) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C.



Σχήμα 6.5.1.23) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C.

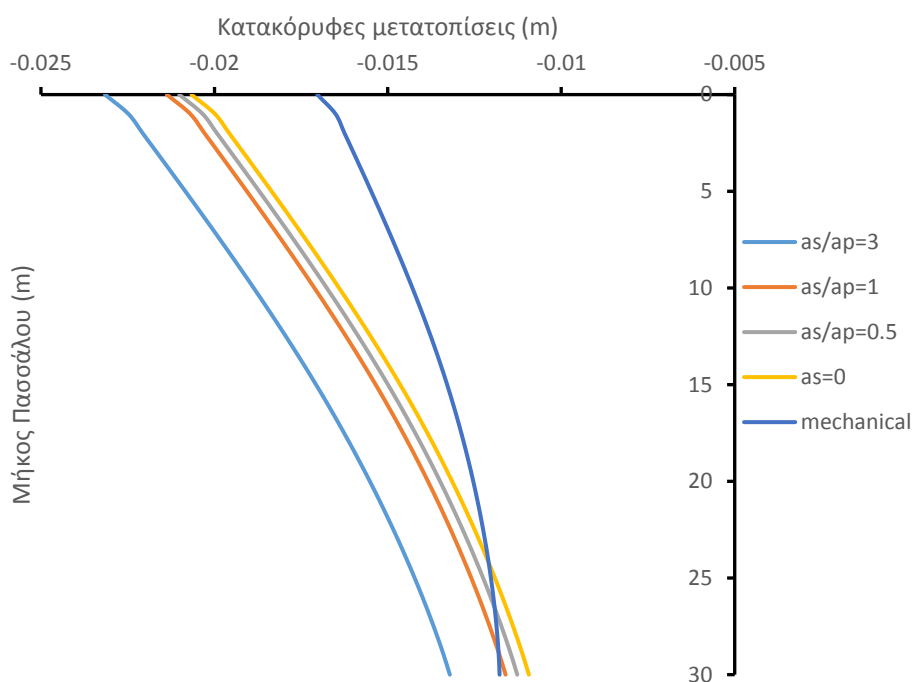


Σχήμα 6.5.1.24) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C.

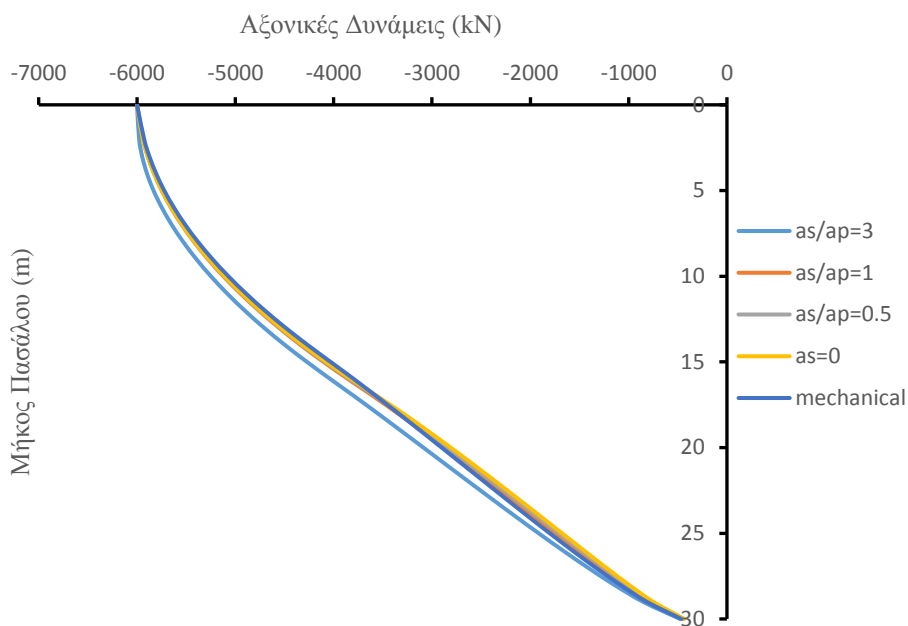
Με βάση το Σχήμα 6.5.1.22, για πρόσθετη μηχανική φόρτιση 6000 kN με την επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C για επιστροφή την αρχική θερμοκρασία παρατηρείται μία ανεπαίσθητη αύξηση των καθιζήσεων με την αύξηση του λόγου a_s/a_p , η οποία γενικότερα κρίνεται ως αμελητέα, με την κυριότερη διαφορά να απαντάται για $a_s/a_p = 3$. Η ανεπαίσθητη αυτή αύξηση στις καθιζήσεις οφείλεται στην ιδιότητα του εδάφους να συστέλλεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου a_s/a_p στην ψύξη, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η καθίζηση του πασσάλου. Αντίστοιχα, η μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους.

Βάσει του Σχήματος 6.5.1.23, κατά την επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C του θερμικού κύκλου παρατηρείται ότι για παρουσία 6000 kN, ο λόγος a_s/a_p δε δημιουργεί σημαντική επίδραση στις αριθμητικές τιμές των αξονικών δυνάμεων. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην ομοιότητα των διαγραμμάτων από την πλευρική τριβή, που συντελούν στη δημιουργία παρόμοιων διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια.

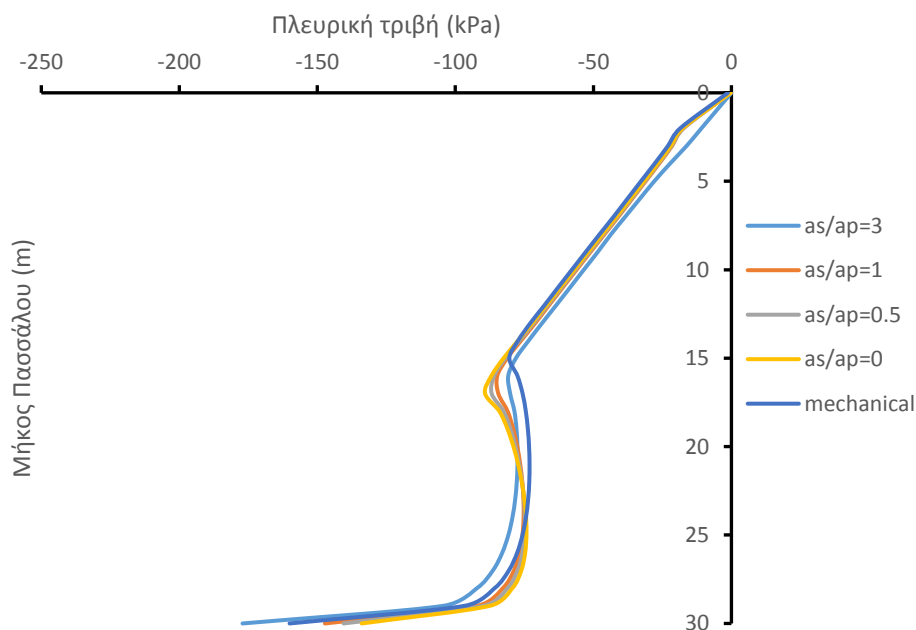
Τέλος, αναφορικά με την πλευρική τριβή (βλ. Σχήμα 6.5.1.24) για πρόσθετη μηχανική φόρτιση 6000 kN προκύπτει ότι η αλλαγή του συντελεστή διόγκωσης του εδάφους δεν μεταβάλλει σημαντικά τις αριθμητικές τιμές της πλευρικής τριβής στη διεπιφάνεια, γεγονός που οφείλεται στο διάστημα των 6 μηνών θερμικής φόρτισης.



Σχήμα 6.5.1.25) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης 15 °C - 0 °C για συνθήκες μόνιμης θερμικής ροής (steady state).



Σχήμα 6.5.1.26) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για διάρκεια μόνιμης θερμικής φόρτισης (steady state).



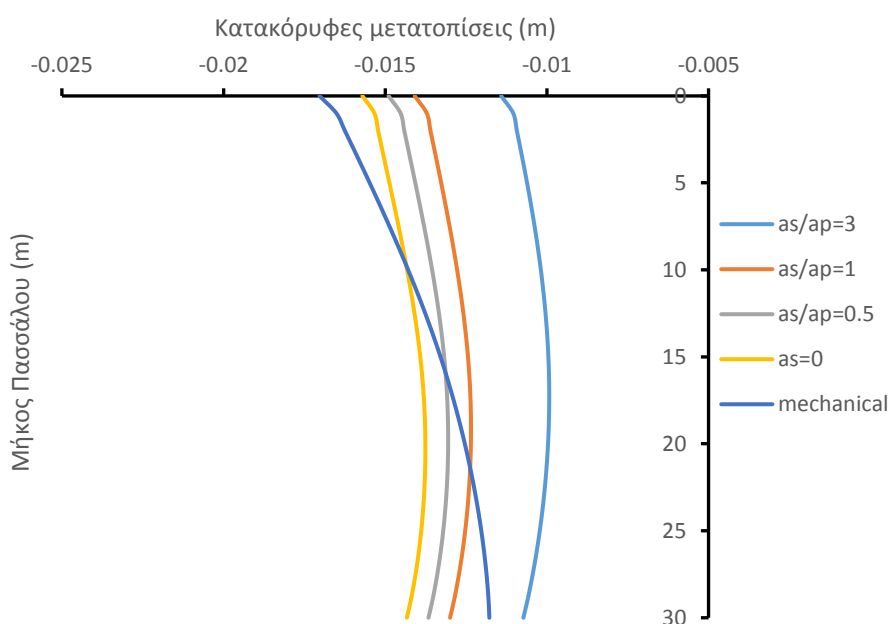
Σχήμα 6.5.1.27) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για διάρκεια μόνιμης θερμικής φόρτισης (steady state).

Όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.25), κατά την επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ παρατηρείται μια αύξηση των καθιζήσεων σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $a_s/a_p = 3$ συναντώνται οι μεγαλύτερες

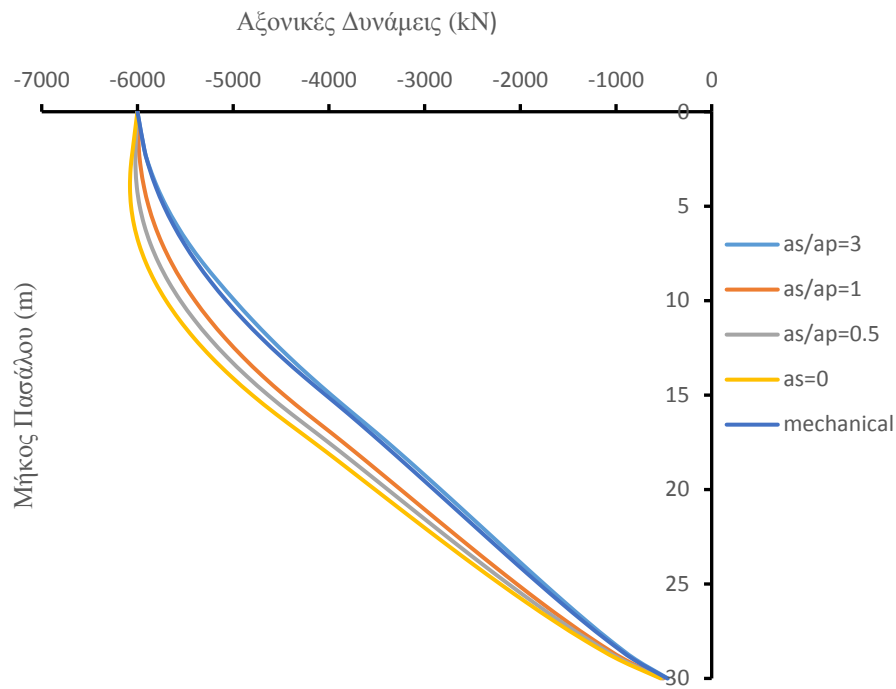
καθιζήσεις στον πάσσαλο, ενώ για λόγο $a_s/a_p = 0$ οι μικρότερες καθιζήσεις με τη διαφορά τους να κυμαίνεται γύρω στο 12 %. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται λόγω της ιδιότητας του εδάφους να συστέλλεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου a_s/a_p στην ψύξη, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να αυξάνονται οι καθιζήσεις. Η αλλαγή βέβαια αυτή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, για αύξηση του λόγου a_s/a_p παρουσιάζεται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.26) όσον αφορά τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου, για μόνιμη χρονική διάρκεια θερμικής φόρτισης παρατηρούνται παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις για όλους τους λόγους a_s/a_p , οι οποίες μάλιστα είναι παρόμοιες και με αυτές που παρουσιάζονται κατά την αρχική μηχανικής φόρτιση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη μηχανική φόρτιση που ασκείται στην κεφαλή του πασσάλου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του ορίου διατμητικής αντοχής σε ένα σημείο του πασσάλου από την αρχική μηχανική φόρτιση, κάτι το οποίο οδηγεί στην ταύτιση των διαγραμμάτων της πλευρικής τριβής για όλους τους λόγους των συντελεστών διόγκωσης.

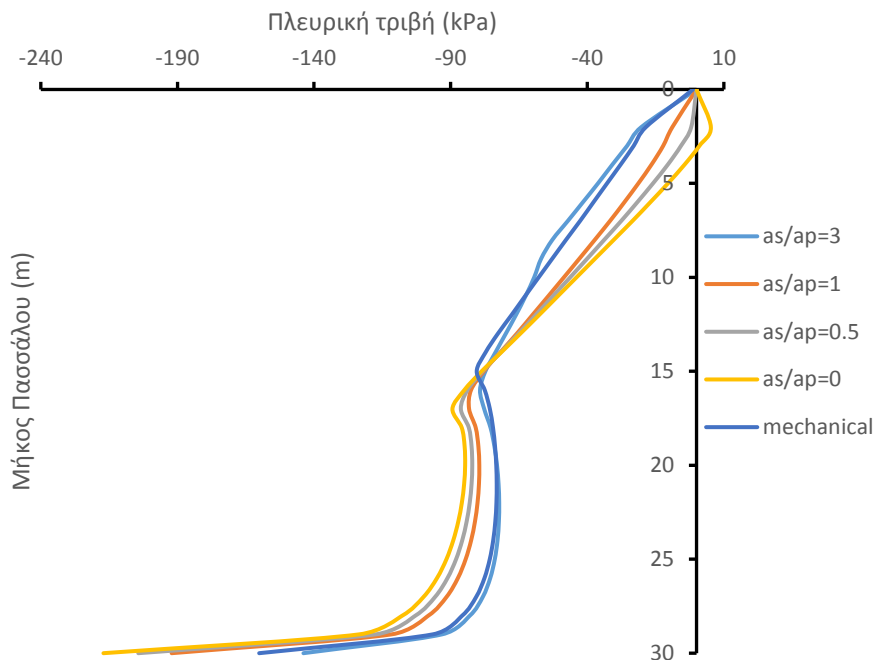
Παρατηρώντας κανείς το Σχήμα 6.5.1.27 αναφορικά με τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN στην κεφαλή του πασσάλου, για το βήμα του μόνιμου χρονικού διαστήματος της αρχικής ψύξης εξάγεται το συμπέρασμα ότι η πλευρική τριβή κατά μήκος του πασσάλου για όλους τους λόγους a_s/a_p είναι παραπλήσιες. Ειδικότερα, εμφανίζουν παρόμοιες τιμές με αυτές της αρχικής μηχανικής φόρτισης, γεγονός που οφείλεται στην εμφάνιση της διατμητικής αντοχής σε ένα σημείο του πασσάλου από την αρχική μηχανική φόρτιση πριν την επιβολή ψύξης.



Σχήμα 6.5.1.28) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης $0^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ για διάρκεια μόνιμης θερμικής φόρτισης.



Σχήμα 6.5.1.29) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης 0 °C - 30 °C για διάρκεια μόνιμης θερμικής φόρτισης.



Σχήμα 6.5.1.30) Κατανομή πλευρικής τριβής για όλους τους εξεταζόμενους λόγους a_s/a_p με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης 0 °C - 30 °C για διάρκεια μόνιμης θερμικής φόρτισης.

Όπως ακριβώς φαίνεται μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.1.28), κατά την επιβολή της θέρμανσης $0^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ παρατηρείται μια μείωση των καθιζήσεων σε όλο το μήκος του πασσάλου με την αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης (α) του αμμώδους εδάφους για το μόνιμο χρονικό διάστημα θερμικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ απαντώνται οι μικρότερες καθιζήσεις στον πάσσαλο, ενώ για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 0$ οι μεγαλύτερες καθιζήσεις με τη διαφορά τους να χαρακτηρίζεται αρκετά μεγάλη και να κυμαίνεται περίπου στο 37 %. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται λόγω της ιδιότητας του εδάφους να διαστέλλεται περισσότερο ανάλογα με την αύξηση του λόγου α_s/α_p στη θέρμανση, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να ενισχύει τη διαστολή του και να ανυψώνεται ο πάσσαλος για μόνιμη θέρμανση. Η αλλαγή βέβαια αυτή της θερμικής διόγκωσης του εδάφους δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, για αύξηση του λόγου α_s/α_p παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα κάτω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου.

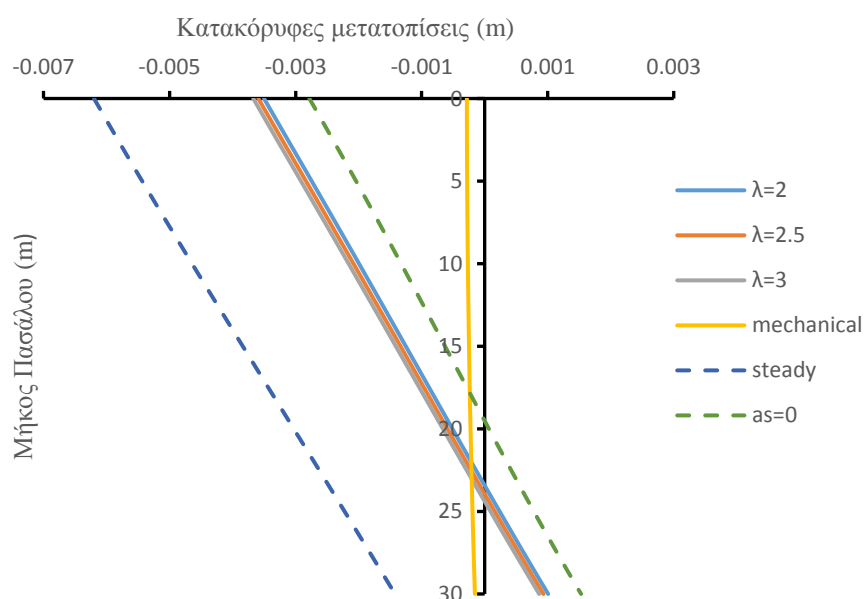
Όσον αφορά τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN όπως μπορεί κανείς να διακρίνει μέσα από το Σχήμα 6.5.1.29 στην κεφαλή του πασσάλου παρατηρούνται για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις με τη μηχανική φόρτιση απουσίας θέρμανσης λόγω της μεγαλύτερης διαστολής που υφίσταται το έδαφος σε σύγκριση με τον πάσσαλο με συνέπεια την εξάλειψη των επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων (δημιουργία ανεπαισθητων μικρών εφελκυστικών αξονικών τάσεων) που δημιουργούνται μέσω της μόνιμης ροής θέρμανσης του πασσάλου. Αντιστρόφως, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ οι αξονικές δυνάμεις αυξάνονται με την ελάττωση του συντελεστή διόγκωσης του εδάφους λόγω της μικρότερης διαστολής που εμφανίζει το έδαφος, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι παραμένει μικρότερη από τη διαστολή που υφίσταται ο πάσσαλος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπρόσθετων αξονικών τάσεων στον πάσσαλο εξαιτίας του διαγράμματος της πλευρικής τριβής.

Τέλος μέσα από το Σχήμα 6.5.1.30 φαίνεται ότι για το λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ δημιουργούνται παρόμοιες τιμές πλευρικής τριβής με την απουσία θέρμανσης λόγω της μεγαλύτερης διαστολής που υφίσταται το έδαφος σε σύγκριση με τον πάσσαλο, με συνέπεια την ύπαρξη παραπλήσιων διατμητικών τάσεων με τις μηχανικές λόγω της εξάλειψης των θλιπτικών αξονικών τάσεων που εμφανίζονται στον πάσσαλο λόγω της θέρμανσης. Αντιστρόφως, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ οι τιμές της πλευρικής τριβής μειώνονται στο άνω μέρος του πασσάλου με την ελάττωση του συντελεστή διόγκωσης του εδάφους και παράλληλα αυξάνονται στο κάτω μέρος του λόγω της μικρότερης διαστολής που εμφανίζει το έδαφος.

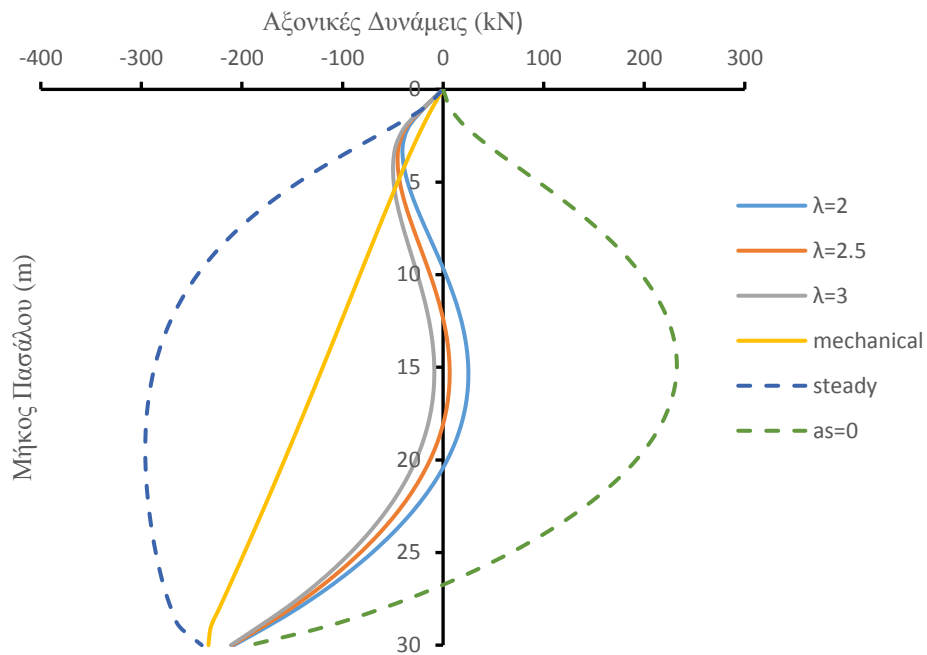
6.5.2) Επιρροή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K)

Η θερμική αγωγιμότητα (λ , W/m/K) ενός υλικού αποτελεί μέτρο της ικανότητας του υλικού να άγει θερμότητα από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μια περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας. Η ροή θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο σημείο ενός σώματος, εξαρτάται από τις διαστάσεις του σώματος, τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο άκρων, από τον χρόνο της θερμικής ροής, καθώς και από τη φύση του υλικού του σώματος (Φραγκογιάννης, 2011). Η μεταβολή του συντελεστή αγωγιμότητας (λ) του εδάφους ρυθμίζει την ικανότητα του εδάφους να επιδέχεται τις θερμοκρασιακές μεταβολές (θέρμανση, ψύξη) από τις θερμοκρασιακές διαφορές που επιβάλλονται στον πάσσαλο. Σύμφωνα, με την εργασία της Suryatriyastuti (2013) ο συντελεστής αγωγιμότητας λ για αμμώδες κορεσμένο έδαφος κυμαίνεται από 1,7 έως 3,2 (W/m/K).

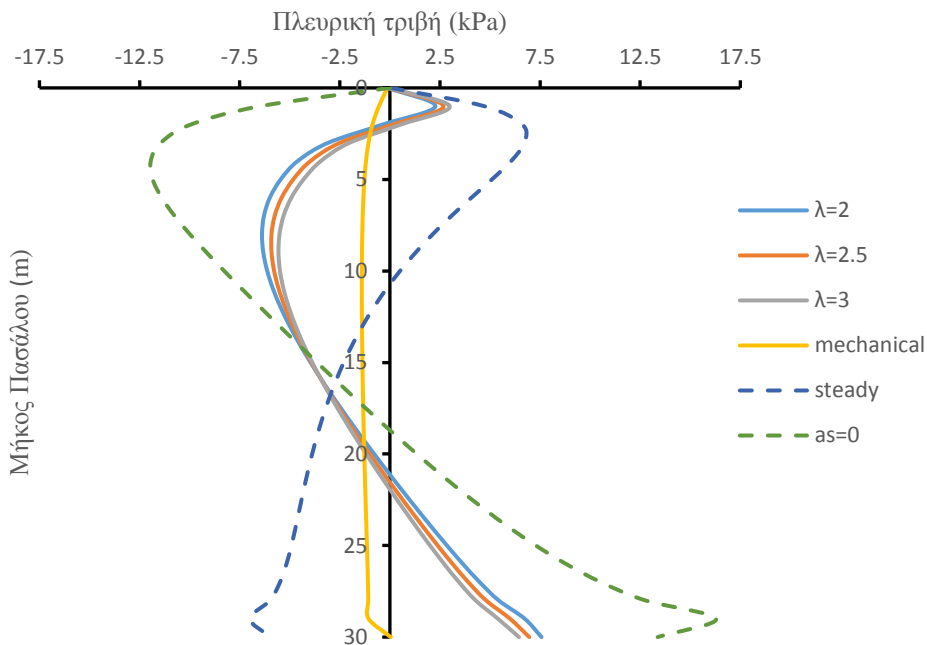
Στη συνέχεια θα παρατεθούν διαγράμματα επιρροής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για $\lambda = 2$ (W/m/K), $\lambda = 2.5$ (W/m/K), $\lambda = 3$ (W/m/K), της εδαφικής περιοχής στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής του πασσάλου για θερμική φόρτιση 6 μηνών με λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200$ (J/kg/K). Αναμένεται ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ θα προκύψουν οι μέγιστες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής λόγω του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους και επομένως δεν κρίνεται απαραίτητο να παρατεθούν τα διαγράμματα σύγκρισης θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) για τους υπόλοιπους λόγους α_s/α_p . Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι για μόνιμη θερμική ροή ή για $\alpha_s = 0$ (m/m/K), ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δεν επηρεάζει την κατανομή των προαναφερθέντων εξεταζόμενων μεγεθών.



Σχήμα 6.5.2.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



Σχήμα 6.5.2.2) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



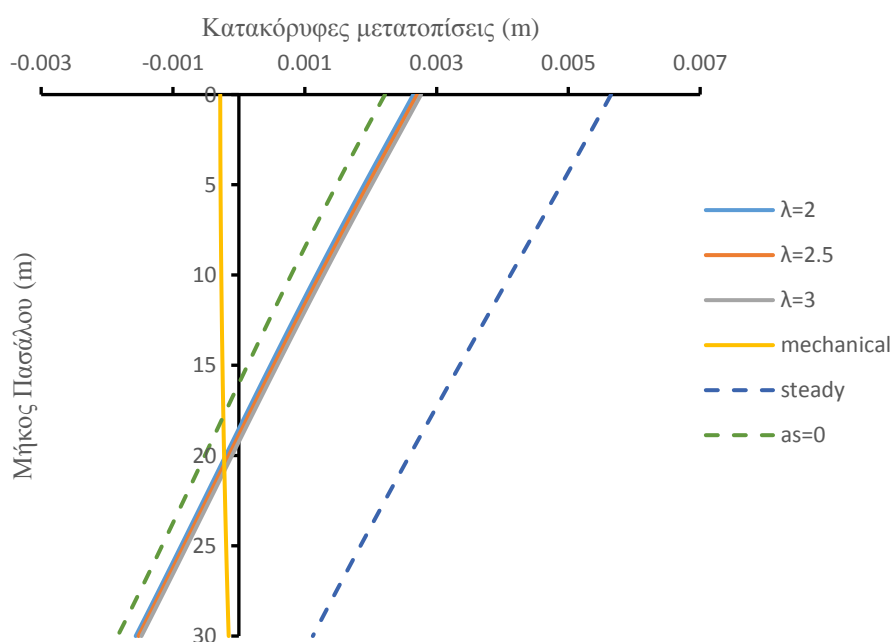
Σχήμα 6.5.2.3) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

Αρχικά, κατά την επιβολή της αρχικής ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ παρατηρείται βάσει του διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.5.2.1) ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης δε

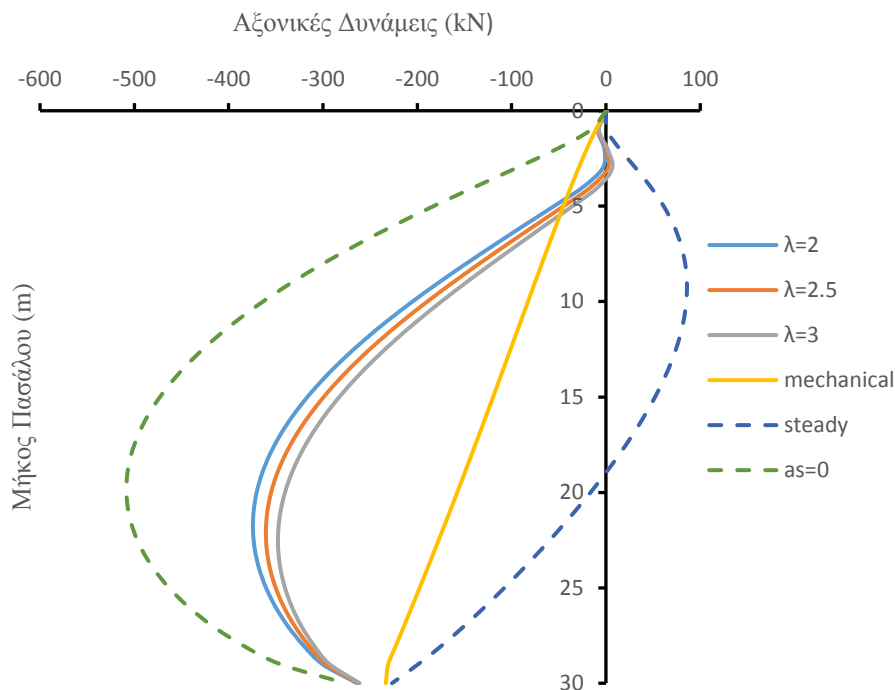
σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή του συντελεστή αγωγιμότητας (λ) του εδάφους, για το χρονικό διάστημα 6 μηνών στο βήμα της ψύξης δεν επηρεάζει την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Παράλληλα, όπως προαναφέρθηκε, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα.

Επιπλέον, όπως παρουσιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.2.2), κατά την επιβολή της αρχικής ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης σημειώνονται μικρές διαφορές μεταξύ των αξονικών δυνάμεων λόγω της μεταβολής του συντελεστή λ (W/m/K) του εδάφους. Σημειώνεται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τόσο αυξάνονται οι αρνητικές αξονικές δυνάμεις που δημιουργούνται κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη συστολή που υφίσταται το έδαφος, με αποτέλεσμα την ελάττωση των επιπρόσθετων εφελκυστικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο λόγω της ψύξης.

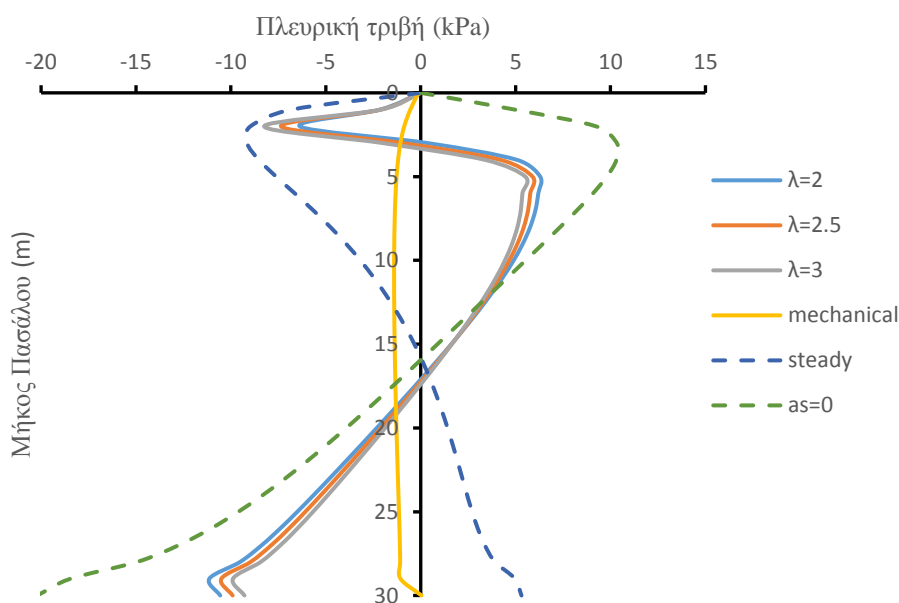
Τέλος, όπως παρουσιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.2.3), κατά την επιβολή της αρχικής ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης σημειώνονται μικρές διαφορές μεταξύ της πλευρικής τριβής λόγω της μεταβολής του συντελεστή λ (W/m/K) του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τόσο μειώνονται οι αρνητικές τιμές της πλευρικής τριβής που δημιουργούνται στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα οι θετικές τιμές της πλευρικής τριβής που εμφανίζονται στο κάτω μέρος του λόγω της μεγαλύτερης συστολής που εμφανίζει το έδαφος.



Σχήμα 6.5.2.4) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



Σχήμα 6.5.2.5) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή θέρμανσης 0 °C - 30 °C για 6 μήνες.



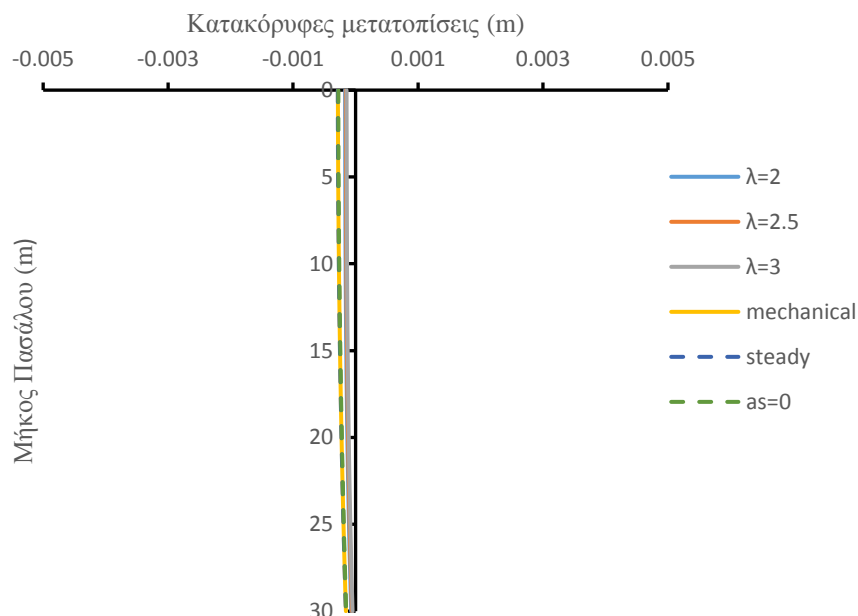
Σχήμα 6.5.2.6) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή θέρμανσης 0 °C - 30 °C για 6 μήνες.

Αρχικά, κατά την επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C, όπως ακριβώς μπορεί κανείς να διακρίνει μέσα από το Διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.2.4), παρατηρείται εξίσου ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις

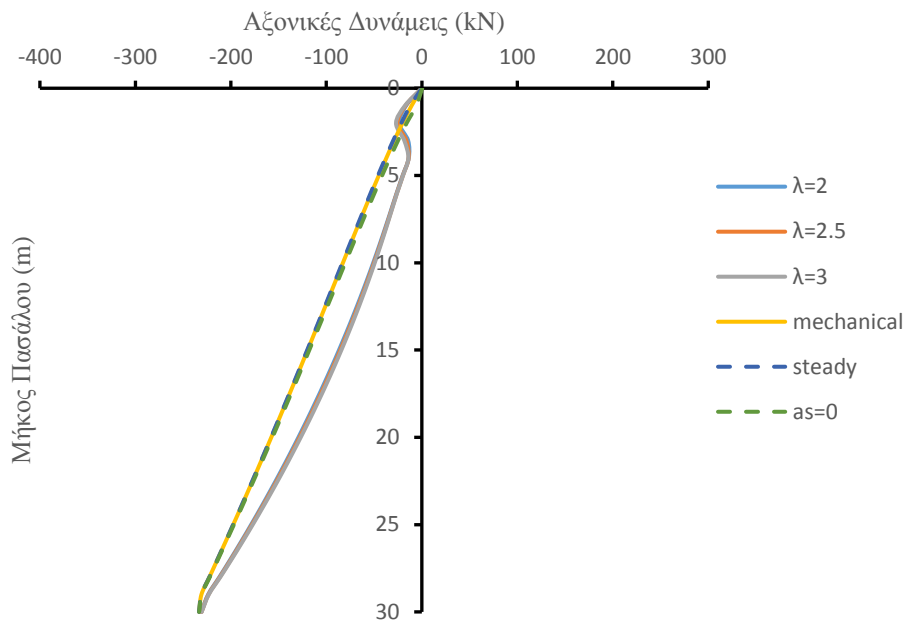
αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μεταβολή του συντελεστή αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους, για το χρονικό διάστημα 6 μηνών της θέρμανσης δεν επηρεάζει την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Παρόμοια αποτελέσματα αναμένονται και για λόγο $a_s/a_p < 3$, όπως ακριβώς αναφέρθηκε και παραπάνω.

Επιπροσθέτως, κατά την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$, όπως ακριβώς μπορεί κανείς να διακρίνει μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.2.5), παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης σημειώνονται μικρές διαφορές μεταξύ των αξονικών δυνάμεων λόγω της μεταβολής του συντελεστή λ (W/m/K) του εδάφους. Σημειώνεται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τόσο ελαττώνονται οι αξονικές δυνάμεις που δημιουργούνται κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή που υφίσταται το έδαφος, με αποτέλεσμα να μειώνονται ελαφρώς οι επιπρόσθετες θλιπτικές αξονικές τάσεις στον πάσσαλο λόγω της θέρμανσης.

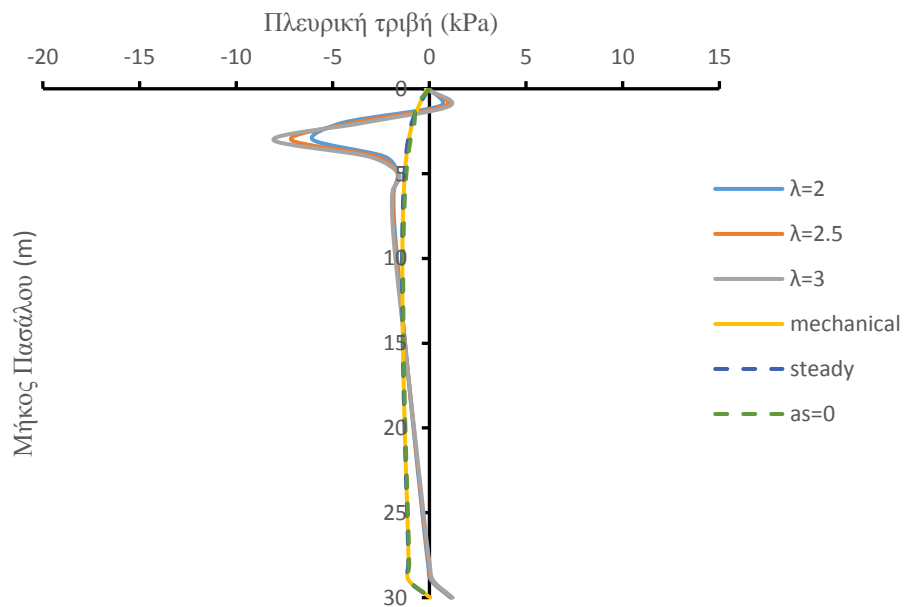
Τέλος, κατά την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$, όπως ακριβώς μπορεί κανείς να διακρίνει μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.2.6), παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης σημειώνονται ανεπαίσθητες διαφορές μεταξύ της πλευρικής τριβής λόγω της μεταβολής του συντελεστή λ (W/m/K) του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τόσο μεγεθύνονται οι θετικές τιμές της πλευρικής τριβής που δημιουργούνται στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα οι αρνητικές τιμές της που εμφανίζονται στο κάτω μέρος του.



Σχήμα 6.5.2.7) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή της τελικής ψύξης $30\text{ }^\circ\text{C} - 15\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



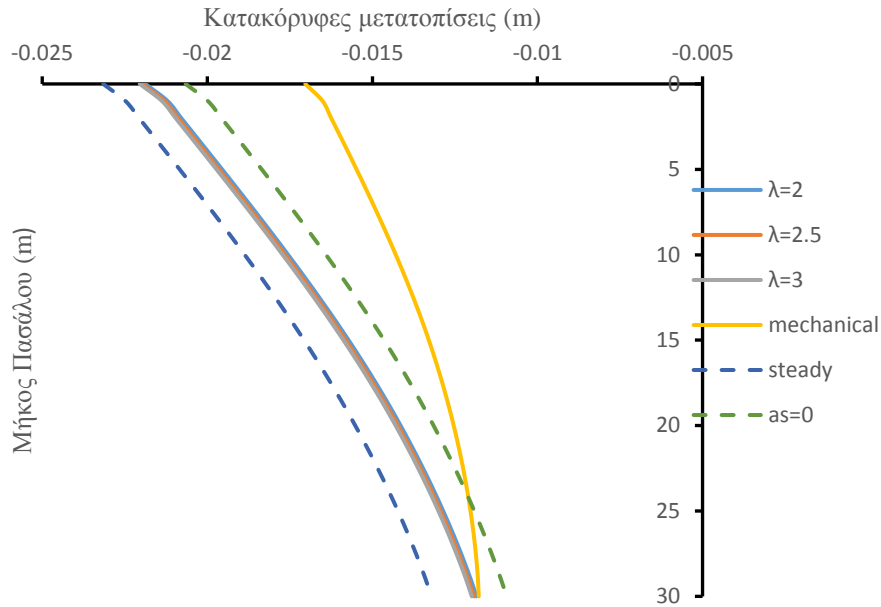
Σχήμα 6.5.2.8) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με επιβολή της τελικής ψύξης $30^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες.



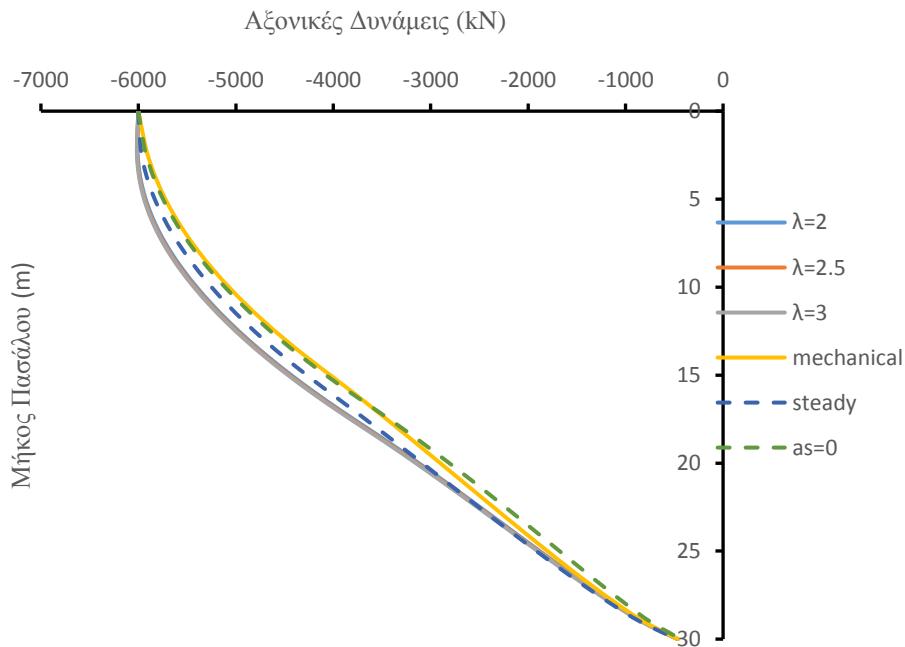
Σχήμα 6.5.2.9) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) χωρίς επίδραση μηχανικής φόρτισης με την τελική επιβολή ψύξης $30^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες.

Αναφορικά με την επιβολή της τελικής ψύξης $30^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες και με απουσία μηχανικής φόρτισης όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.5.2.7, 6.5.2.8, 6.5.2.9 παρατηρείται ότι δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους. Το γεγονός

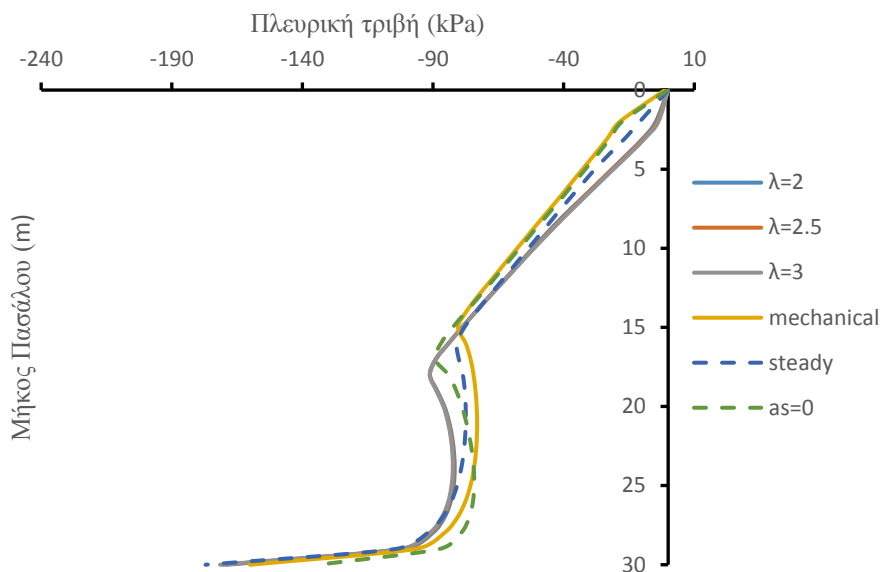
αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή αγωγιμότητας του εδάφους για απουσία μηχανικής φόρτισης δεν επηρεάζει τις τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών κατά την τελική ψύξη. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα.



Σχήμα 6.5.2.10) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000kN και με επιβολή της ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

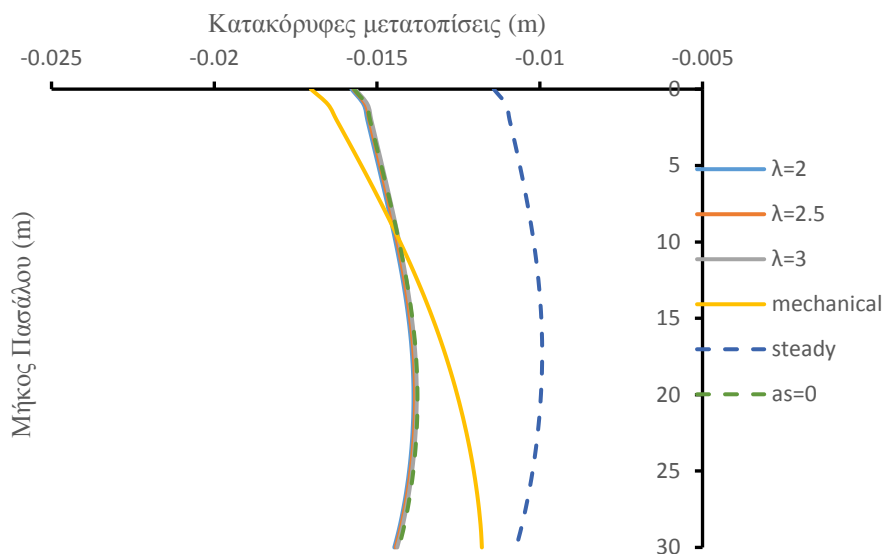


Σχήμα 6.5.2.11) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000kN και με επιβολή της ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

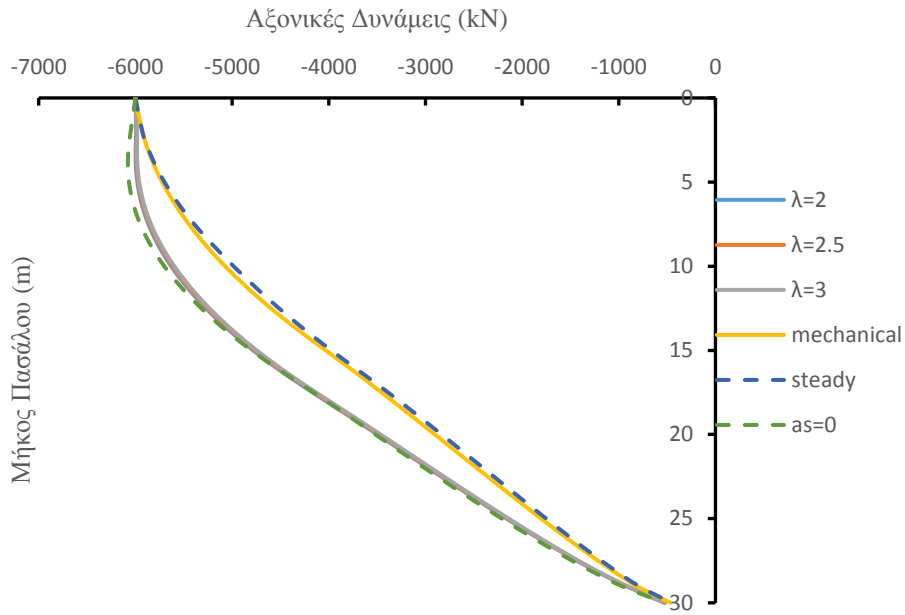


Σχήμα 6.5.2.12) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000kN και επιβολή της ψύξης $15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες.

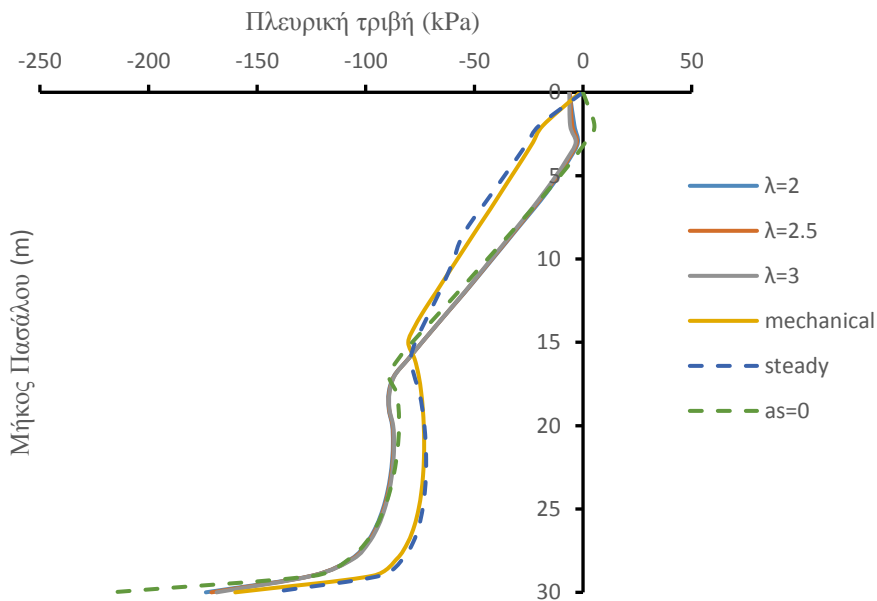
Αναφορικά με την επιβολή της αρχικής ψύξης $15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.5.2.10, 6.5.2.11, 6.5.2.12 παρατηρείται ότι για τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή αγωγιμότητας του εδάφους για το φορτίο λειτουργίας δεν προκαλεί μεταβολές στα εξεταζόμενα μεγέθη με την επιβολή ψύξης. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα.



Σχήμα 6.5.2.13) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή θέρμανσης από $0^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες.



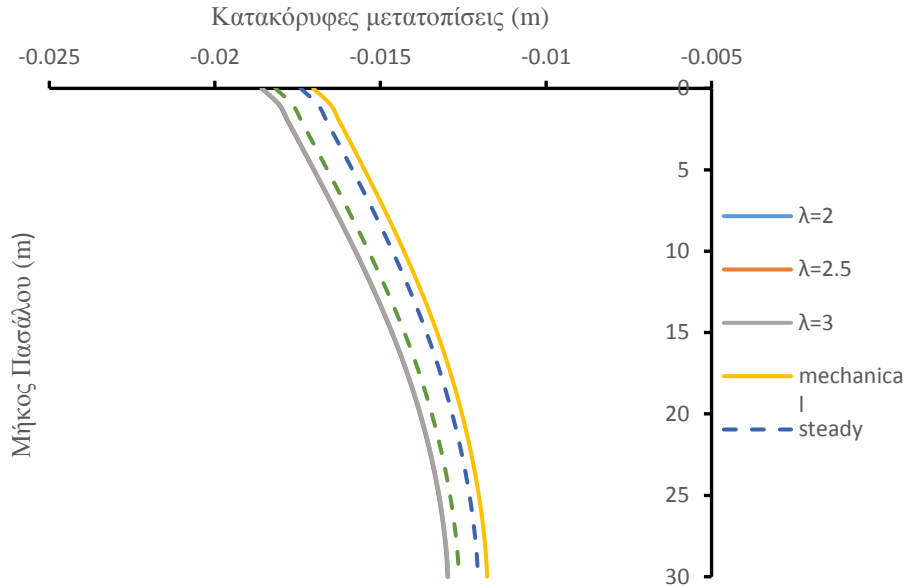
Σχήμα 6.5.2.14) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από 0 °C - 30 °C για 6 μήνες.



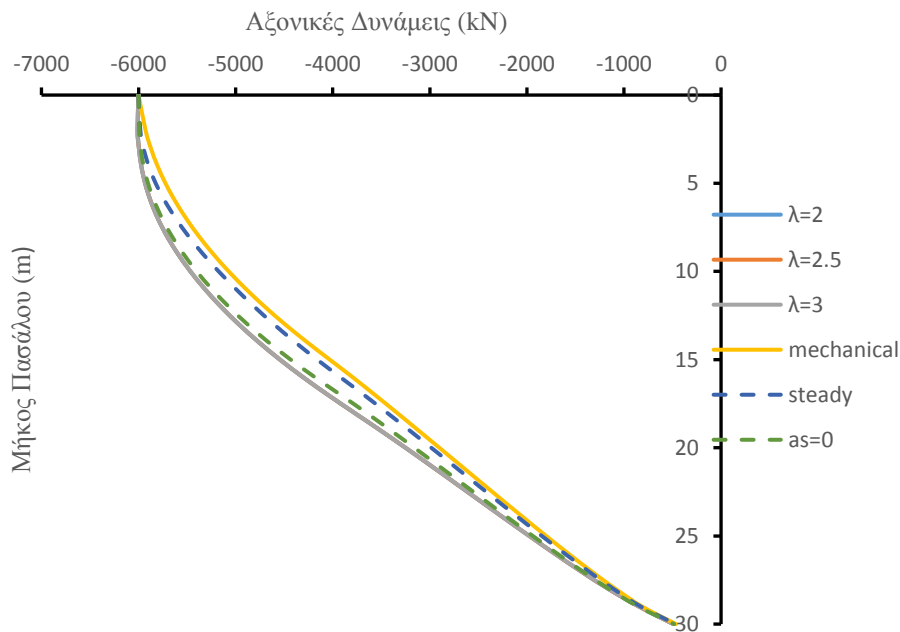
Σχήμα 6.5.2.15) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από 0 °C - 30 °C για 6 μήνες.

Όσον αφορά με την επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C για 6 μήνες και με επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN όπως φαίνεται μέσα από τα σχήματα (βλ. Σχήμα 6.5.2.13, Σχήμα 6.5.2.14, Σχήμα 6.5.2.15) δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής ανάλυσης με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας

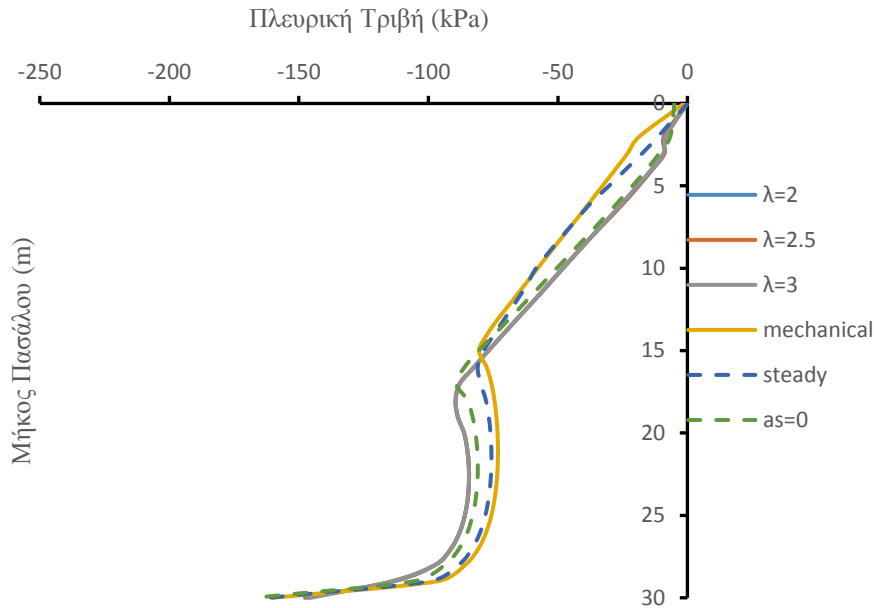
λ (W/m/K) του εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή αγωγιμότητας του εδάφους για το φορτίο λειτουργίας δεν προκαλεί μεταβολές στα εξεταζόμενα μεγέθη με την επιβολή θέρμανσης. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα.



Διάγραμμα 6.5.2.16) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15°C για 6 μήνες.



Διάγραμμα 6.5.2.17) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής επιβολή ψύξης 30 °C - 15°C για 6 μήνες.



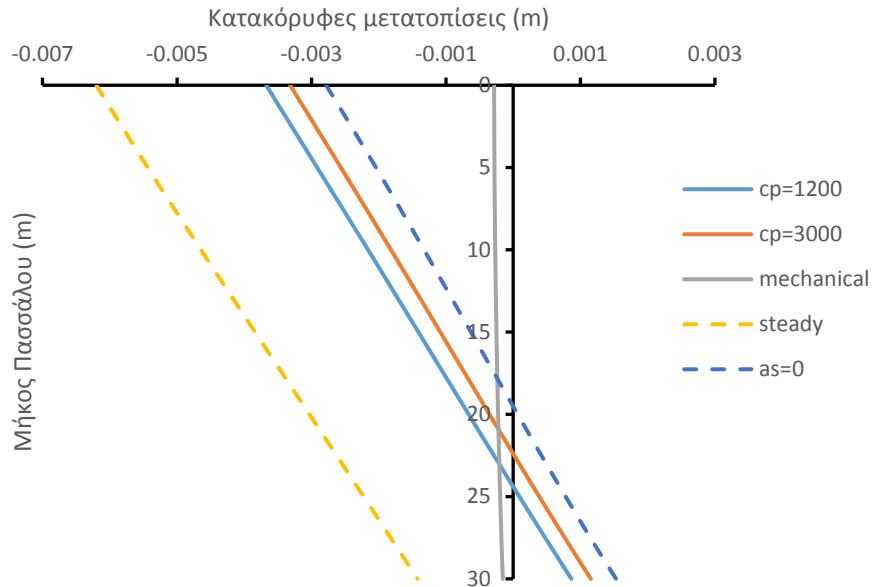
Διάγραμμα 6.5.2.18) Κατανομή πλευρικής ανάλυσης για τα εξεταζόμενα λ (W/m/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής επιβολή ψύξης $30^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες.

Αναφορικά με την επιβολή της τελικής ψύξης $30^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.5.2.16, 6.5.2.17, 6.5.2.18 παρατηρείται ότι για τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) του εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή αγωγιμότητας του εδάφους για το φορτίο λειτουργίας δεν προκαλεί μεταβολές στα εξεταζόμενα μεγέθη με την επιβολή της τελικής ψύξης. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγο $a_s/a_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα.

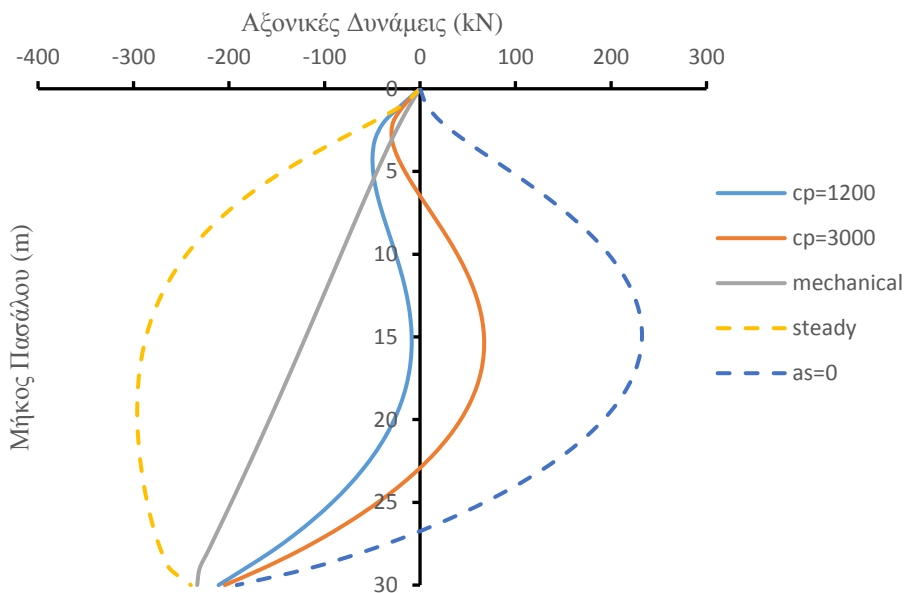
6.5.3 Επιρροή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K)

Ο συντελεστής ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) καθορίζει το μέγεθος της μεταβολής της θερμότητας (ψύξης ή της θέρμανσης αντίστοιχα) που πρέπει να επιβληθεί στο έδαφος για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του για 1°C με δεδομένο ότι παραμένει σταθερή η πίεση (Φραγκογιάννης, 2011). Δηλαδή, όσο αυξάνεται ο συντελεστής ειδικής θερμότητας τόσο δυσκολότερο είναι να μεταβληθεί η θερμοκρασία του εδάφους. Παρακάτω θα παρατεθούν διαγράμματα επιρροής του συντελεστή ειδικής θερμότητας για $c_p = 1200$ (J/kg/K), $c_p = 3000$ (J/kg/K) στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής του πασσάλου για θερμική φόρτιση 6 μηνών με λόγο $a_s/a_p = 3$ και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 3$ (W/m/K). Επίσης, αξίζει να επισημανθεί ότι για μόνιμη θερμική ροή ή για

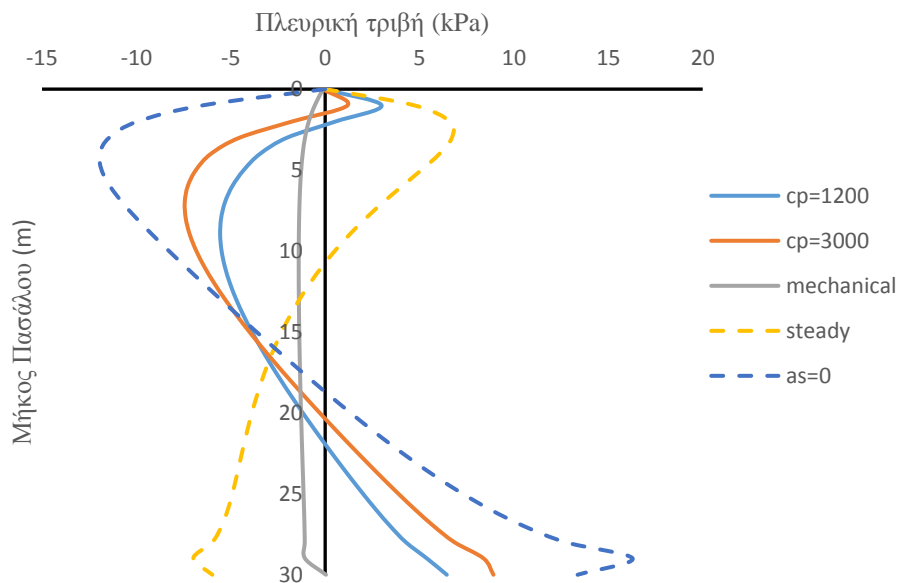
$\alpha_s = 0$ (m/m/K), ο συντελεστής ειδικής θερμότητας δεν επηρεάζει την κατανομή των προαναφερθέντων εξεταζόμενων μεγεθών.



Σχήμα 6.5.3.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



Σχήμα 6.5.3.2) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



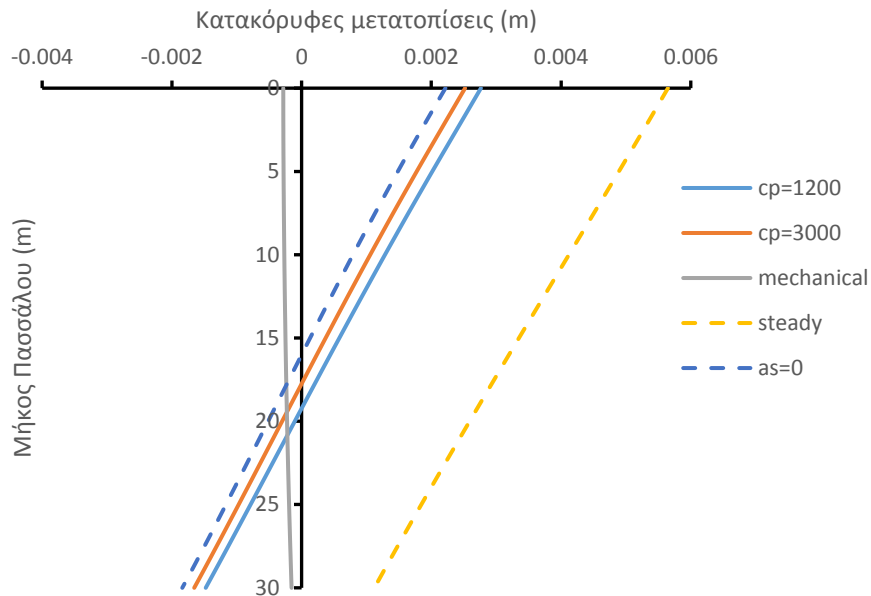
Σχήμα 6.5.3.3) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.3.1), για την επιβολή της αρχικής ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ του πασσάλου παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης μειώνονται σε μικρό βαθμό οι κατακόρυφες μετατοπίσεις με την αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) του εδάφους, γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη συστολή που παρουσιάζει το έδαφος με την αύξηση του c_p (J/kg/K), με αποτέλεσμα να μην συμπαρασύρει τον πάσσαλο και να ελαττώνονται οι καθιζήσεις του. Επιπλέον, για αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point), δηλαδή του σημείου στο οποίο είναι ίσες η μηχανική καθίζηση με αυτήν που προκαλείται από την ψύξη, προς τα πάνω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου.

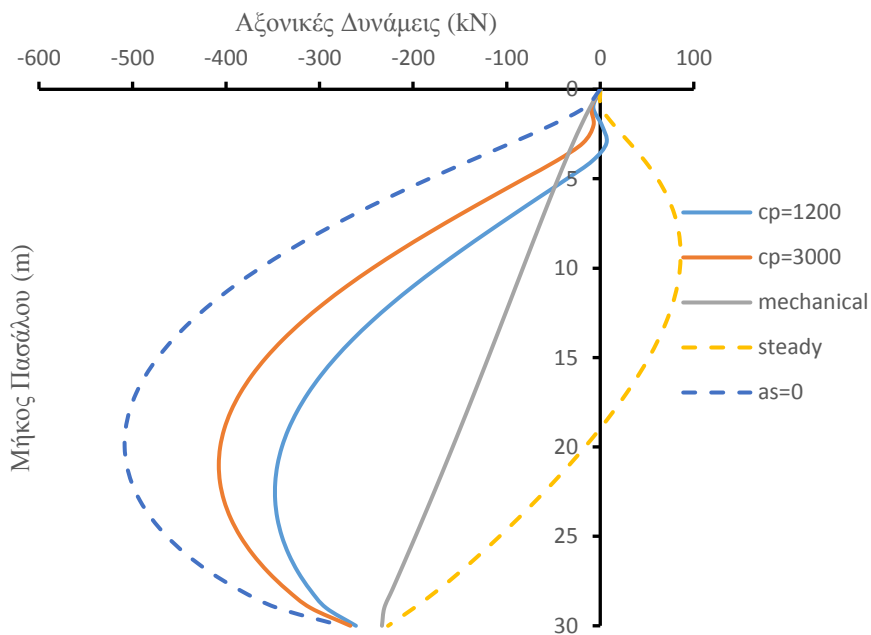
Όπως παρατηρεί κανείς μέσα από το Σχήμα 6.5.3.2 για την επιβολή της αρχικής ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ εντοπίζεται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης αυξάνονται οι θετικές αξονικές δυνάμεις με την αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, το έδαφος δέχεται μικρότερο μέγεθος θερμότητας με την αλλαγή θερμοκρασίας (ψύξη) γεγονός που προκαλεί τη μικρότερη συστολή του με την αύξηση του c_p (J/kg/K), με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερων πρόσθετων εφελκυστικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο.

Τέλος, με βάση το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.5.3.3), για την επιβολή της αρχικής ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ του πασσάλου παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης αυξάνονται οι αρνητικές τιμές της πλευρικής τριβής με την αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) στο άνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα μεγεθύνονται οι θετικές τιμές της στο κάτω μέρος του λόγω της μικρότερης συστολής που υφίσταται το

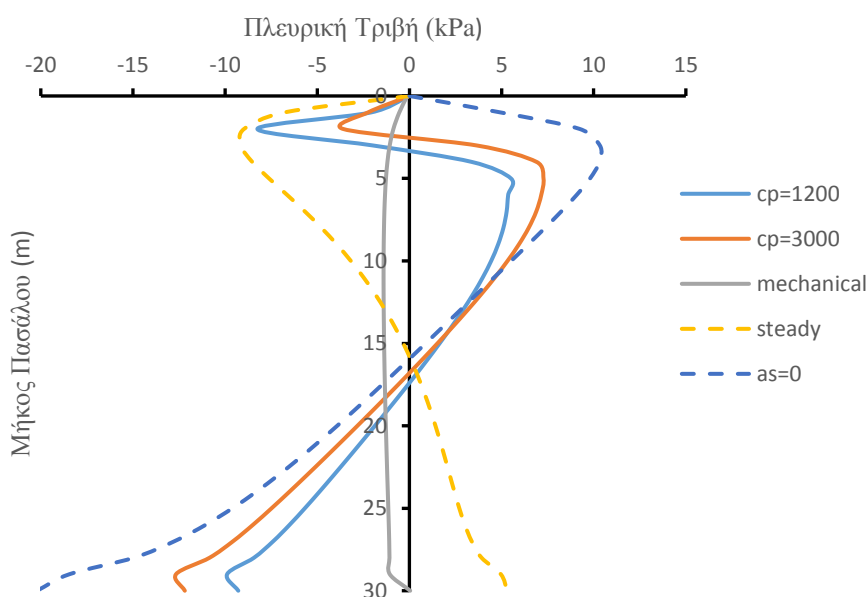
έδαφος, γεγονός που αποδεικνύει την εμφάνιση των εφελκυστικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο εξαιτίας της ψύξης.



Σχήμα 6.5.3.4) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή θέρμανσης $0^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



Σχήμα 6.5.3.5) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή θέρμανσης $0^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

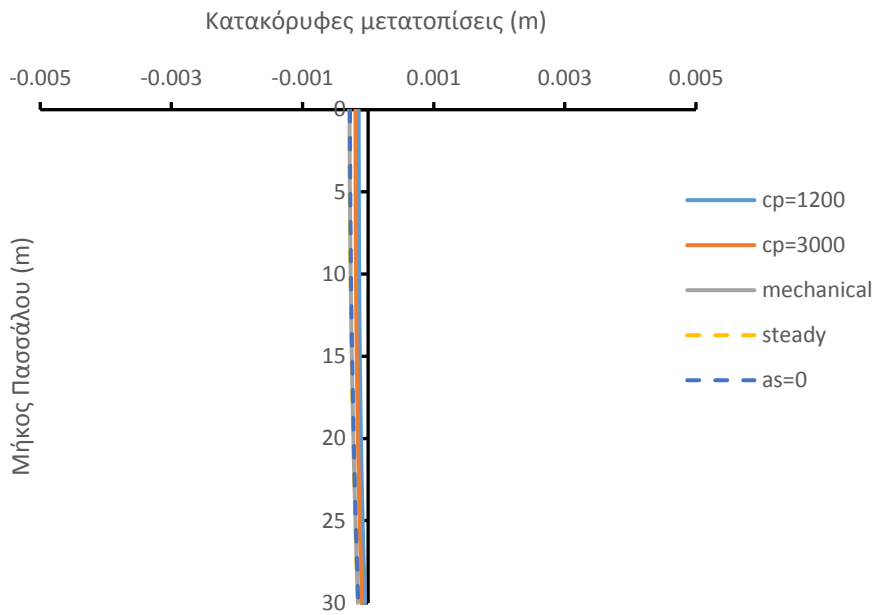


Σχήμα 6.5.3.6) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή θέρμανσης $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ για 6 μήνες.

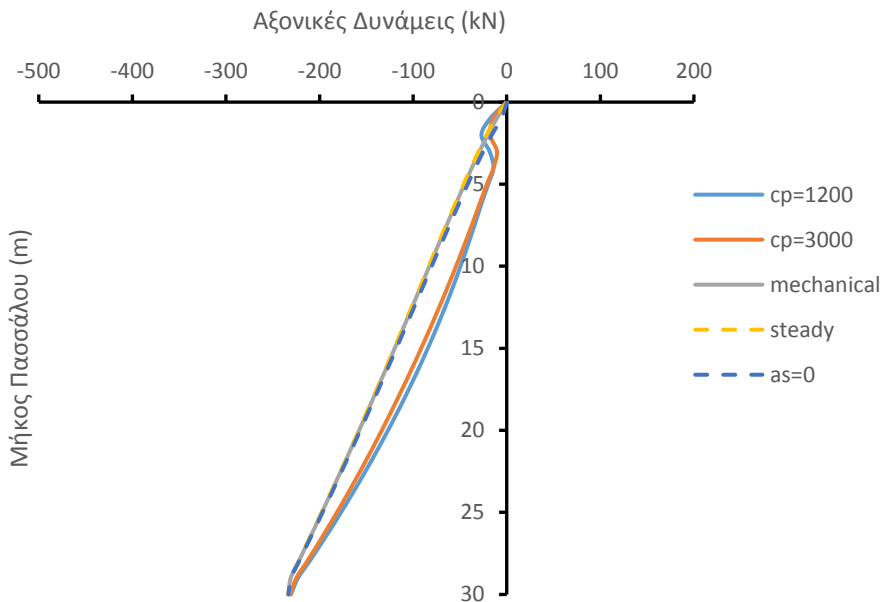
Αρχικά, για την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (βλ. Σχήμα 6.5.3.4) παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης μειώνονται σε μικρό βαθμό οι θετικές μετατοπίσεις με την αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K), γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη διαστολή που παρουσιάζει το έδαφος με την αύξηση του c_p (J/kg/K), με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει σε μικρότερο βαθμό τον πάσσαλο και να ελαττώνει την ανύψωση του. Επιπλέον, για αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) παρατηρείται μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα πάνω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου.

Επιπροσθέτως, για την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης αυξάνονται οι αρνητικές αξονικές δυνάμεις με την αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) του εδάφους (βλ. Σχήμα 6.5.3.5). Ειδικότερα, το έδαφος δέχεται μικρότερο μέγεθος θερμότητας με την αλλαγή θερμοκρασίας (θέρμανση) γεγονός που προκαλεί τη μικρότερη διαστολή του με την αύξηση του c_p (J/kg/K), με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες επιπρόσθετες θλιπτικές αξονικές τάσεις με τη θέρμανση του πασσάλου.

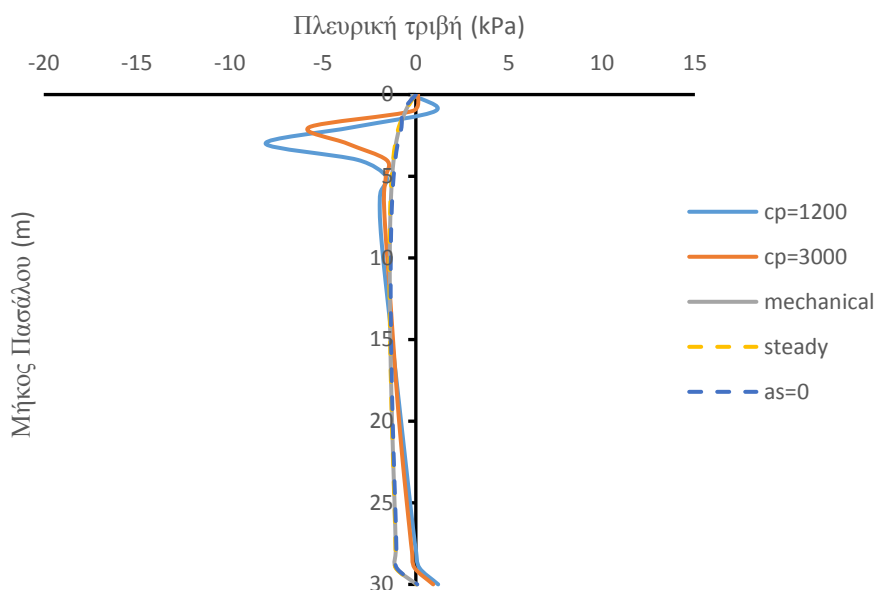
Τέλος, για την επιβολή της θέρμανσης $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (βλ. Σχήμα 6.5.3.6) παρατηρείται ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης αυξάνονται οι θετικές τιμές της πλευρικής τριβής με την αύξηση του συντελεστή c_p (J/kg/K) στο πάνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα μεγεθύνονται οι αρνητικές τιμές της στο κάτω μέρος του λόγω της μικρότερης διαστολής που επιδέχεται το έδαφος γεγονός που αποδεικνύει την εμφάνιση θλιπτικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο.



Σχήμα 6.5.3.7) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή τελικής ψύξης $30\text{ }^\circ\text{C} - 15\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

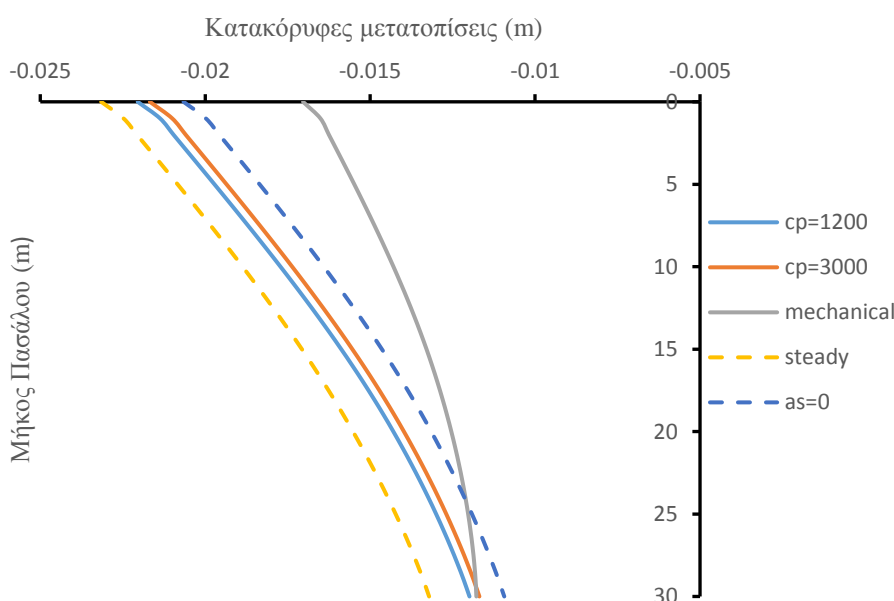


Σχήμα 6.5.3.8) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή τελικής ψύξης $30\text{ }^\circ\text{C} - 15\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

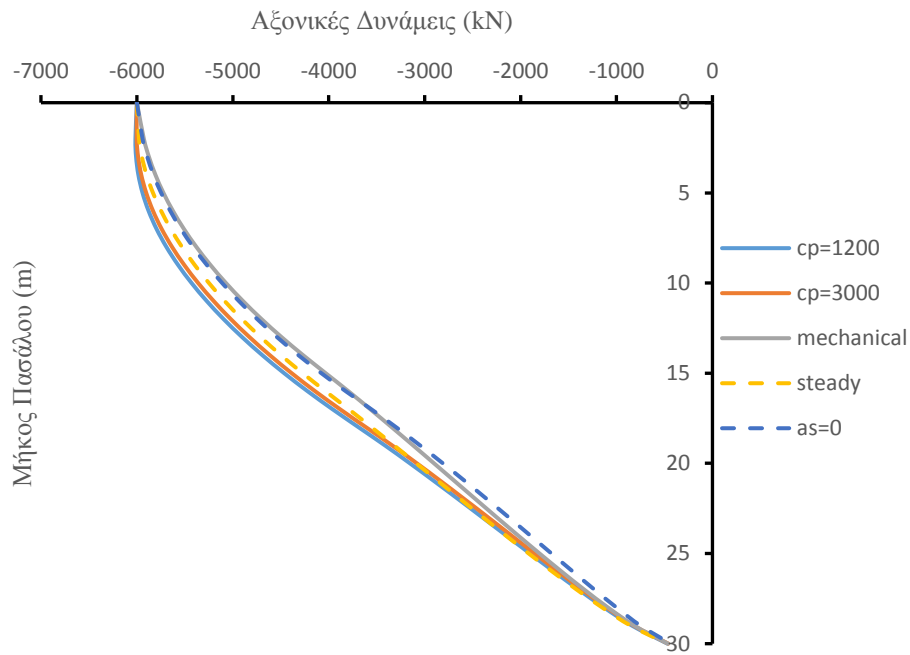


Σχήμα 6.5.3.9) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) χωρίς μηχανική φόρτιση και επιβολή τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C για 6 μήνες.

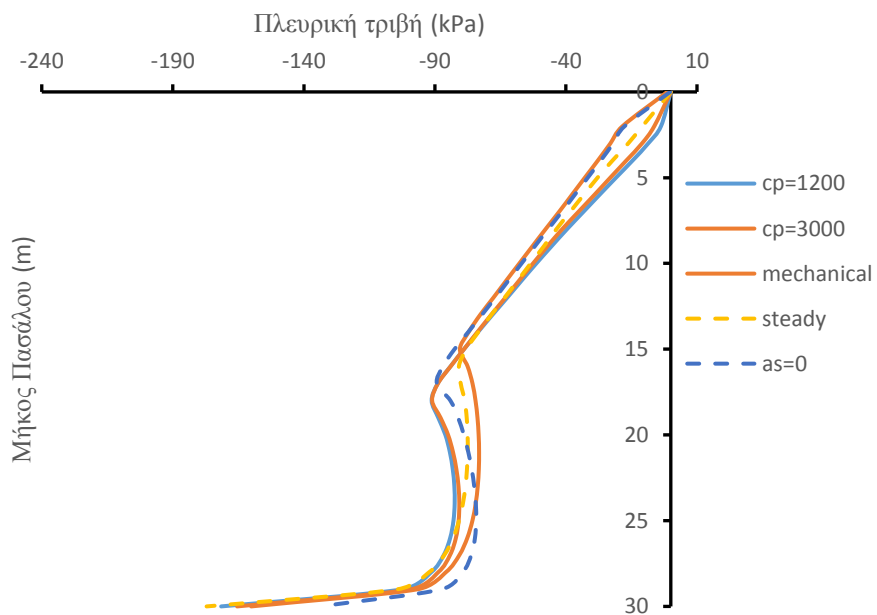
Αναφορικά με την επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C για 6 μήνες και με απουσία μηχανικής φόρτισης όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.5.3.7, 6.5.3.8, 6.5.3.9 παρατηρείται ότι δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τη μεταβολή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) του εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή ειδικής θερμότητας του εδάφους για απουσία μηχανικής φόρτισης δεν επηρεάζει τις τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών κατά την τελική ψύξη του πασσάλου. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα.



Σχήμα 6.5.3.10) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης 15 °C - 0 °C για 6 μήνες.



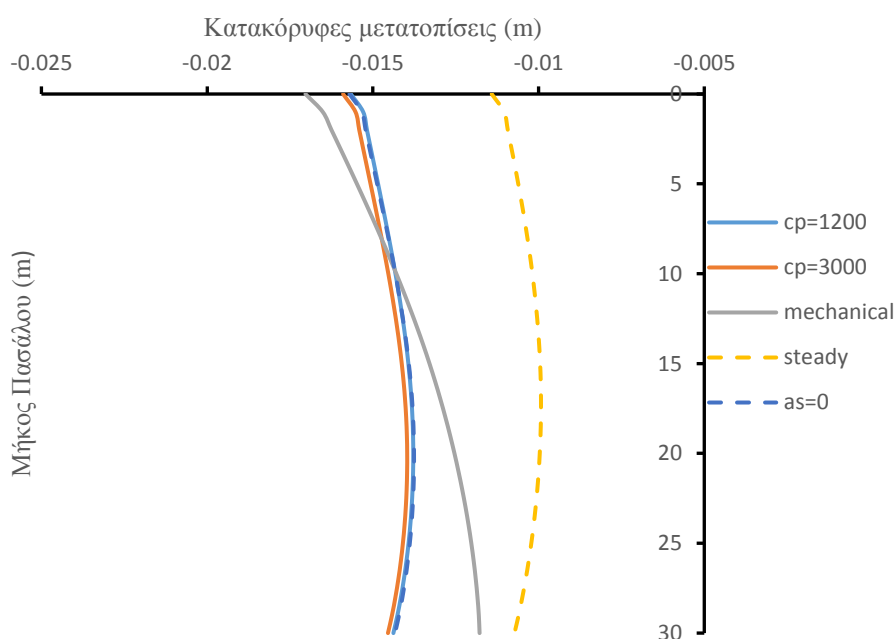
Σχήμα 6.5.3.11) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



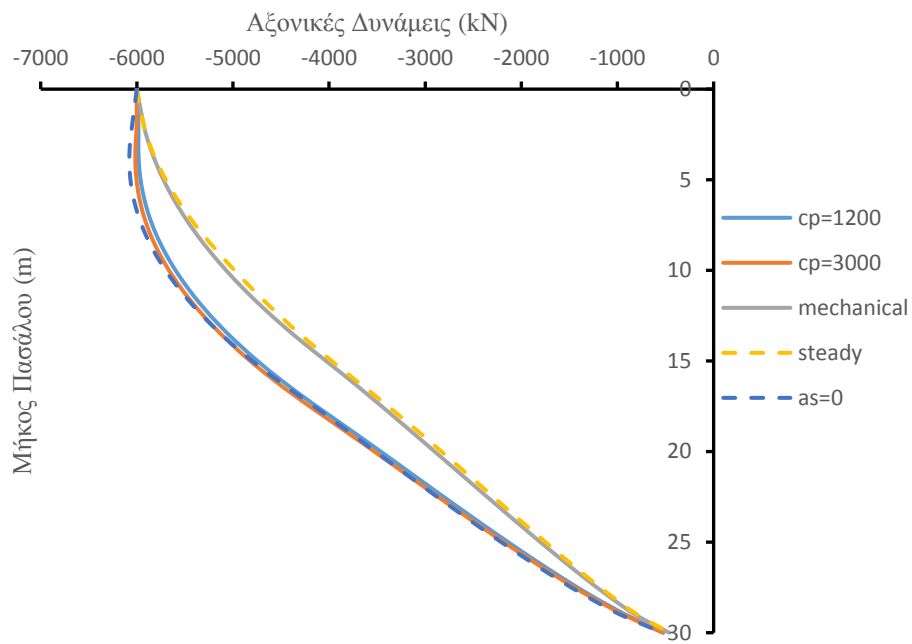
Σχήμα 6.5.3.12) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.

Αρχικά, αναφορικά με το βήμα για μηχανική φόρτιση 6000 kN δε σημειώνονται σημαντικές διαφορές στις αριθμητικές τιμές των καθιζήσεων (βλ. Σχήμα 6.5.3.10) με τη μεταβολή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι με την αύξηση του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) μειώνεται σε ανεπαίσθητο βαθμό η καθίζηση του πασσάλου γιατί το έδαφος δέχεται μικρότερο μέγεθος θερμότητας με την αλλαγή θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να συστέλλεται λιγότερο και να συμπαρασύρει σε μικρότερο βαθμό τον πάσσαλο.

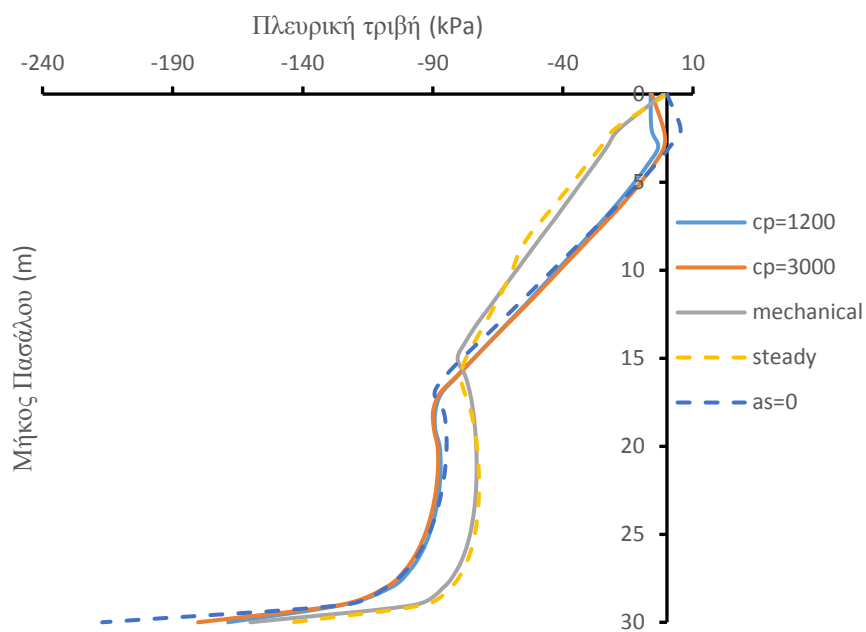
Όσον αφορά τις αριθμητικές τιμές των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή της ψύξης $15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ για 6 μήνες και με επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN για τη μεταβολή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) του εδάφους όπως φαίνεται μέσα από τα Σχήματα 6.5.3.11, 6.5.3.12 δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή ειδικής θερμότητας του εδάφους για το φορτίο λειτουργίας δεν προκαλεί μεταβολές στα παραπάνω εξεταζόμενα μεγέθη με την επιβολή της αρχικής ψύξης.



Σχήμα 6.5.3.13) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της θέρμανσης $0^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ για 6 μήνες.



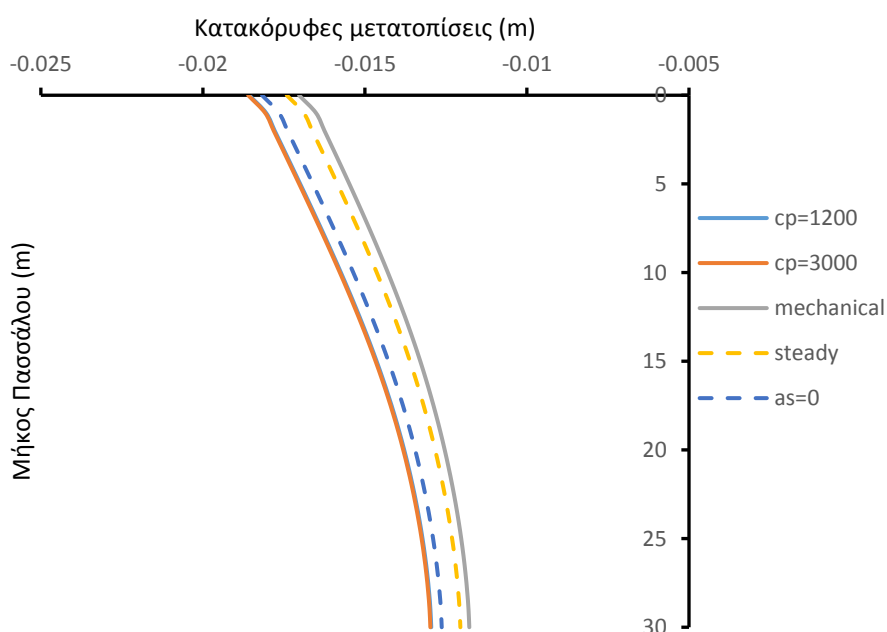
Σχήμα 6.5.3.14) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C για 6 μήνες.



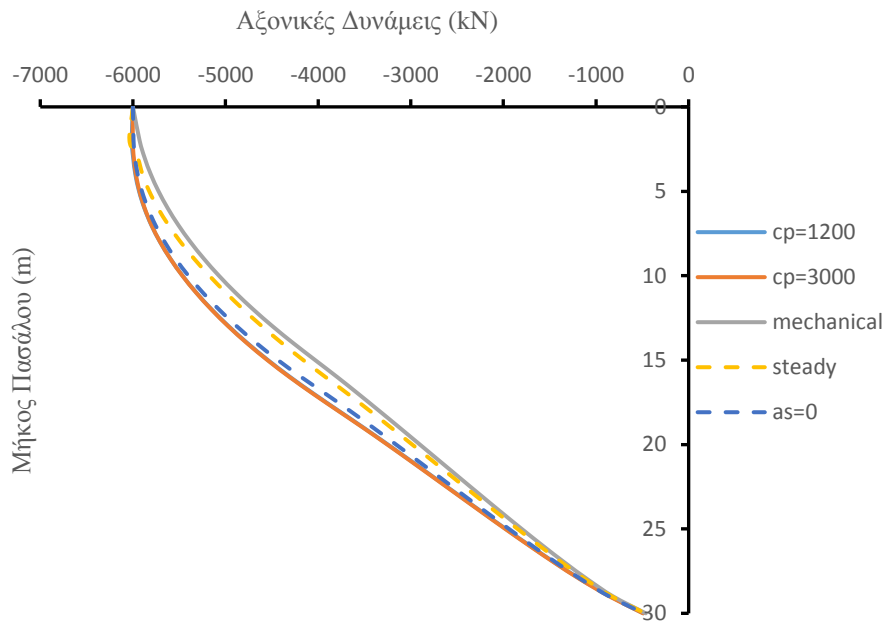
Σχήμα 6.5.3.15) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C για 6 μήνες.

Αναφορικά με το βήμα για μηχανική φόρτιση 6000 kN με τη θέρμανση του πασσάλου δε σημειώνονται σημαντικές διαφορές στις αριθμητικές τιμές των καθιζήσεων (βλ. Σχήμα 6.5.3.13) με τη μεταβολή του συντελεστή ειδικής θέρμανσης (c_p). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι με την αύξηση του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) αυξάνεται σε ανεπαίσθητο βαθμό η καθίζηση του πασσάλου γιατί το έδαφος δέχεται μικρότερο μέγεθος θερμότητας για την αλλαγή θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να διαστέλλεται λιγότερο και να ανυψώνει σε μικρότερο βαθμό τον πάσσαλο.

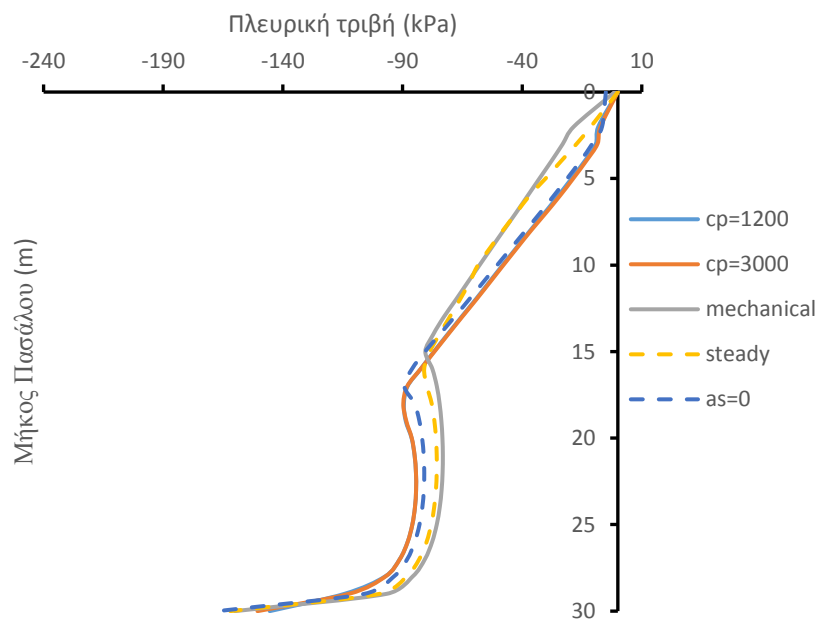
Όσον αφορά τις αριθμητικές τιμές των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή της θέρμανσης 0 °C - 30 °C για 6 μήνες και με επιβολή της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN για τη μεταβολή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) του εδάφους όπως φαίνεται μέσα από τα Σχήματα 6.5.3.14, 6.5.3.15 δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του συντελεστή ειδικής θερμότητας του εδάφους για το φορτίο λειτουργίας δεν προκαλεί μεταβολές στα παραπάνω εξεταζόμενα μεγέθη με την επιβολή της θέρμανσης.



Σχήμα 6.5.3.16) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.5.3.17) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.5.3.18) Κατανομή πλευρικής τριβής για τα εξεταζόμενα c_p (J/kg/K) με επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C - 15 °C για 6 μήνες.

Αναφορικά με την επιβολή της τελικής ψύξης 30 °C -15 °C για 6 μήνες όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.5.3.16, 6.5.3.17, 6.5.3.18 παρατηρείται ότι για τη μηχανική φόρτιση των 6000 kN δε σημειώνονται αξιοσημείωτες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τη μεταβολή του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) του εδάφους. Το

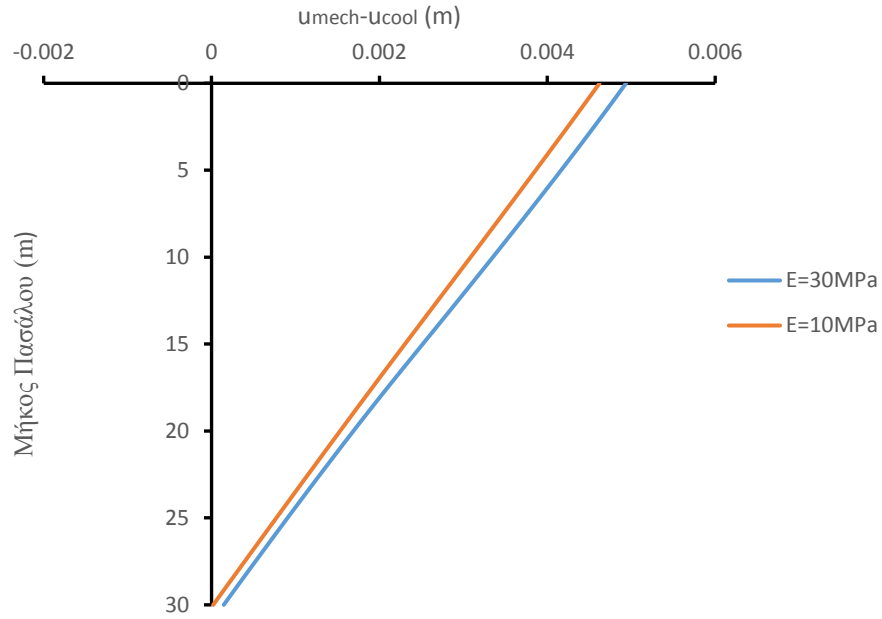
γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή συντελεστή ειδικής θερμότητας του εδάφους για το φορτίο λειτουργίας δεν προκαλεί μεταβολές στα εξεταζόμενα μεγέθη με την επιβολή της τελικής ψύξης.

6.6) Η επιρροή της μεταβολής των μηχανικών παραμέτρων του εδάφους

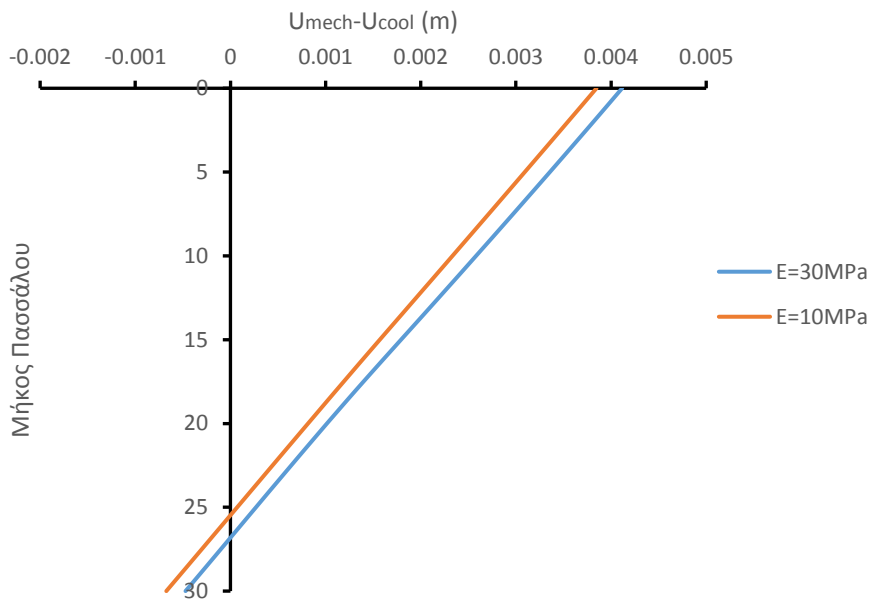
Πραγματοποιήθηκαν τρεις αναλύσεις για λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$, συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 2,5(\text{W/m/K})$, συντελεστή ειδικής θερμότητας για $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$ με παρουσία φόρτισης 6000 kN, με τις οποίες μελετήθηκε η επιρροή της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή θερμικών φορτίσεων. Τα τρία μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους που εξετάστηκαν είναι το μέτρο ελαστικότητας $E(\text{MPa})$, η γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi(^{\circ})$ και ο λόγος Poisson (ν). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τα πρώτα δύο βήματα του κύκλου θερμικής φόρτισης δηλαδή, για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C και θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C με το χρονικό διάστημα της θερμικής φόρτισης να ισούται με 6 μήνες.

6.6.1 Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας (E) του εδάφους

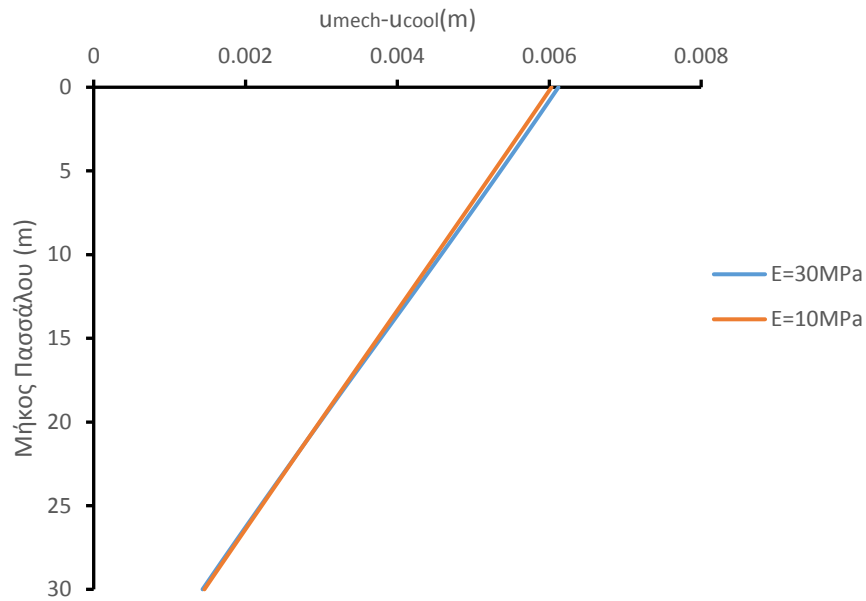
Διεξάχθηκε ανάλυση για μέτρο ελαστικότητας $E = 10\text{MPa}$ στο έδαφος με σκοπό να συγκριθούν οι διαφορές που προκύπτουν στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή θερμικών φορτίσεων με την αρχική ανάλυση του Κεφαλαίου 6.1. όπου το μέτρο ελαστικότητας ισούταν με 30MPa. Το μέτρο ελαστικότητας καθορίζει την δυσκαμψία του εδάφους και όσο μεγθύνεται η τιμή του τόσο αυξάνεται και η δυσκαμψία του. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε με τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας προκάλεσε μεγάλη αύξηση στις μηχανικές καθιζήσεις όπου στην κεφαλή του πασσάλου για $E = 10\text{MPa}$ παρουσιάστηκε μέγιστη καθίζηση ίση με $u = 0,0406\text{m}$ ενώ για $E = 30\text{MPa}$ δημιουργήθηκε μέγιστη καθίζηση $u = 0,017\text{m}$. Επιπλέον στις τιμές των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής που προέκυψαν από τη μηχανική φόρτιση δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στις τιμές με την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους. Τα διαγράμματα που θα παρατεθούν συγκρίνουν τη διαφορά των μηχανικών κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τις αντίστοιχες κατακόρυφες μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και την πλευρικής τριβής που προκύπτει με την επιβολή της θερμικής φόρτισης από τα 2 διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας κατά μήκος του πασσάλου, με στόχο την εκδήλωση της επιρροής του μέτρου ελαστικότητας στη συμπεριφορά των θερμικών φορτίσεων.



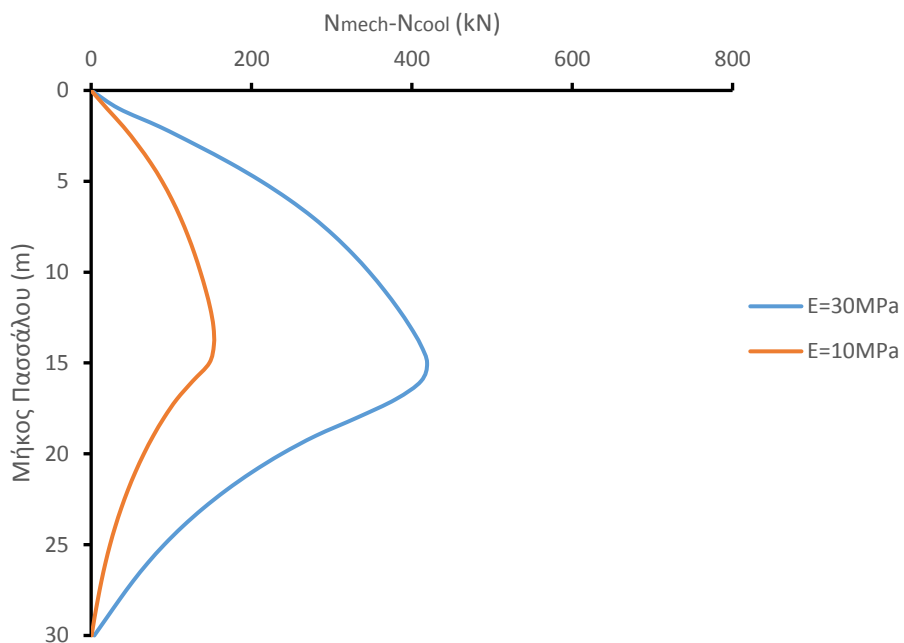
Σχήμα 6.6.1.1) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}} - u_{\text{cool}}$) για τα διαφορετικά E (MPa) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 6 μηνών.



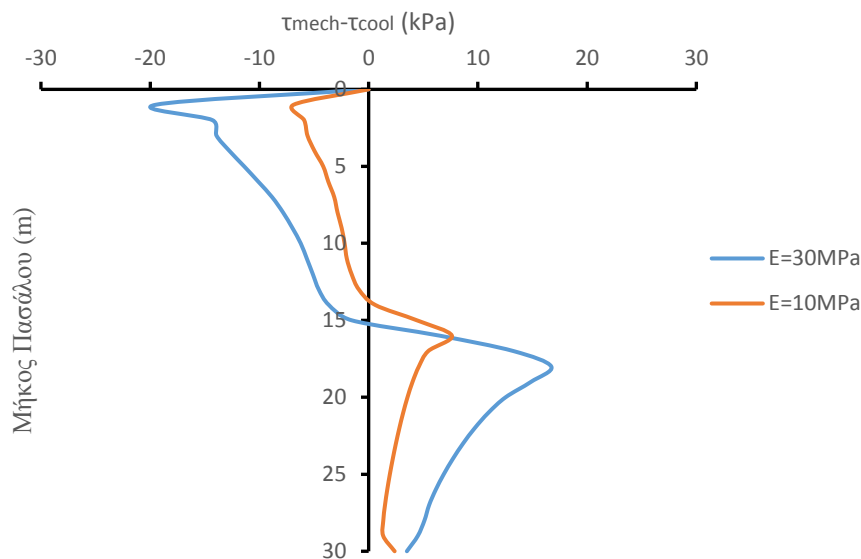
Σχήμα 6.6.1.2) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}} - u_{\text{cool}}$) για τα διαφορετικά E (MPa) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για μόνιμη χρονική ροή (steady state).



Σχήμα 6.6.1.3) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{mech} - u_{cool}$) για τα διαφορετικά E (MPa) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 1 ημέρας.



Σχήμα 6.6.1.4) Κατανομή διαφοράς αξονικών δυνάμεων ($N_{mech} - N_{cool}$) για τα διαφορετικά E (MPa) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 6 μηνών.

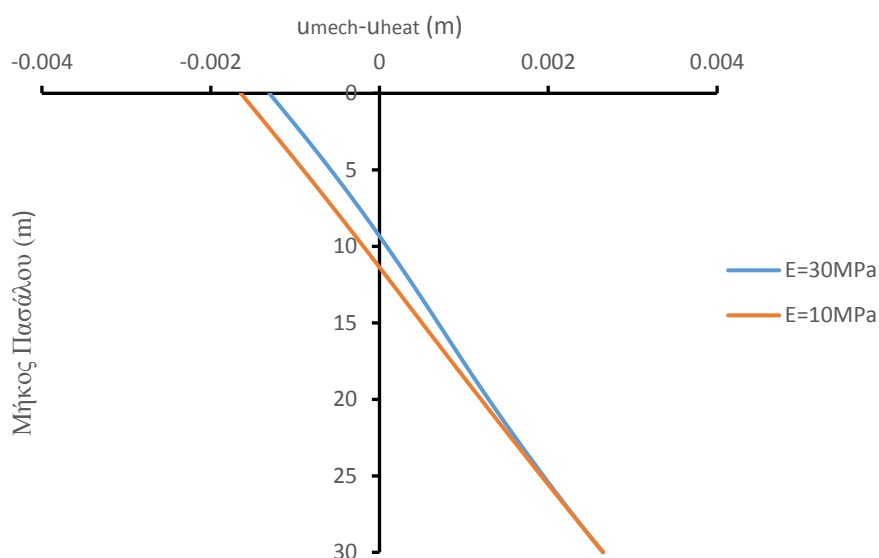


Σχήμα 6.6.1.5) Κατανομή διαφοράς της πλευρικής τριβής ($\tau_{\text{mech}} - \tau_{\text{cool}}$) για τα διαφορετικά E (MPa) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάρκεια 6 μηνών.

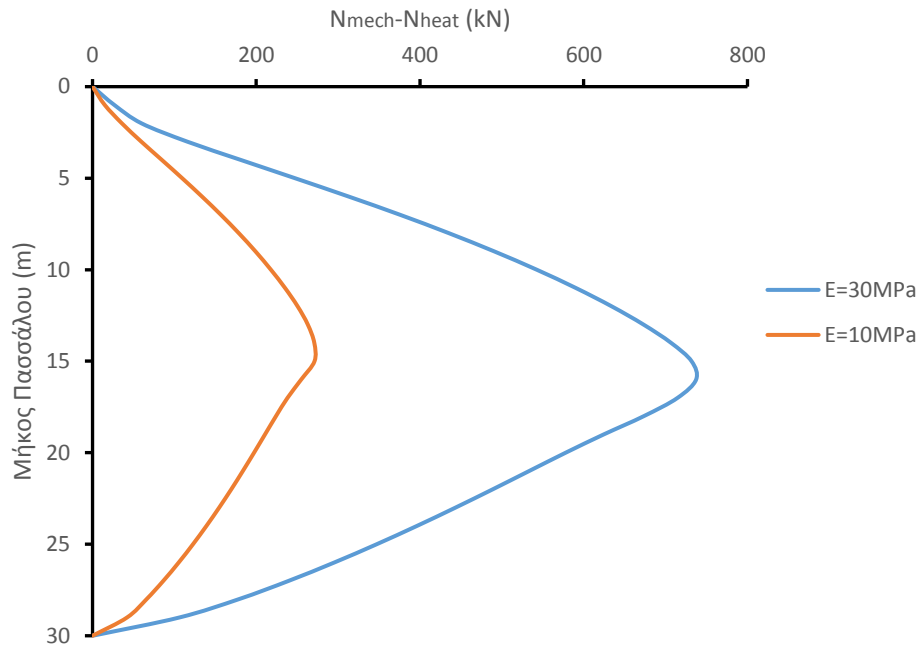
Βάσει του Σχήματος 6.6.1.1, φαίνεται ότι για την επιβολή της ψύξης του πασσάλου από τους 15 °C στους 0°C προκαλείται για $E = 30\text{MPa}$ ανεπαίσθητα μεγαλύτερη αύξηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων σε σχέση με τη μηχανική καθίζηση στην κορυφή του πασσάλου. Η διαφορά που προκαλούν στις κατακόρυφες μετατοπίσεις των θερμικών φορτίσεων τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας συναντάται στην κεφαλή του πασσάλου, ενώ στην αιχμή η επιρροή τους στις καθιζήσεις των θερμικών φορτίσεων ταυτίζεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι ιδιαίζουσα για το λόγο ότι αναμένεται πως με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας θα είναι μικρότερη η συστολή που θα υποστεί το έδαφος λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει λιγότερο τον πάσσαλο και να μην ενισχύει σε μεγάλο βαθμό την καθίζηση του. Ωστόσο, επειδή η διαφορά στη μηχανική καθίζηση των δύο μέτρων ελαστικότητας είναι μεγάλη (περίπου 3 φορές στην κορυφή του πασσάλου όπως προαναφέρθηκε η καθίζηση για $E = 10\text{MPa}$) φαίνεται πως η ψύξη έχει μεγαλύτερη επιρροή στα 30MPa εκεί που η καθίζηση είναι εμφανώς μικρότερη. Για την επαλήθευση αυτής της ιδιόμορφης κατανομής της διαφοράς των κατακόρυφων μετατοπίσεων διεξάχθηκαν δύο περαιτέρω αναλύσεις για χρονικά διαστήματα μόνιμης θερμικής ροής (steady state) και 1 ημέρας (transient state), τα διαγράμματα των οποίων παρατίθενται παραπάνω (βλ. Σχήμα 6.6.1.2 και Σχήμα 6.6.1.3 αντίστοιχα) Μέσω αυτών των διαγραμμάτων παρατηρήθηκε ότι για χρονικό διάστημα θερμικής φόρτισης 1 ημέρας παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με τα προαναφερθέντα στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου ($z = 0 - 26.5\text{m}$) πλην της αιχμής που εμφανίζονται τα αντίστροφα αποτελέσματα, ενώ για μόνιμη χρονική διάρκεια θερμικής φόρτισης η επιρροή είναι παρόμοια για δύο διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι η αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας δεν καθορίζει τη μεταβολή των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά την ψύξη του πασσάλου.

Μέσα από το Σχήμα 6.6.1.2, παρατηρείται ότι όταν το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ισούται με 30MPa η επιβολή των θερμικών φορτίσεων επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις αξονικές δυνάμεις. Πιο συγκεκριμένα, για ανάλυση με $E = 30\text{MPa}$ μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, οι αξονικές δυνάμεις αυξάνονται περίπου κατά τρεις φορές περισσότερο υπό την επιβολή της ψύξης σε σύγκριση με την περίπτωση που $E = 10\text{MPa}$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία του εδάφους με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, με αποτέλεσμα τη μικρότερη συστολή του και τη δημιουργία επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων κατά την ψύξη, οι οποίες συνεισφέρουν στην αύξηση του αξονικού φορτίου. Σύμφωνα με την έρευνα των Bodas Freitas et al. (2013) με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μεγεθύνεται η διαφορά που προκαλείται στις αξονικές τάσεις λόγω της θερμικής φόρτισης, με αποτέλεσμα ένα έδαφος με μεγάλη ακαμψία μέσω της αλληλεπίδρασης του στη διεπιφάνεια να συνεισφέρει στην εμφάνιση μεγαλύτερων αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου.

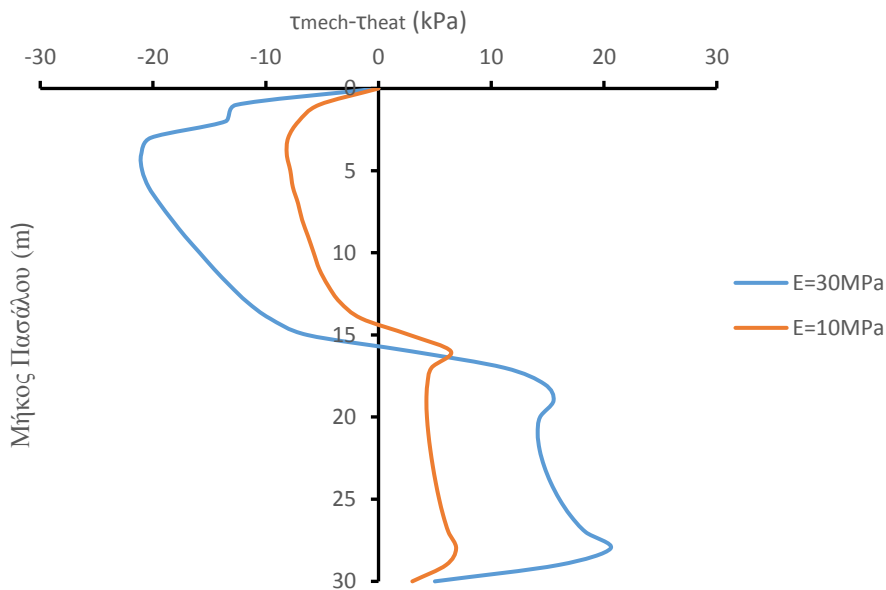
Βάσει του Σχήματος 6.6.1.3 μπορεί κανείς να διακρίνει ότι όταν το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ισούται με 30MPa η επιβολή των θερμικών φορτίσεων (θέρμανση, ψύξη) επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις διατμητικές τάσεις. Πιο συγκεκριμένα, για ανάλυση με $E = 30\text{MPa}$ μέτρο ελαστικότητας του εδάφους υπό την επιβολής της ψύξης, στο πάνω μέρος του πασσάλου ελαττώνεται η πλευρική τριβή και αντίστροφα στο κάτω μέρος αυξάνεται περισσότερο υπό την επιβολή των θερμικών φορτίσεων σε σύγκριση με την περίπτωση που $E = 10\text{MPa}$. Σύμφωνα με την έρευνα των Bodas Freitas et al. (2013) με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μεγεθύνεται η διαφορά που προκαλείται στην τιμή των διατμητικών τάσεων της διεπιφάνειας λόγω της θερμικής φόρτισης, με αποτέλεσμα ένα έδαφος με μεγάλη ακαμψία μέσω της αλληλεπίδρασης του στη διεπιφάνεια να συνεισφέρει στην εμφάνιση μεγαλύτερων διατμητικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου.



Σχήμα 6.6.1.6) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}}-u_{\text{heat}}$) για τα διαφορετικά $E(\text{MPa})$ με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.6.1.7) Κατανομή διαφοράς αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{mech}}-N_{\text{heat}}$) για τα διαφορετικά $E(\text{MPa})$ με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.6.1.8) Κατανομή διαφοράς πλευρικής τριβής ($\tau_{\text{mech}}-\tau_{\text{heat}}$) για τα διαφορετικά $E(\text{MPa})$ με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C για 6 μήνες.

Μέσα από το Σχήμα 6.6.1.6 φαίνεται ότι για τη θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30°C προκαλείται για $E = 30\text{MPa}$ σχετικά μικρότερη επιρροή στις κατακόρυφες μετατοπίσεις στο άνω μέρος του πασσάλου ($z < 10\text{m}$) και ελαφρώς μικρότερη ως παραπλήσια στο υπόλοιπο μήκος του. Η διαφορά που προκαλούν στις κατακόρυφες μετατοπίσεις της θέρμανσης του πασσάλου τα διαφορετικά μέτρα

ελαστικότητας του εδάφους συναντώνται στην κεφαλή του πασσάλου, ενώ στην αιχμή η επιρροή τους στις κατακόρυφες μετατοπίσεις των θερμικών φορτίσεων ταυτίζεται. Γενικότερα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την ψύξη, έτσι και για τη θέρμανση, η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους δεν επηρεάζει την τιμή των κατακόρυφων μετατοπίσεων.

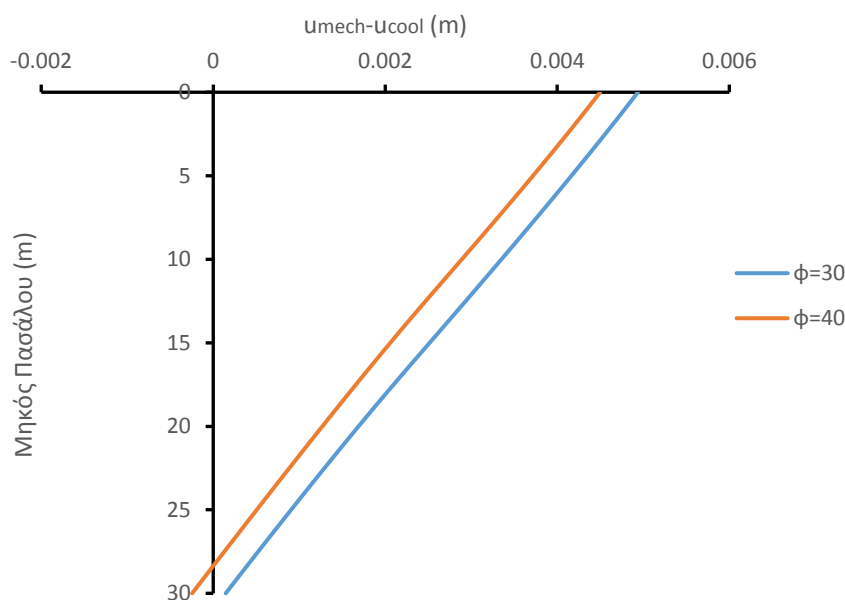
Βάσει του Σχήματος 6.6.1.7 παρατηρείται ότι όταν το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ισούται με 30MPa η επιβολή των θερμικών φορτίσεων επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις αξονικές δυνάμεις. Πιο συγκεκριμένα, για ανάλυση με $E = 30\text{MPa}$ μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, οι αξονικές δυνάμεις αυξάνονται περίπου κατά τρεις φορές περισσότερο υπό την επιβολή θέρμανσης σε σύγκριση με την περίπτωση που $E = 10\text{MPa}$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία του εδάφους με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με αποτέλεσμα τη μικρότερη διαστολή του και τη δημιουργία επιπρόσθετων θλιπτικών αξονικών τάσεων κατά τη θέρμανση, οι οποίες συνεισφέρουν στην αύξηση του αξονικού φορτίου. Σύμφωνα με την έρευνα των Bodas Freitas et al. (2013), όπως προαναφέρθηκε, με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μεγεθύνεται η διαφορά που προκαλείται στις αξονικές τάσεις λόγω της θερμικής φόρτισης με αποτέλεσμα ένα έδαφος με μεγάλη ακαμψία μέσω της αλληλεπίδρασης του στη διεπιφάνεια να συνεισφέρει στην εμφάνιση μεγαλύτερων αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου.

Τέλος, από το Σχήμα 6.6.1.8 παρατηρείται ότι όταν το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ισούται με 30MPa η επιβολή των θερμικών φορτίσεων (θέρμανση, ψύξη) επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την πλευρική τριβή. Πιο συγκεκριμένα για ανάλυση με $E = 30\text{MPa}$ μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, στο πάνω μέρος του πασσάλου ελαττώνονται περισσότερο οι τιμές της πλευρικής τριβής και αντίστροφα στο κάτω μέρος αυξάνονται περισσότερο υπό την παρουσία θέρμανσης σε σύγκριση με την περίπτωση που $E = 10\text{MPa}$. Σύμφωνα με την έρευνα των Bodas Freitas et al. (2013), όπως αναγράφεται παραπάνω, με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μεγεθύνεται η διαφορά που προκαλείται στις τιμές της πλευρικής τριβής της διεπιφάνειας λόγω της θερμικής φόρτισης, με αποτέλεσμα ένα έδαφος με μεγάλη ακαμψία μέσω της αλληλεπίδρασης του στη διεπιφάνεια να συνεισφέρει στην εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου.

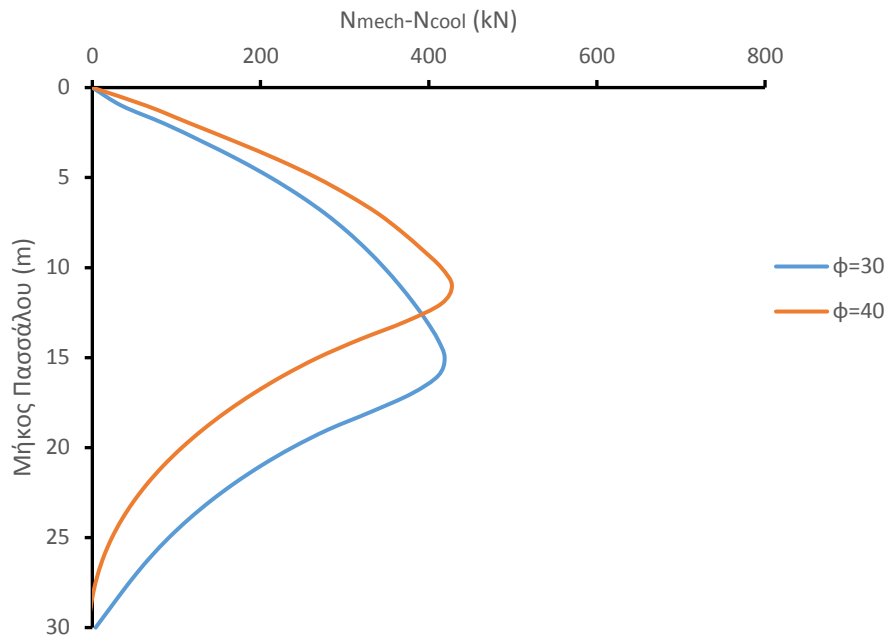
6.6.2) *Επιρροή της γωνίας διατμητικής αντοχής (φ) του εδάφους*

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση για γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi = 40^\circ$ στο έδαφος με σκοπό να συγκριθούν οι διαφορές που προκύπτουν στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή θερμικών φορτίσεων με την αρχική ανάλυση του Κεφαλαίου 6.1 όπου η γωνία διατμητικής αντοχής ισούταν με $\varphi = 30^\circ$. Η γωνία διατμητικής αντοχής φ επηρεάζει το μέγεθος της τριβής που δημιουργείται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου για $\varphi = 40^\circ$. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε με τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν ότι η αύξηση της

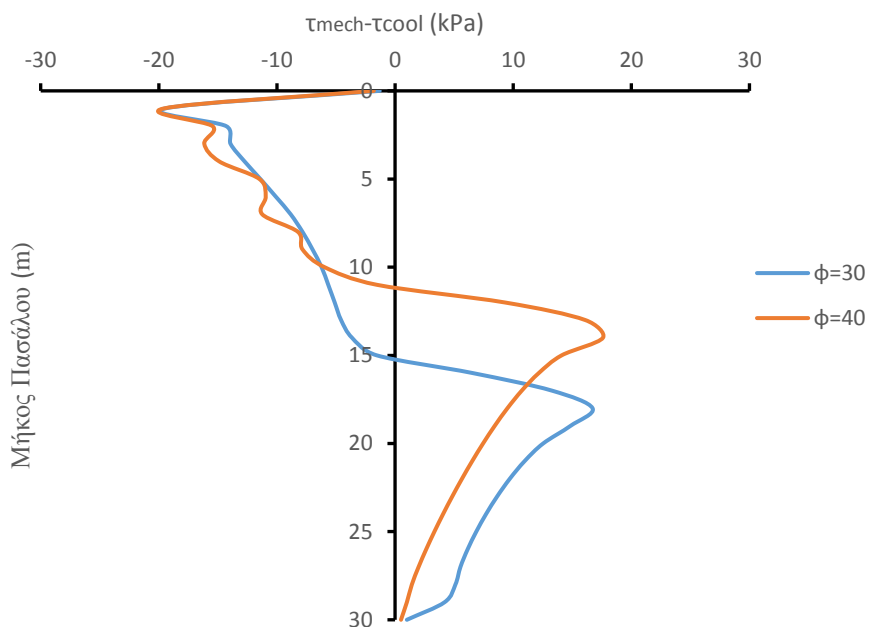
γωνία διατμητικής αντοχής προκάλεσε μικρή μείωση στις μηχανικές καθιζήσεις, όπου στην κεφαλή του πασσάλου για $\phi = 40^\circ$ παρουσιάστηκε καθίζηση ίση με $u = 0,0158\text{m}$ ενώ για $\phi = 30^\circ$ δημιουργήθηκε καθίζηση $u = 0,017\text{m}$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη τριβή που δημιουργείται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου για $\phi = 40^\circ$, με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της μετακίνησης του πασσάλου και την ελάττωση της καθίζησης. Επιπλέον, η αλλαγή της γωνίας τριβής του εδάφους μεταβάλλει τις αξονικές δυνάμεις του πασσάλου με παρουσία ίδιας μηχανικής φόρτισης για τις δύο διαφορετικές αναλύσεις, λόγω της μεγαλύτερης τριβής που δημιουργείται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου για $\phi = 40^\circ$, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη περισσότερων διατμητικών τάσεων με φορά προς τα πάνω και την ελάττωση των αξονικών δυνάμεων. Επίσης, η μεταβολή της γωνίας τριβής του εδάφους διαφοροποιεί τις διατμητικές τάσεις του πασσάλου υπό την επιβολή μηχανικής φόρτισης, εξαιτίας της μεγαλύτερης τριβής που δημιουργείται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου για $\phi = 40^\circ$, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της διατμητικής αντοχής πιο γρήγορα δηλαδή σε υψηλότερο σημείο στον πάσσαλο. Τα διαγράμματα που θα παρατεθούν συγκρίνουν τη διαφορά των μηχανικών κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τις αντίστοιχες κατακόρυφες μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και την πλευρική τριβή που προκύπτουν με την επιβολή της θερμικής φόρτισης από τους δυο διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής κατά μήκος του πασσάλου, με στόχο την εκδήλωση της επιρροής του μέτρου ελαστικότητας στη συμπεριφορά των θερμικών φορτίσεων.



Σχήμα 6.6.2.1) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}} - u_{\text{cool}}$) για τις διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής (ϕ) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για ψύξη από τους 15°C στους 0°C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.6.2.2) Κατανομή διαφοράς αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{mech}}-N_{\text{cool}}$) για τις διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής (ϕ) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C για 6 μήνες.

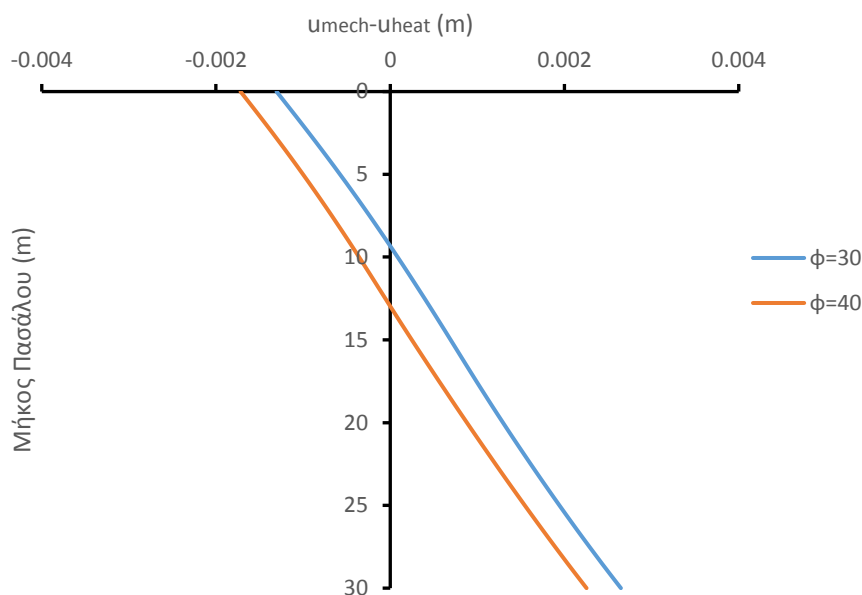


Σχήμα 6.6.2.3) Κατανομή διαφοράς πλευρικής τριβής ($\tau_{\text{mech}}-\tau_{\text{cool}}$) για τις διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής (ϕ) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C για 6 μήνες.

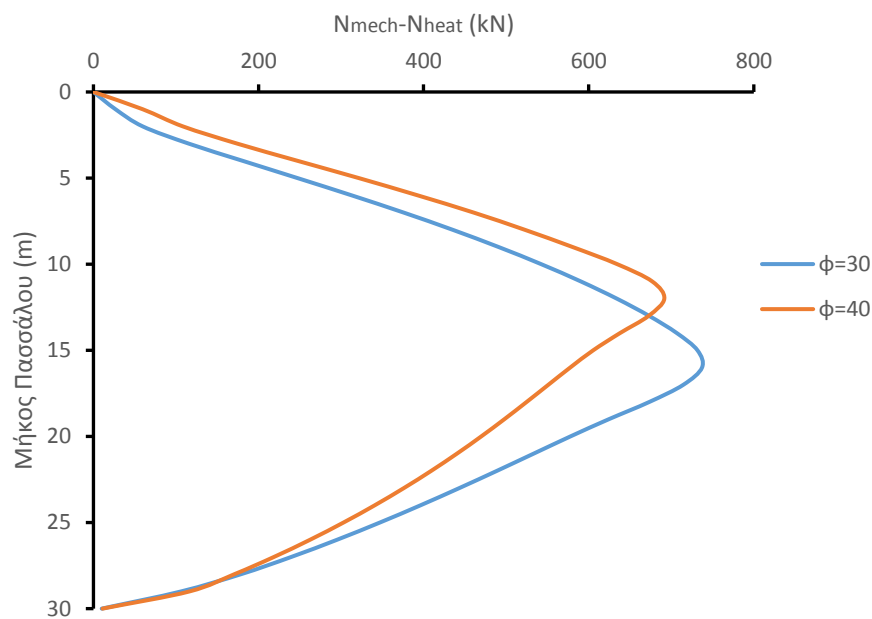
Μέσα από το Σχήμα 6.6.2.1 εξάγεται το συμπέρασμα ότι για την ψύξη η μικρότερη γωνία τριβής (ϕ) του εδάφους προκαλεί μεγαλύτερη επιρροή στις κατακόρυφες μετατοπίσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρότερη τριβή που υφίσταται ο πάσσαλος για $\phi = 30^\circ$ με αποτέλεσμα την αύξηση της ιδιότητας του να συστέλλεται κατά την ψύξη και αντίστοιχα τη μεγέθυνση των καθιζήσεων.

Βάσει του Σχήματος 6.6.2.2, παρατηρείται ότι για γωνία διατμητικής αντοχής $\phi=40^\circ$ του εδάφους προκαλείται μια μετατόπιση προς τα πάνω της μέγιστης διαφοράς μηχανικής αξονικής δύναμης και αξονικής δύναμης δηλαδή του ουδέτερου σημείου (null point), που παράγεται υπό την επίδραση ψύξης, περίπου στα 10 μέτρα του πασσάλου, ενώ για $\phi = 30^\circ$ το σημείο αυτό συναντάται στο κέντρο του πασσάλου στα 15 μέτρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μετατόπιση της διατμητικής αντοχής προς τα πάνω στον πάσσαλο για γωνία διατμητικής αντοχής $\phi = 40^\circ$ (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.6.2.3 των διατμητικών τάσεων) λόγω της μεγαλύτερης τριβής που ασκείται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους.

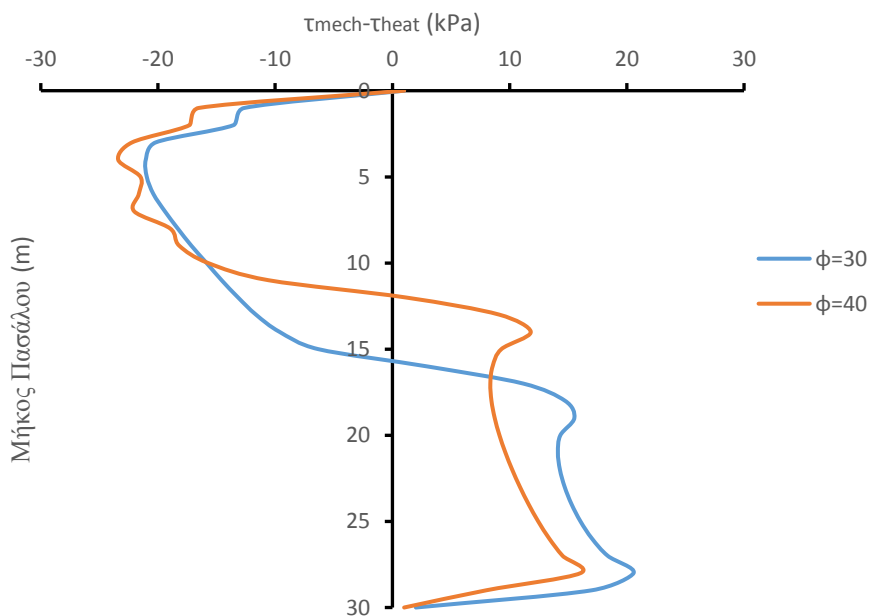
Από το Σχήμα 6.6.2.3 φαίνεται ότι για την ψύξη στο πάνω μέρος του πασσάλου ($z \leq 10\text{m}$) δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στην επιρροή της θερμικής φόρτισης στην πλευρική τριβή με τη μεταβολή της γωνίας διατμητικής αντοχής. Στο υπόλοιπο μέρος του πασσάλου για ($z > 10\text{m}$) προκαλείται για γωνία διατμητικής αντοχής $\phi = 40^\circ$ μια μετατόπιση προς τα πάνω του ουδέτερου σημείου (null point).



Σχήμα 6.6.2.4) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}}-u_{\text{heat}}$) για τις διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής (ϕ) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0°C στους 30°C .



Σχήμα 6.6.2.5) Κατανομή διαφοράς αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{mech}}-N_{\text{heat}}$) για τις διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής (ϕ) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C.



Σχήμα 6.6.2.6) Κατανομή διαφοράς πλευρικής τριβής ($\tau_{\text{mech}}-\tau_{\text{heat}}$) για τις διαφορετικές γωνίες διατμητικής αντοχής (ϕ) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C.

Μέσα από το Σχήμα 6.6.2.4 εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τη θέρμανση η μικρότερη γωνία τριβής (φ) του εδάφους προκαλεί μικρότερη επιρροή στις κατακόρυφες μετατοπίσεις στο άνω μέρος του πασσάλου ($z < 10\text{m}$) και μεγαλύτερη στο υπόλοιπο μήκος του ($z > 10\text{m}$). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρότερη τριβή που υφίσταται ο πάσσαλος για $\varphi = 30^\circ$ με αποτέλεσμα την αύξηση της ιδιότητας του να διαστέλλεται κατά την ψύξη και να μειώνονται οι καθιζήσεις του στην κεφαλή ενώ αντίθετα αυξάνονται στην αιχμή.

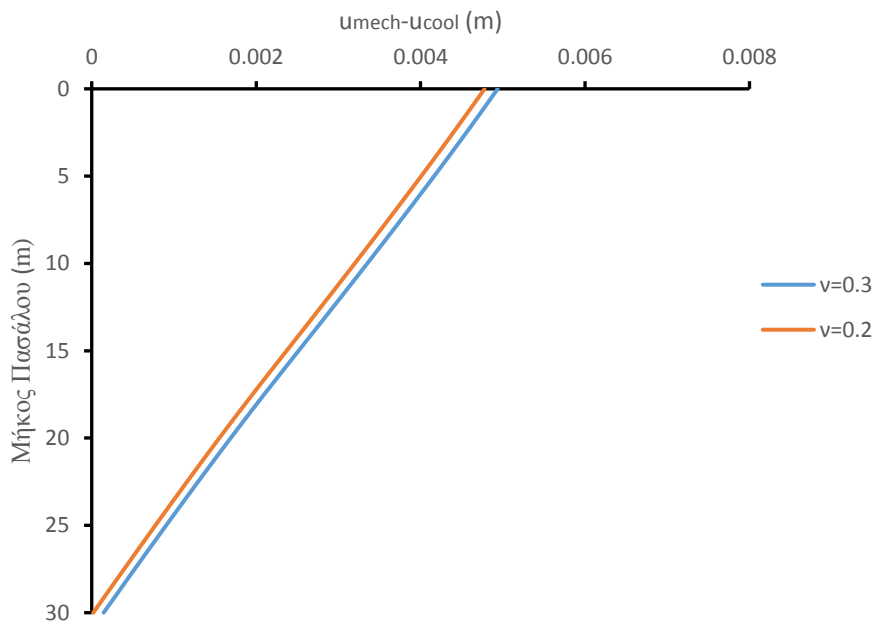
Βάσει του Σχήματος 6.6.2.5 παρατηρείται ότι για γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi=40^\circ$ του εδάφους προκαλείται μια μετατόπιση προς τα πάνω της μέγιστης διαφοράς μηχανικής αξονικής δύναμης και αξονικής δύναμης δηλαδή του ουδέτερου σημείου (null point), που παράγεται υπό την παρουσία θέρμανσης, περίπου στα 10 μέτρα του πασσάλου, ενώ για $\varphi = 30^\circ$ το σημείο αυτό συναντάται στο κέντρο του πασσάλου στα 15 μέτρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μετατόπιση της διατμητικής αντοχής προς τα πάνω στον πάσσαλο για γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi = 40^\circ$ (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.6.2.6) λόγω της μεγαλύτερης τριβής που ασκείται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους.

Από το Σχήμα 6.6.2.6 φαίνεται ότι για τη θέρμανση, στο πάνω μέρος του πασσάλου ($z \leq 10\text{m}$) δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στην επιρροή της θερμικής φόρτισης στην πλευρική τριβή με τη μεταβολή της γωνίας διατμητικής αντοχής. Στο υπόλοιπο μέρος του πασσάλου για ($z > 10\text{m}$) προκαλείται για γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi = 40^\circ$ μια μετατόπιση προς τα πάνω του ουδέτερου σημείου (null point).

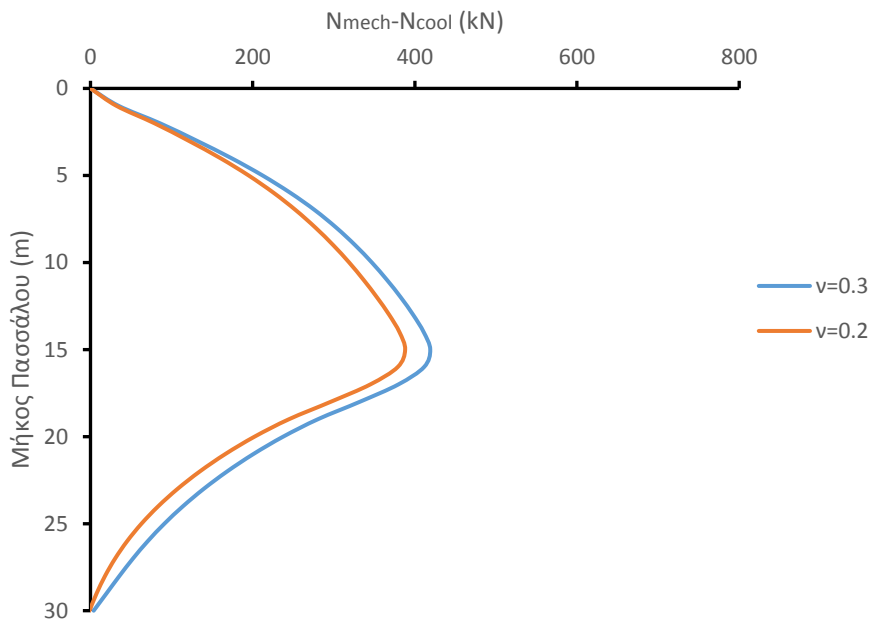
6.6.3) Επιρροή του λόγου Poisson ν του εδάφους

Διεξήχθηκε ανάλυση για μέτρο Poisson $\nu = 0,2$ στο έδαφος με σκοπό να συγκριθούν οι διαφορές που προκύπτουν στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με την επιβολή θερμικών φορτίσεων με την αρχική ανάλυση του Κεφαλαίου 6.1 όπου ο λόγος Poisson ισούταν με 0,3. Ο λόγος Poisson περιγράφει την οριζόντια παραμόρφωση που θα δεχθεί το έδαφος διά την κατακόρυφη παραμόρφωση που θα προκύψει λόγω ενός εφελκυστικού ή θλιπτικού κατακόρυφου φορτίου, στο αξονοσυμμετρικό πρόβλημα 2 συντεταγμένων με το οποίο προσομοιώθηκε το πρόβλημα του ενεργειακού πασσάλου. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε με τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν ότι η μείωση του λόγου Poisson προκάλεσε ανεπαίσθητη ελάττωση στις μηχανικές καθιζήσεις όπου στην κεφαλή του πασσάλου για $\nu = 0,2$ με το φορτίο λειτουργίας εμφανίστηκε μέγιστη καθίζηση ίση με $u = 0,016\text{m}$ ενώ για $\nu = 0,3$ δημιουργήθηκε μέγιστη καθίζηση $u = 0,017\text{m}$. Επιπλέον, για τις τιμές των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής που προέκυψαν από τη μηχανική φόρτιση δεν προκλήθηκε σημαντική διαφορά με την αλλαγή του λόγου Poisson. Τα διαγράμματα που θα παρατεθούν συγκρίνουν τη διαφορά των μηχανικών κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής με τις αντίστοιχες κατακόρυφες μετατοπίσεις, αξονικές δυνάμεις και την πλευρική τριβή που προκύπτουν με την επιβολή της θερμικής φόρτισης από τους 2 διαφορετικούς λόγους

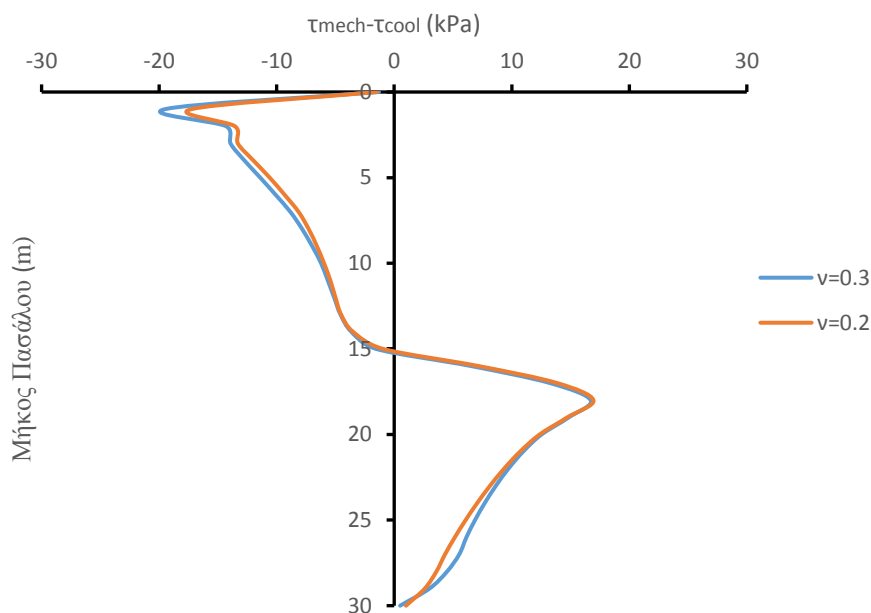
Poisson κατά μήκος του πασσάλου, με στόχο την εκδήλωση της επιρροής του (ν) στη συμπεριφορά των θερμικών φορτίσεων.



Σχήμα 6.6.3.1) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}}-u_{\text{cool}}$) για τους διαφορετικούς λόγους Poisson ν με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.6.3.2) Κατανομή διαφοράς αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{mech}}-N_{\text{cool}}$) για τους διαφορετικούς λόγους Poisson ν με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C για 6 μήνες.

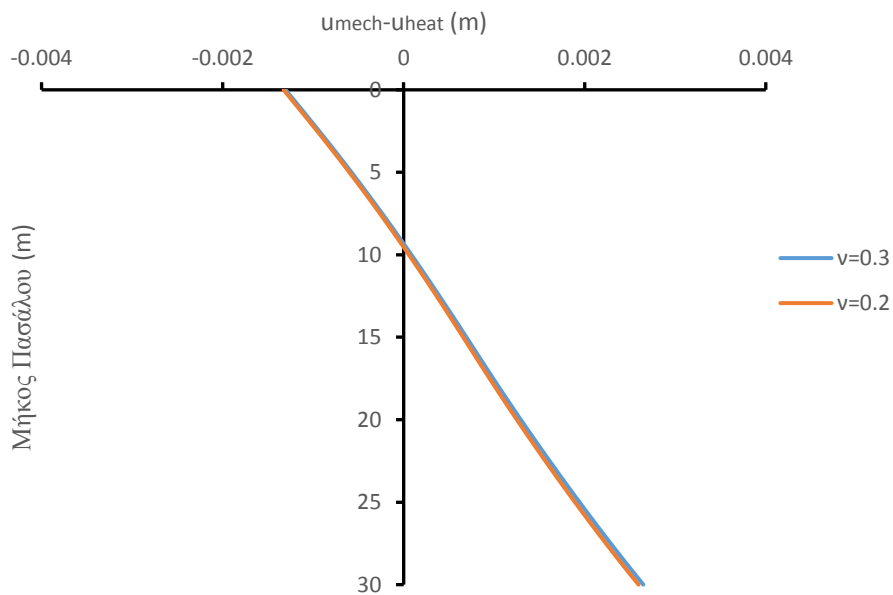


Σχήμα 6.6.3.3) Κατανομή διαφοράς πλευρικής τριβής ($\tau_{\text{mech}} - \tau_{\text{cool}}$) για τους διαφορετικούς λόγους Poisson ν με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για ψύξη από τους 15 °C στους 0 °C για 6 μήνες.

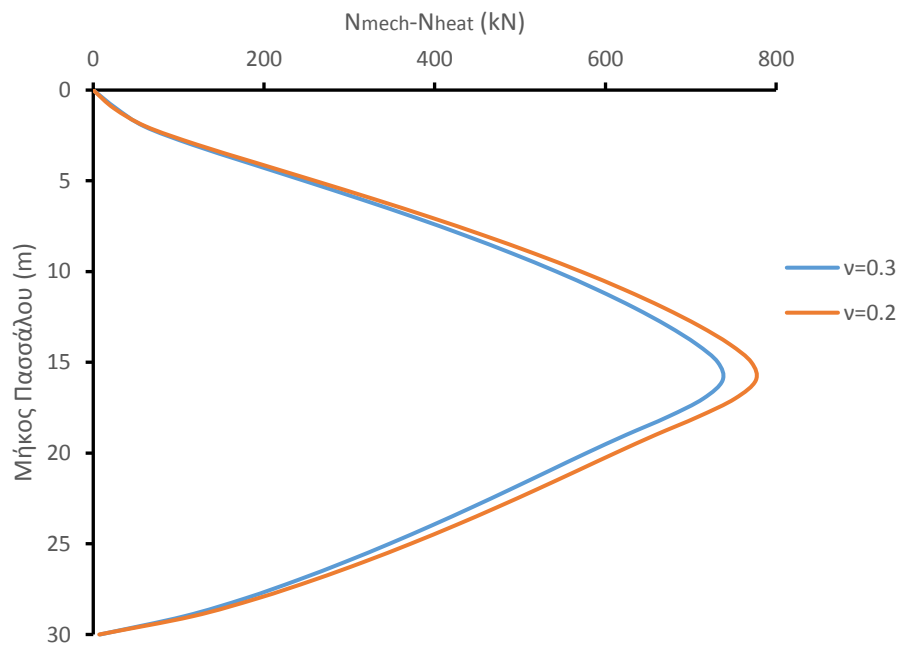
Μέσα από το Σχήμα 6.6.3.1 εξάγεται το συμπέρασμα ότι για την ψύξη, η μεταβολή του λόγου Poisson ν δεν έχει σημαντική επιρροή στην τιμή των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Ειδικότερα, ο μεγαλύτερος λόγος Poisson (ν) του εδάφους προκαλεί ανεπαίσθητα μεγαλύτερη επιρροή στις κατακόρυφες μετατοπίσεις. Η ιδιάζουσα αυτή συμπεριφορά είναι παραπλήσια όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στο Κεφάλαιο 6.6.1 για το διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, αφού και τα δύο μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζουν τη δυσκαμψία του εδάφους. Συμπερασματικά, ο λόγος Poisson ν δεν επηρεάζει την τιμή των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά την ψύξη του πασσάλου.

Επιπλέον, βάσει του Σχήματος 6.6.3.2 παρατηρείται ότι για λόγο Poisson $\nu = 0,3$ προκαλείται ελαφρώς μεγαλύτερη επιρροή στην τιμή των αξονικών δυνάμεων από ότι για $\nu = 0,2$. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη συστολή που τείνει να αναπτύξει ο πάσσαλος κατά την ψύξη του με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ν να αποτελεί μεγαλύτερο κριτήριο δυσκαμψίας για αυτή τη μεταβολή μήκους του εδάφους γεγονός που αυξάνει σε μικρό βαθμό την εμφάνιση θλιπτικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων αξονικών δυνάμεων.

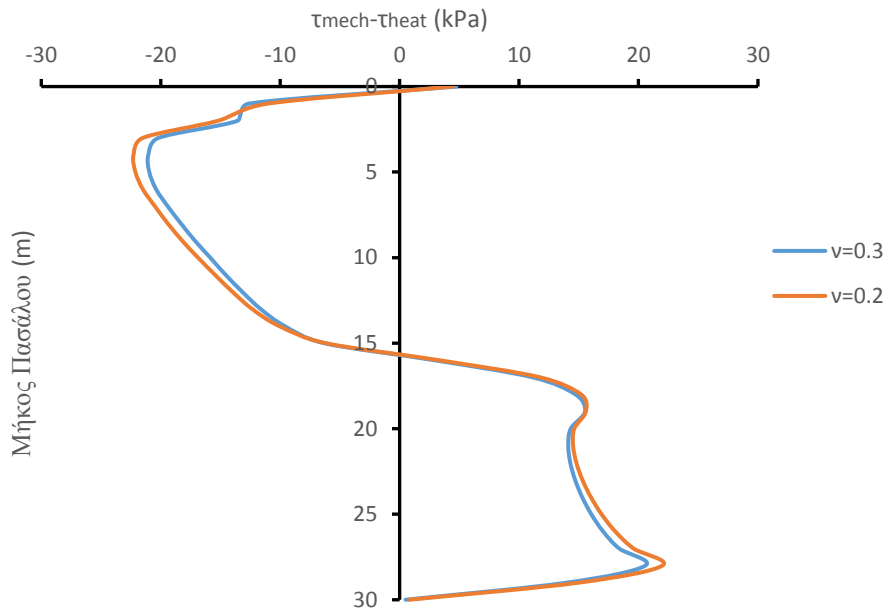
Από το Σχήμα 6.6.3.3 φαίνεται ότι για $\nu = 0.3$ κατά την ψύξη στην κορυφή ($2\text{m} < z < 10\text{m}$) και την αιχμή του πασσάλου ($z > 23\text{m}$) εμφανίζεται ανεπαίσθητα μεγαλύτερη επιρροή στην πλευρική τριβή, ενώ στο υπόλοιπο μέρος του πασσάλου δεν παρουσιάζονται διαφορές, γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη συστολή του εδάφους.



Σχήμα 6.6.3.4) Κατανομή διαφοράς κατακόρυφων μετατοπίσεων ($u_{\text{mech}} - u_{\text{cool}}$) για τους διαφορετικούς λόγους Poisson ν με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.6.3.5) Κατανομή διαφοράς αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{mech}} - N_{\text{cool}}$) για τους διαφορετικούς λόγους Poisson ν με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C για 6 μήνες.



Σχήμα 6.6.3.6) Κατανομή διαφοράς πλευρικής τριβής ($\tau_{\text{mech}} - \tau_{\text{cool}}$) για τους διαφορετικούς λόγους Poisson ν με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN και για θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C για 6 μήνες.

Μέσα από το Σχήμα 6.6.3.4 φαίνεται ότι για τη θέρμανση του πασσάλου η μεταβολή του λόγου Poisson (ν) του εδάφους δεν προκαλεί επιρροή στις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Η συμπεριφορά αυτή συμβαδίζει με αυτή που εμφανίζεται κατά την ψύξη του πασσάλου. Συνεπώς, η μεταβολή του λόγου Poisson (ν) δεν επηρεάζει τις τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τις θερμικές φορτίσεις.

Βάσει του Σχήματος 6.6.3.5 παρατηρείται ότι για λόγο Poisson $\nu = 0,2$ προκαλείται ελαφρώς μεγαλύτερη επιρροή στην τιμή των αξονικών δυνάμεων από ότι για $\nu = 0,3$. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται επειδή για $\nu = 0,3$ εμφανίζονται μικρότερες θλιπτικές αξονικές τάσεις στο άνω και κάτω μέρος του πασσάλου εξαιτίας της διαστολής του πασσάλου. Πιο συγκεκριμένα, στη διαστολή που τείνει να αναπτύξει ο πάσσαλος κατά τη θέρμανση του ο μικρότερος λόγος ν αποτελεί μεγαλύτερο κριτήριο δυσκαμψίας για αυτή τη μεταβολή μήκους του εδάφους, γεγονός που ελαττώνει σε μικρό βαθμό την εμφάνιση θλιπτικών αξονικών τάσεων στον πάσσαλο για $\nu = 0,3$, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρότερης επιρροής στις αξονικές δυνάμεις.

Από το Σχήμα 6.6.3.6 φαίνεται ότι για την ψύξη στο άνω μέρος ($4\text{m} < z < 12\text{m}$) και στο κάτω μέρος του πασσάλου ($20\text{m} > z > 27\text{m}$) για $\nu = 0,2$ εμφανίζεται ανεπαίσθητα μεγαλύτερη επιρροή στην πλευρική τριβή ενώ στο υπόλοιπο μέρος του πασσάλου δεν παρουσιάζονται διαφορές.

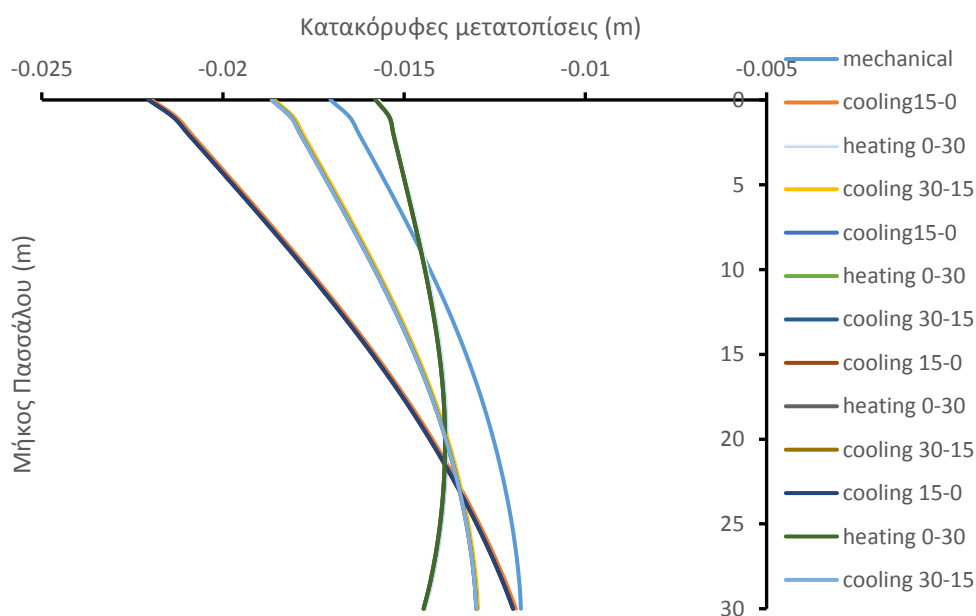
6.7) Επίδραση της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης

Στη συνέχεια, θα παρατεθούν διαγράμματα κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και πλευρική τριβή μετά από τέσσερις επαναλαμβανόμενους κύκλους θερμικής φόρτισης κατά μήκος του πασσάλου για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$, $\lambda = 2,5(\text{W/m/K})$ και για $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$ για το βήμα της επιβολής της θερμικής φόρτισης σε χρονική διάρκεια 6 μηνών. Στόχος της θεματικής ενότητας είναι η πιθανή μεταβολή που μπορεί να προκαλέσει η ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση στις αριθμητικές τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών. Αξίζει να σημειωθεί πως η λειτουργία των ενεργειακών πασσάλων στηρίζεται στην επιβολή ανακυκλιζόμενων θερμικών φορτίσεων.

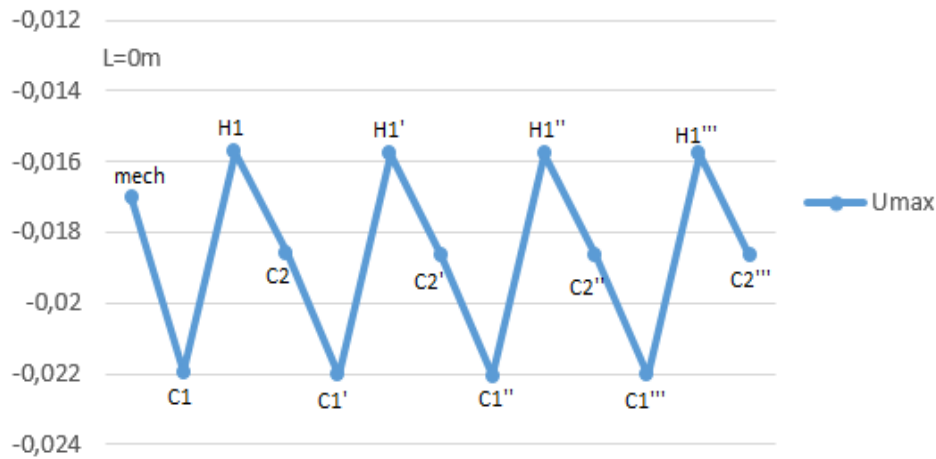
Αναμένεται ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ θα προκύψουν οι μέγιστες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων θερμικής φόρτισης.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν ύστερα από την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση του πασσάλου για τέσσερις φορές με την ταυτόχρονη παρουσία φορτίου 6000 kN στην κεφαλή. Σ' αυτά απεικονίζονται αρχικά οι κατακόρυφες μετατοπίσεις, οι αξονικές δυνάμεις και η πλευρική τριβή κατά μήκος του πασσάλου και στη συνέχεια οι μέγιστες καθιζήσεις για μήκος πασσάλου $z = 0\text{m}$, οι αξονικές δυνάμεις για $z = 10\text{m}$ και η πλευρική τριβή για $z = 10\text{m}$. Τα βήματα από τα οποία αποτελούταν κάθε ξεχωριστή θερμική φόρτιση ήταν:

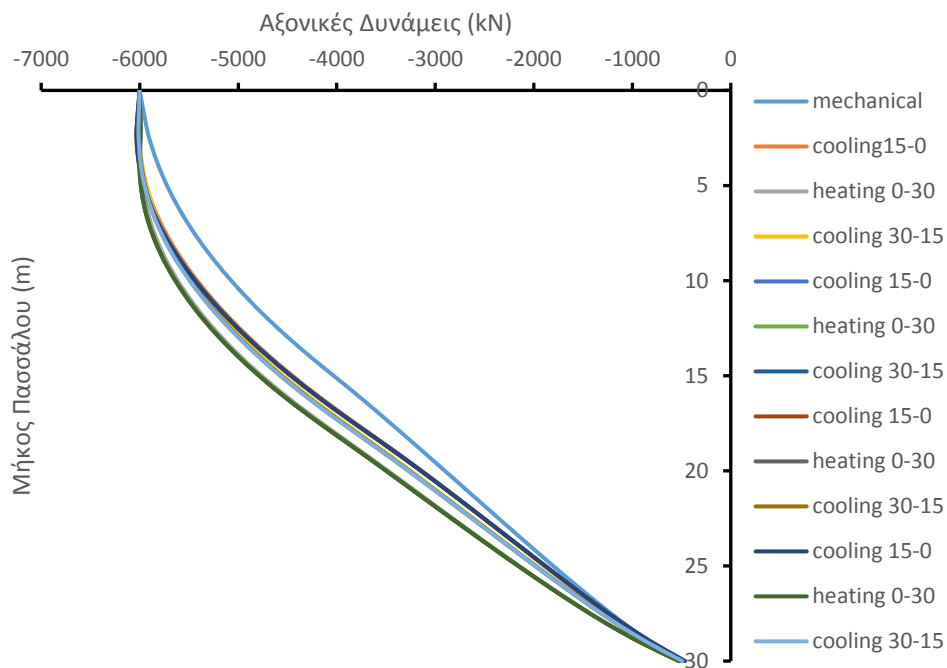
1. Ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C
2. Θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C
3. Ψύξη από του 30 °C στου 15 °C για επαναφορά στην αρχική του θερμοκρασία



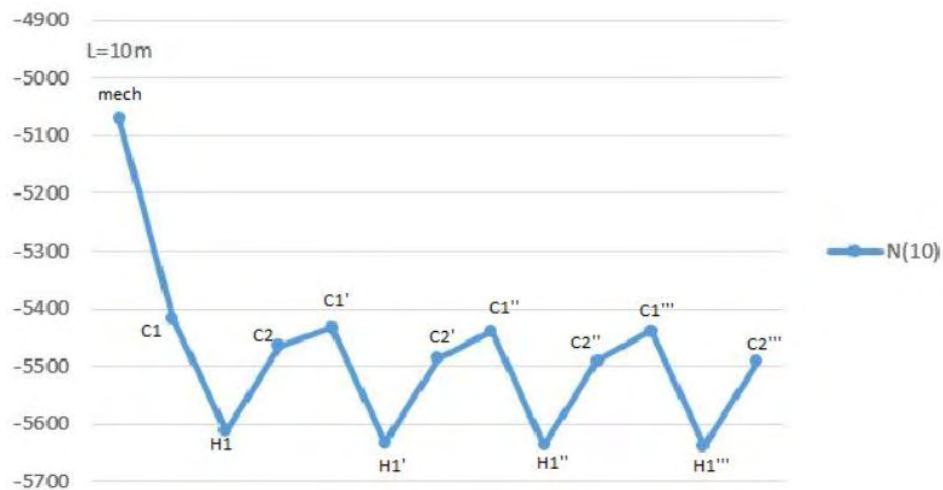
Σχήμα 6.7.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων με μηχανική φόρτιση 6000 kN για τους 4 κύκλους ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης διάρκειας 6 μηνών.



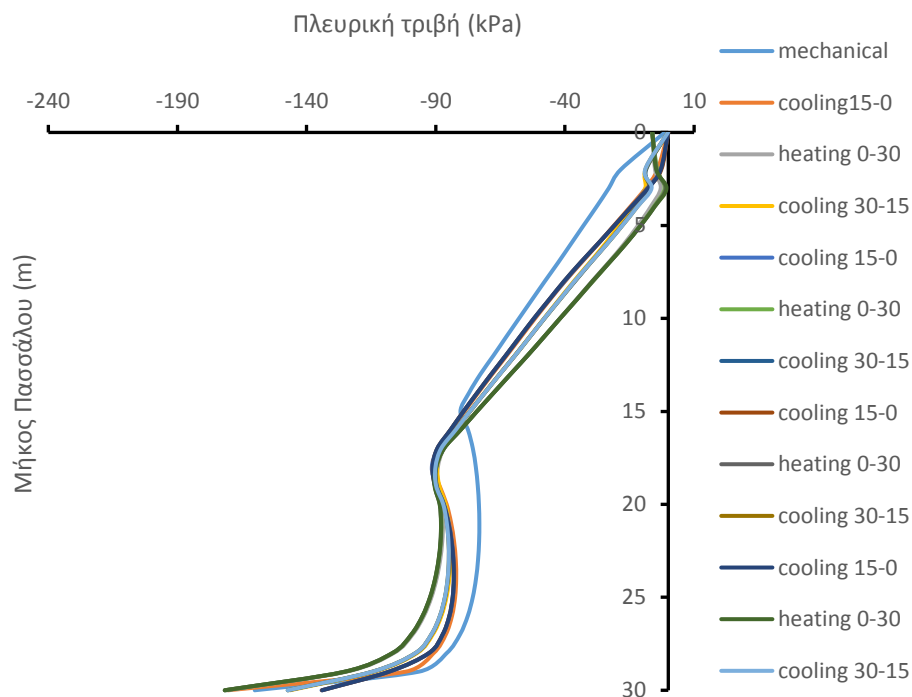
Σχήμα 6.7.2) Κατανομή μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην κεφαλή του πασσάλου ($z = 0\text{m}$) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για επιβολή 4 κύκλων ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης, όπου C1, H1, C2 τα βήματα του θερμικού κύκλου δηλαδή της αρχικής ψύξης ($15\text{ }^{\circ}\text{C} - 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), μετέπειτα θέρμανσης ($0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) και τελικής ψύξης ($30\text{ }^{\circ}\text{C} - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) αντίστοιχα διαστήματος 6 μηνών.



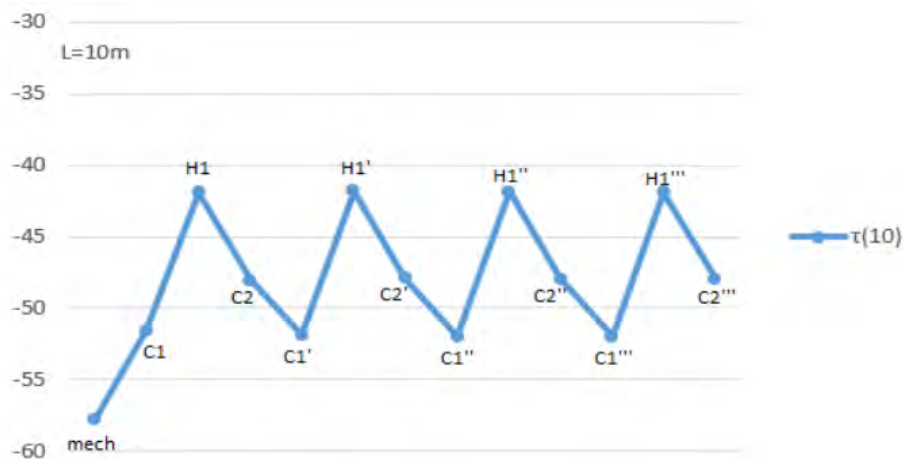
Σχήμα 6.7.3) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για τους 4 κύκλους ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης διάρκειας 6 μηνών.



Σχήμα 6.7.4) Κατανομή αξονικών δυνάμεων στο σημείο ($z = 10\text{m}$) του πασσάλου με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για επιβολή 4 κύκλων ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης, όπου C1, H1, C2 τα βήματα του θερμικού κύκλου δηλαδή της αρχικής ψύξης ($15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$), μετέπειτα θέρμανσης ($0^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$) και τελικής ψύξης ($30^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}$) αντίστοιχα διαστήματος 6 μηνών.



Σχήμα 6.7.5) Κατανομή πλευρικής τριβής με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για τους 4 κύκλους ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης διάρκειας 6 μηνών.



Σχήμα 6.7.6) Κατανομή πλευρικής τριβής στο σημείο ($z = 10\text{m}$) του πασσάλου με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για επιβολή 4 κύκλων ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης, όπου C1, H1, C2 τα βήματα του θερμικού κύκλου δηλαδή της αρχικής ψύξης ($15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$), μετέπειτα θέρμανσης ($0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$) και τελικής ψύξης ($30\text{ }^\circ\text{C} - 15\text{ }^\circ\text{C}$) αντίστοιχα διαστήματος 6 μηνών.

Όπως μπορεί να διακρίνει κανείς μέσα από τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 6.7.1, Σχήμα 6.7.2) για την επιβολή του κάθε βήματος της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης παρατηρείται ότι η συμπεριφορά και η κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος των ενεργειακών πασσάλων δε μεταβάλλεται με την επανάληψη των θερμικών φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που εμφανίζονται από την αρχική, τελική ψύξη και τη μετέπειτα θέρμανση του πασσάλου του πρώτου κύκλου παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες μετά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση για 4 φορές του μεμονωμένου ελεύθερου ενεργειακού πασσάλου. Όπως προαναφέρθηκε, παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και για τους λόγους $\alpha_s/\alpha_p=1$, $\alpha_s/\alpha_p=0.5$ και $\alpha_s/\alpha_p=0$.

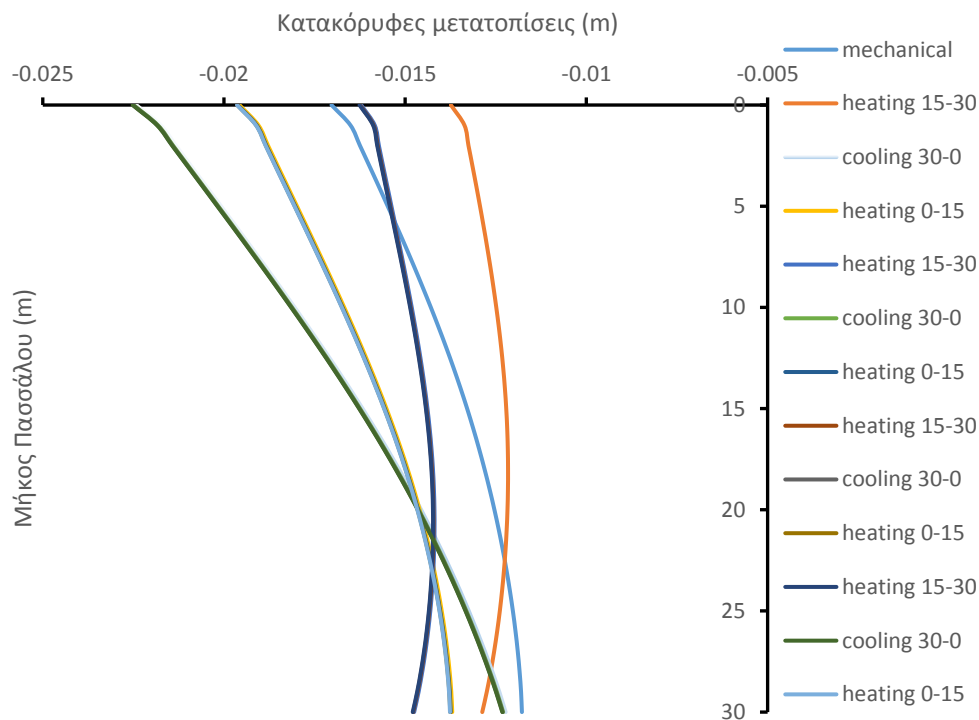
Επιπλέον, μέσα από τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 6.7.3, Σχήμα 6.7.4) φαίνεται ότι παραπλήσια συμπεριφορά με τις καθιζήσεις προκύπτει και για την κατανομή των αξονικών δυνάμεων. Ειδικότερα, οι αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται από την αρχική, τελική ψύξη και τη μετέπειτα θέρμανση του πασσάλου του πρώτου κύκλου παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες μετά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση για 4 φορές του μεμονωμένου ελεύθερου ενεργειακού πασσάλου. Όπως προαναφέρθηκε, παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και για τους λόγους $\alpha_s/\alpha_p = 1$, $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$ και $\alpha_s/\alpha_p = 0$.

Τέλος, αναφορικά με τις τιμές της πλευρικής τριβής μέσα από τα διαγράμματα τα οποία παρατίθενται παραπάνω (βλ. Σχήμα 6.7.5, Σχήμα 6.7.6) παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν των παραπάνω εξεταζόμενων μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές της πλευρικής τριβής που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια από την αρχική, τελική ψύξη και τη μετέπειτα θέρμανση του πασσάλου του πρώτου κύκλου παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες μετά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση για 4 φορές του

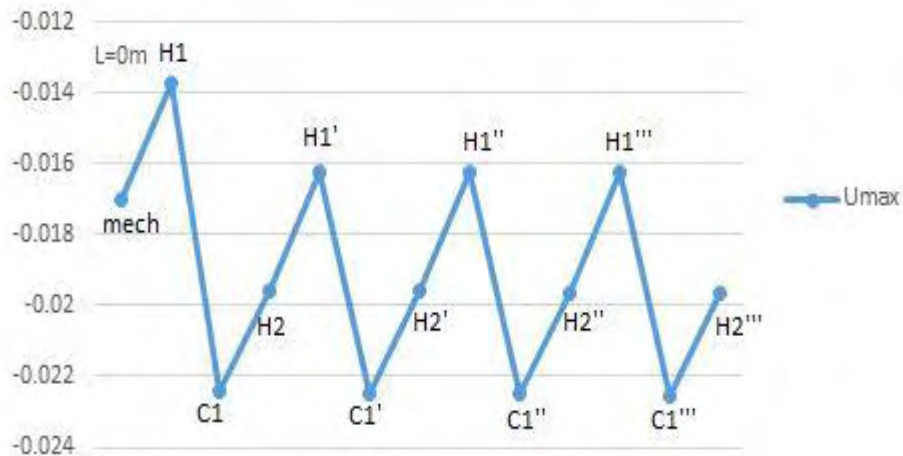
μεμονωμένου ελεύθερου ενεργειακού πασσάλου Όπως προαναφέρθηκε, παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και για τους λόγους $\alpha_s/\alpha_p=1$, $\alpha_s/\alpha_p=0.5$ και $\alpha_s/\alpha_p=0$.

Επιπλέον, παρακάτω πραγματοποιήθηκε η αντίστροφη πορεία ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης με σκοπό τη μελέτη απόκρισης του πασσάλου σε περίπτωση που ο θερμικός κύκλος μη μόνιμης ροής που επιβληθεί στον ενεργειακό πάσσαλο αποτελείται από 2 θερμάνεις και μια ψύξη. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για θερμικό βήμα διάρκειας 6 μηνών. Τα διαγράμματα όπως και παραπάνω προέκυψαν ύστερα από την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση του πασσάλου για τέσσερις φορές με την ταυτόχρονη παρουσία κατακόρυφου φορτίου 6000 kN. Σ' αυτά απεικονίζονται αρχικά οι κατακόρυφες μετατοπίσεις, οι αξονικές δυνάμεις και η πλευρική τριβή κατά μήκος του πασσάλου και στη συνέχεια οι μέγιστες καθιζήσεις για μήκος πασσάλου $z = 0\text{m}$ και οι αξονικές δυνάμεις για $z = 10\text{m}$. Τα βήματα από τα οποία αποτελούνταν κάθε ξεχωριστή θερμική φόρτιση ήταν:

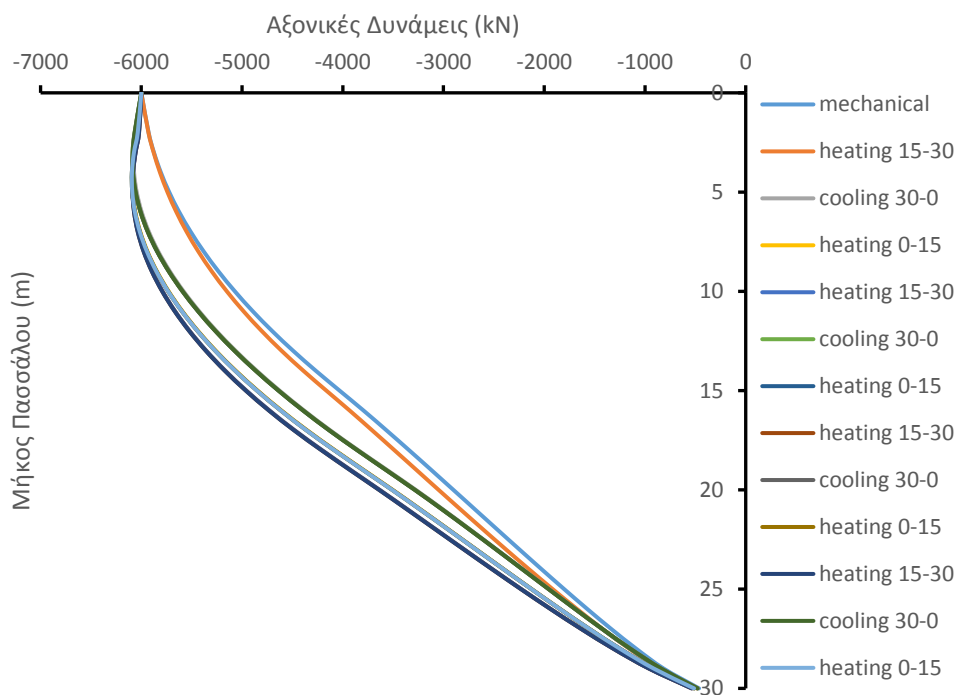
1. Θέρμανση του πασσάλου από τους 15 °C στους 30 °C
2. Ψύξη από τους 30 °C στους 0 °C
3. Θέρμανση από του 15 °C στον 30 °C για επαναφορά στην αρχική του θερμοκρασία



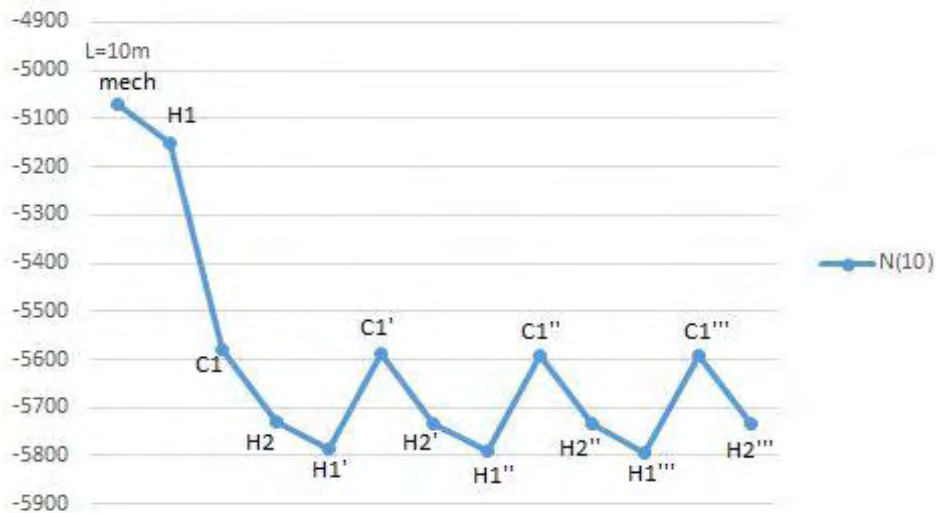
Σχήμα 6.7.7) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για τους 4 κύκλους ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης διάρκειας 6 μηνών.



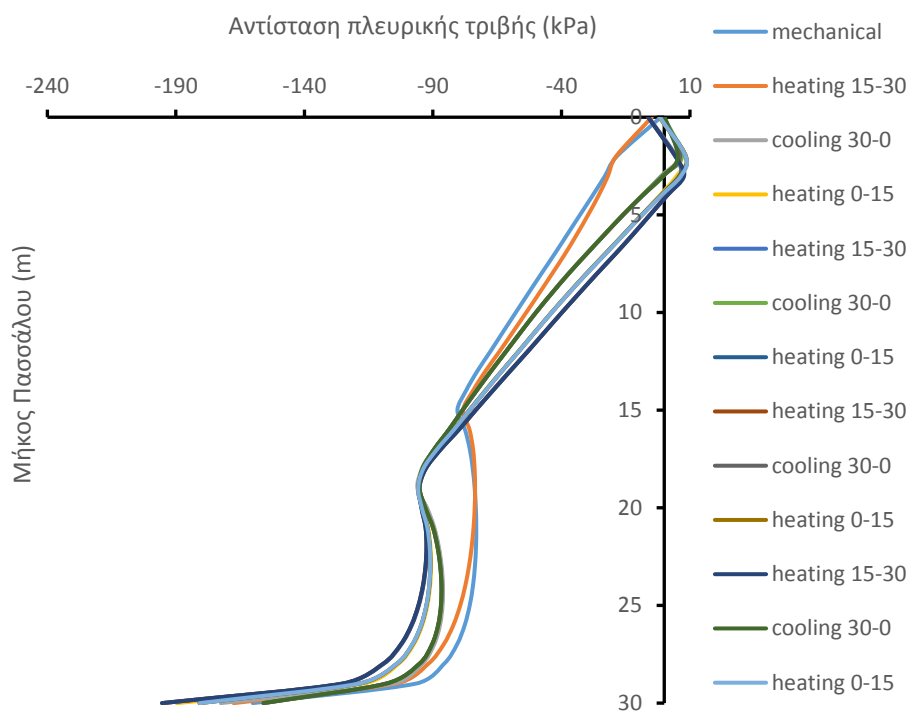
Σχήμα 6.7.8) Κατανομή μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην κεφαλή του πασσάλου ($z = 0\text{m}$) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για επιβολή 4 κύκλων ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης, όπου H1, C1, H2 τα βήματα του θερμικού κύκλου δηλαδή της αρχικής θέρμανσης ($15\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$), μετέπειτα ψύξης ($30\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$) και τελικής θέρμανσης ($0\text{ }^\circ\text{C} - 15\text{ }^\circ\text{C}$) αντίστοιχα διαστήματος 6 μηνών.



Σχήμα 6.7.9) Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για τους 4 κύκλους ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης διάρκειας 6 μηνών.



Σχήμα 6.7.10) Κατανομή αξονικών δυνάμεων στο σημείο ($z = 10\text{m}$) του πασσάλου με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για επιβολή 4 κύκλων ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης, όπου H1, C1, H2 τα βήματα του θερμικού κύκλου δηλαδή της αρχικής θέρμανσης ($15\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), μετέπειτα ψύξης ($30\text{ }^{\circ}\text{C} - 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) και τελικής θέρμανσης ($0\text{ }^{\circ}\text{C} - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) αντίστοιχα διαστήματος 6 μηνών.



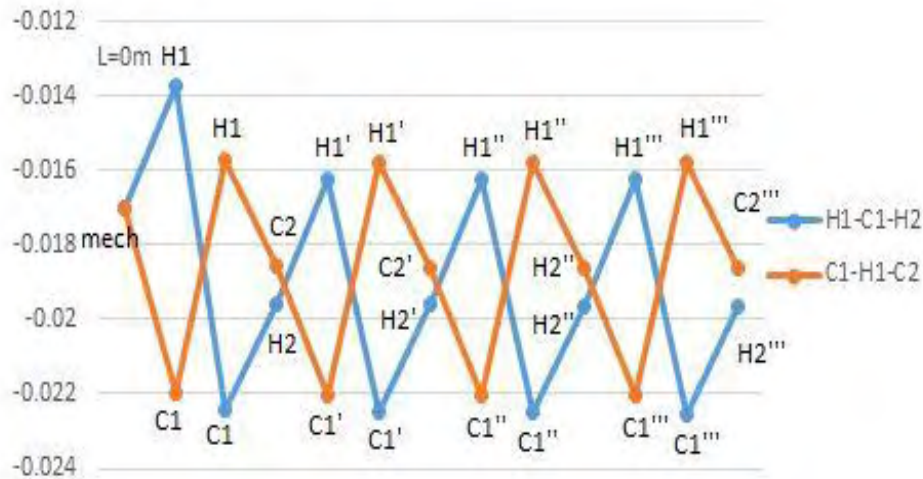
Σχήμα 6.7.11) Κατανομή πλευρικής τριβής με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για τους 4 κύκλους ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης διάρκειας 6 μηνών.

Όπως μπορεί να διακρίνει κανείς μέσα από τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 6.7.7, Σχήμα 6.7.8) παρατηρείται ότι προκύπτει σημαντική αύξηση (περίπου 15,5 %) των καθιζήσεων της αρχικής θέρμανσης 15 °C - 30 °C στο δεύτερο κύκλο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε σύγκριση με τον πρώτο. Στη συνέχεια, για τους επόμενους κύκλους θερμικής φόρτισης που ακολουθούν οι καθιζήσεις της αρχικής θέρμανσης 15 °C - 30 °C σταθεροποιούνται. Όσον αφορά τις υπόλοιπες δύο θερμικές φορτίσεις του θερμικού κύκλου δηλαδή τη μετέπειτα ψύξη (30 °C - 0 °C) και την τελική θέρμανση (0 °C - 15 °C) παρατηρείται ότι οι καθιζήσεις που εμφανίζονται στον πρώτο κύκλο παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες μετά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση του μεμονωμένου ελεύθερου ενεργειακού πασσάλου για 4 φορές.

Επιπλέον, μέσα από τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 6.7.9, Σχήμα 6.7.10) φαίνεται ότι προκύπτει σημαντική αύξηση των αξονικών δυνάμεων της αρχικής θέρμανσης 15 °C - 30 °C στο δεύτερο κύκλο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε σύγκριση με τον πρώτο που φτάνει ως και περίπου 16 % στο κέντρο του πασσάλου. Έπειτα, για τους επόμενους κύκλους θερμικής φόρτισης που ακολουθούν οι αξονικές δυνάμεις της αρχικής θέρμανσης 15 °C - 30 °C σταθεροποιούνται. Όσον αφορά τις υπόλοιπες δύο θερμικές φορτίσεις του θερμικού κύκλου δηλαδή τη μετέπειτα ψύξη (30 °C - 0 °C) και την τελική θέρμανση (0 °C - 15 °C) παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται στον πρώτο κύκλο παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες μετά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση του μεμονωμένου ελεύθερου ενεργειακού πασσάλου για 4 φορές.

Τέλος, αναφορικά με τις τιμές της πλευρικής τριβής μέσα από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.7.11) παρατηρείται ότι παρουσιάζεται σημαντική μείωση της πλευρικής τριβής στο άνω τμήμα του πασσάλου και αύξηση στο κάτω μέρος του της αρχικής θέρμανσης 15 °C - 30 °C στο δεύτερο κύκλο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε σύγκριση με τον πρώτο. Στη συνέχεια, για τους επόμενους κύκλους θερμικής φόρτισης που ακολουθούν η πλευρική τριβή της αρχικής θέρμανσης 15 °C - 30 °C σταθεροποιείται. Όσον αφορά τις υπόλοιπες δύο θερμικές φορτίσεις του θερμικού κύκλου δηλαδή τη μετέπειτα ψύξη (30 °C - 0 °C) και την τελική θέρμανση (0 °C - 15 °C) παρατηρείται ότι η πλευρική τριβή που εμφανίζεται κατά μήκος του πασσάλου στον πρώτο κύκλο παραμένει σχεδόν αμετάβλητη μετά την ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση του μεμονωμένου ελεύθερου ενεργειακού πασσάλου για 4 φορές.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζεται μια ιδιόμορφη συμπεριφορά με την επιρροή της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης η οποία συναντάται στην πρώτη θερμική φόρτιση του κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, προκαλείται αύξηση από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο στις καθιζήσεις και τις αξονικές δυνάμεις στην περίπτωση που η πρώτη θερμική φόρτιση που επιβληθεί στον ενεργειακό πάσσαλο είναι η θέρμανση, ενώ αν επιβληθεί αρχικά ψύξη στον πάσσαλο παρατηρούνται ανεπαίσθητες μεταβολές στα παραπάνω μεγέθη. Σύμφωνα με την έρευνα των Amatya et al. (2012) με την εναλλαγή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση) είναι δυνατό να προκληθούν μεγαλύτερες καθιζήσεις, αξονικές δυνάμεις και διατμητικές τάσεις λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας δηλαδή της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους πασσάλου.



Σχήμα 6.7.12) Κατανομή μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην κεφαλή του πασσάλου ($z = 0\text{m}$) με την επίδραση μηχανικής φόρτισης 6000 kN για τις δύο προαναφερθείσες αντίστροφες πορείες ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης H1, C1, H2 και C1, H2, C2 βήματος μη-μόνιμης θερμικής ροής διάρκειας 6 μηνών.

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται μέσα από το παραπάνω Σχήμα 6.7.12 η πορεία με την οποία θα εκτελεστεί ο θερμικός κύκλος (θέρμανση ή ψύξη στην αρχή) τελικά μετά την ολοκλήρωση του πρώτου θερμικού κύκλου δεν επηρεάζει σημαντικά (περίπου 2.5 % η διαφορά που εμφανίζεται) το μέγεθος των καθιζήσεων που προκύπτουν για την εκάστοτε ψύξη ή θέρμανση.

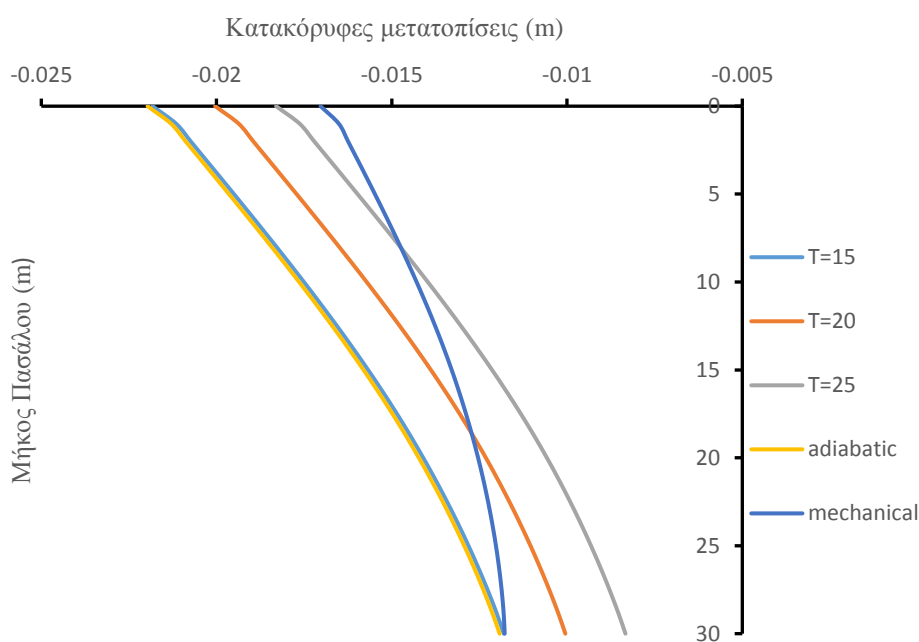
6.8) Επιρροή της θερμικής συνοριακής συνθήκης στην επιφάνεια του εδάφους

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$, $\alpha_s/\alpha_p = 1$, $\alpha_s/\alpha_p = 0.5$, $\alpha_s/\alpha_p = 0$, συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$, συντελεστή ειδικής θερμότητας για $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$ με παρουσία φόρτισης 6000 kN (φορτίο λειτουργίας) στην κεφαλή του πασσάλου με προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην κορυφή της εδαφικής επιφάνειας και του πασσάλου.

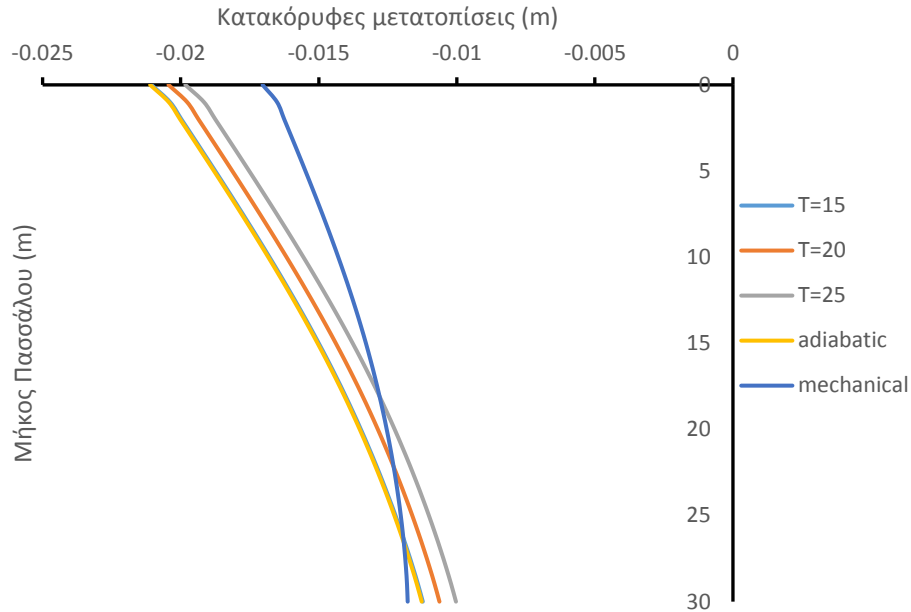
Για την προσομοίωση της θερμικής ανάλυσης προστέθηκε ένα επιπλέον βήμα μετά το αρχικό (initial step) μόνιμης θερμικής ροής (steady state). Επειδή υποτίθεται ότι η θερμοκρασία της κατασκευής θα παραμένει σταθερή, προστέθηκε μία συνοριακή συνθήκη (boundary condition) στο προαναφερθέν θερμικό βήμα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε σταθερό επίπεδο στην κορυφή της εδαφικής επιφάνειας. Δημιουργήθηκαν τρεις θερμικές αναλύσεις για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε σταθερό επίπεδο στην κορυφή της εδαφικής επιφάνειας με συνοριακή συνθήκη $T_1 = 15^\circ\text{C}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$, $T_3 = 25^\circ\text{C}$ αντίστοιχα.

Η θερμική ανάλυση προστέθηκε στη μηχανική ανάλυση ως προκαθορισμένο πεδίο (predefined field) όπως και στα παραπάνω κεφάλαια με τη διαφορά ότι στην προκειμένη περίπτωση έπρεπε να προστεθεί ένα επιπλέον προκαθορισμένο πεδίο που θα δεσμεύει και θα ορίζει σταθερή τη θερμοκρασία στην κορυφή της εδαφικής επιφάνειας, αντίστοιχα για καθεμία από τρεις περιπτώσεις. Επίσης, τοποθετήθηκε ένα επιπρόσθετο βήμα στη μηχανική ανάλυση μετά την επιβολή της μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου για την εφαρμογή του θερμοκρασιακού πεδίου της προσομοίωσης σταθερής θερμοκρασίας στη μηχανική ανάλυση.

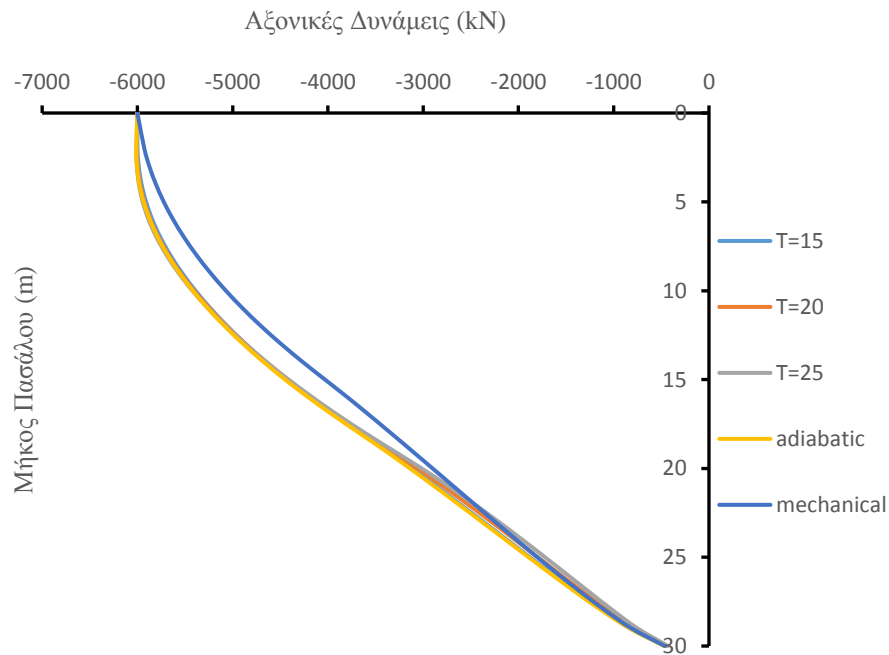
Παρακάτω, θα παρουσιαστούν διαγράμματα ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C, θέρμανσης από τους 0 °C στους 30 °C και τελικής ψύξης από τους 30 °C στους 15 °C που θα συγκρίνουν την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής της ενότητας 6.1 με αυτήν που προκύπτει από τις 3 παραπάνω αναλύσεις κατά μήκος του πασσάλου. Αναμένεται ότι για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ θα προκύψουν οι μέγιστες διαφορές στις αριθμητικές τιμές των παραπάνω εξεταζόμενων μεγεθών λόγω της προσομοίωσης σταθερής θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τους Bourne-Webb, P. J. et al. (2015) όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p τόσο μικρότερη θα είναι η επιρροή της σταθερής θερμοκρασίας στην κορυφή του εδάφους στις αριθμητικές τιμές που θα προκύψουν, με την περίπτωση που ο λόγος α_s/α_p ισούται με 0 να μην δημιουργεί καμία διαφορά στις τιμές λόγω της θερμικής αδράνειας του εδάφους. Επιπλέον, στις αναλύσεις που πραγματοποίησαν οι Bourne-Webb et al., (2015) παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η επιφανειακή θερμοκρασία θα προκαλούνται μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις στον πάσσαλο.



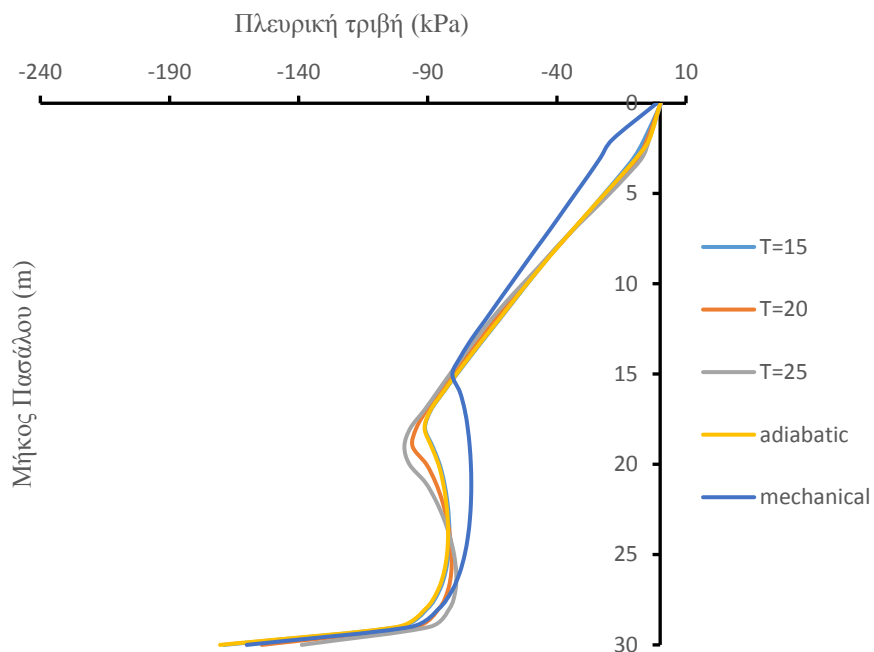
Σχήμα 6.8.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



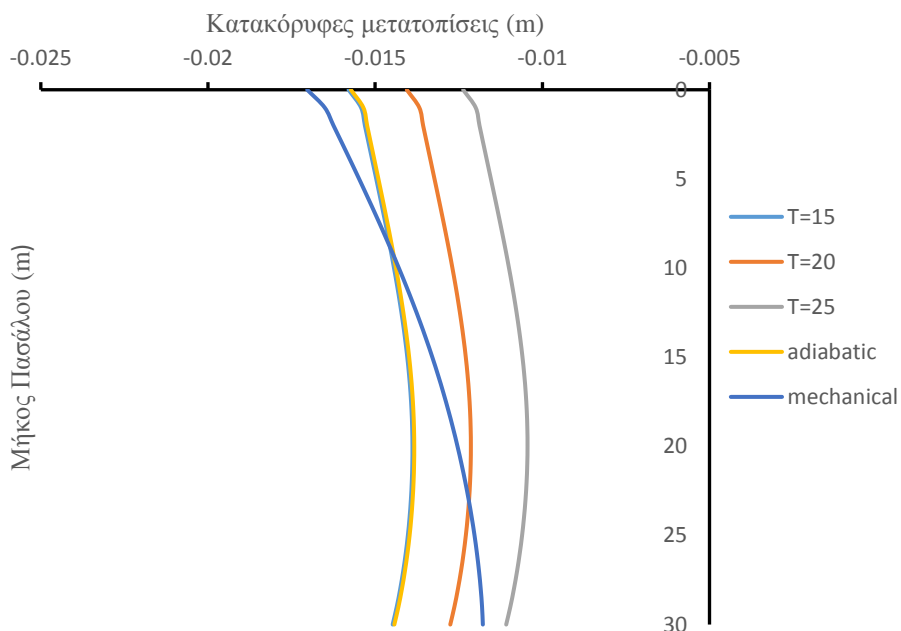
Σχήμα 6.8.2) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$.



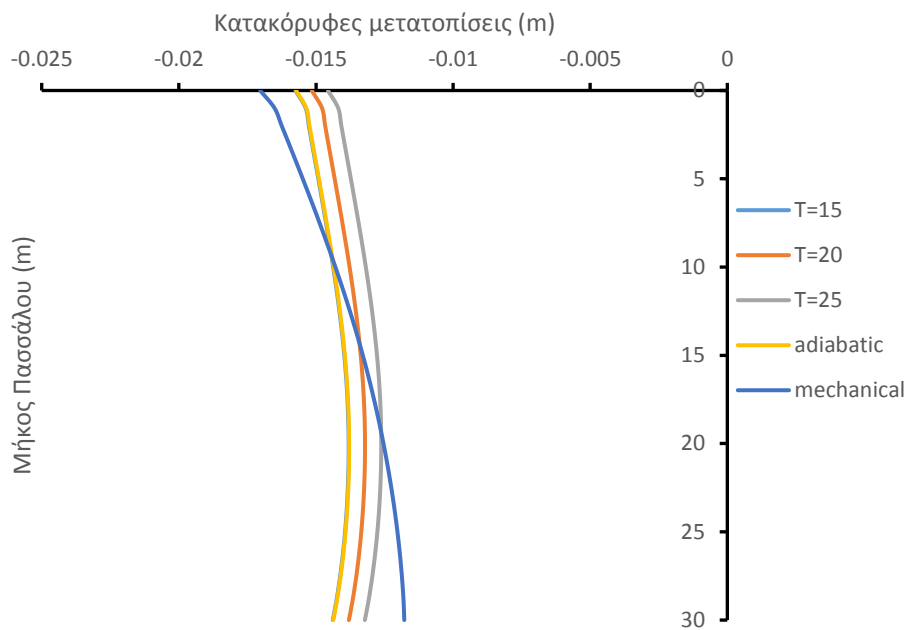
Σχήμα 6.8.3) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



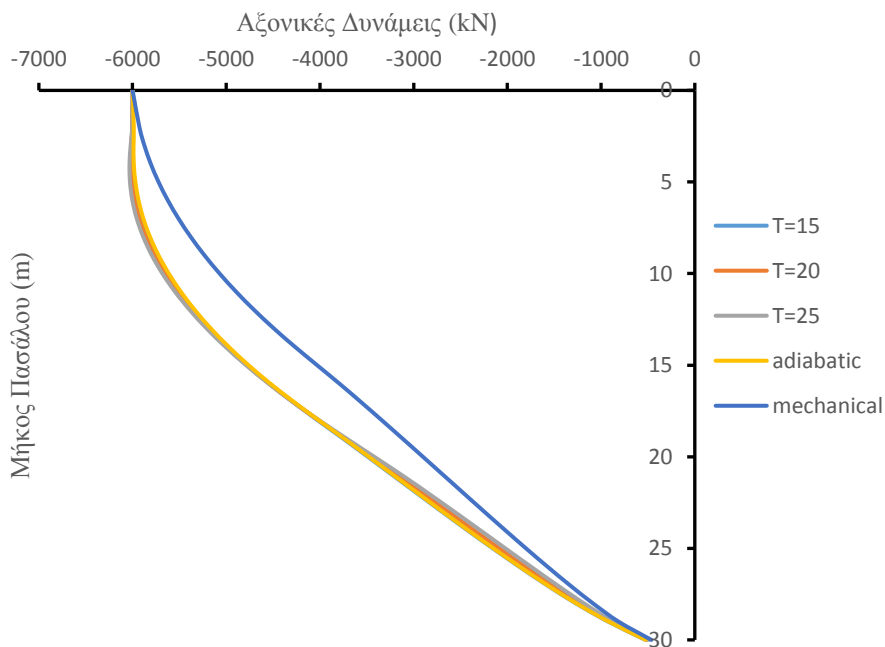
Σχήμα 6.8.4) Κατανομή πλευρικής τριβής για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην κορυφή του επιφάνεια και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή ψύξης από τους 15 °C στους 0 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



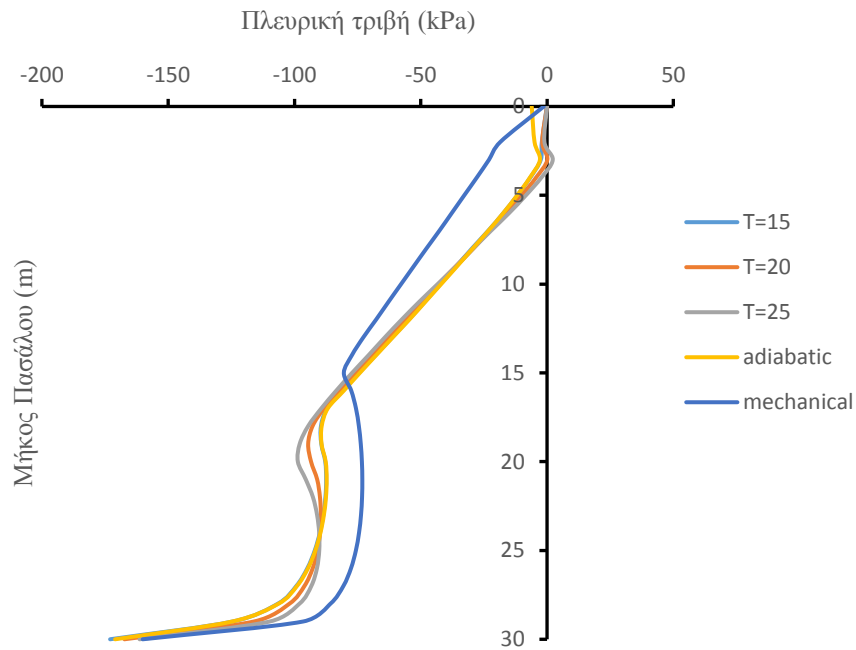
Σχήμα 6.8.5) Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



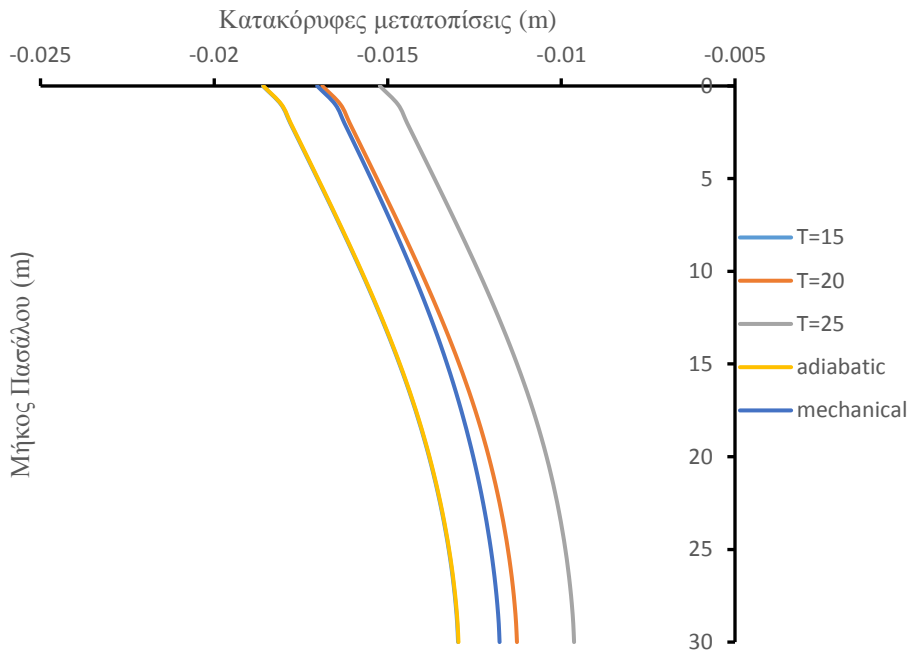
Σχήμα 6.8.6) Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$.



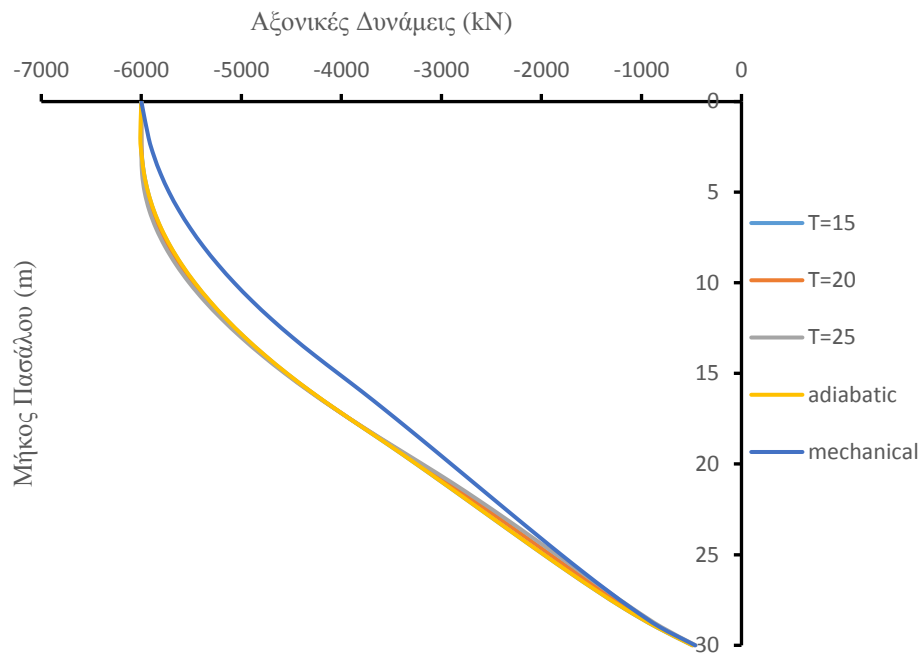
Σχήμα 6.8.7) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



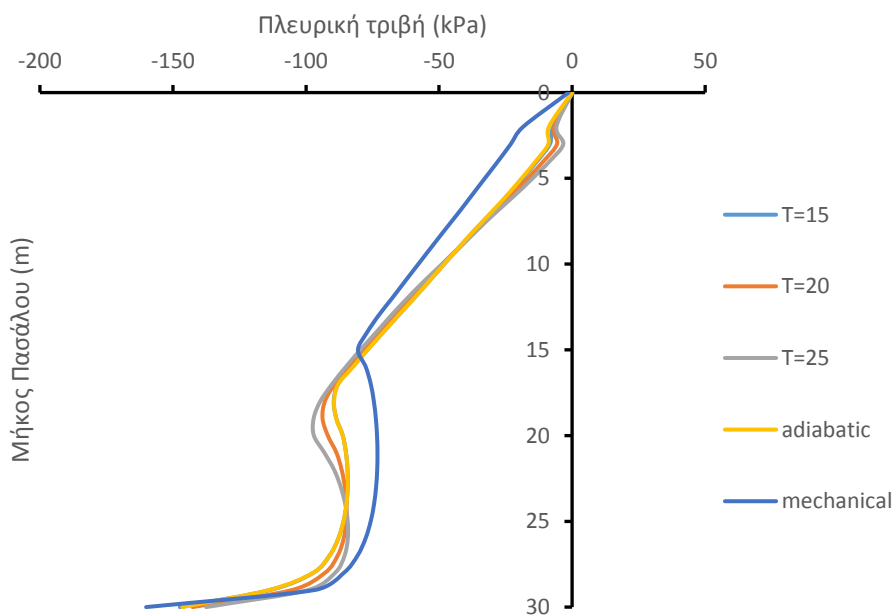
Σχήμα 6.8.8) Κατανομή πλευρικής τριβής για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή θέρμανσης από τους 0 °C – 30 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$



Σχήμα 6.8.9) Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30°C – 15 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



Σχήμα 6.8.10) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30°C – 15 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.



Σχήμα 6.8.11) Κατανομή πλευρικής τριβής για προσομοίωση σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πασσάλου και του εδάφους με την επίδραση φόρτισης 6000 kN και με επιβολή της τελικής ψύξης από τους 30°C – 15 °C για διάστημα 6 μηνών και λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$.

Μέσα από τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 6.8.1, Σχήμα 6.8.5, Σχήμα 6.8.9) διακρίνεται ότι για την επιβολή του κάθε βήματος του κύκλου της θερμικής φόρτισης του Κεφαλαίου 6.1 με λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 3$ για το φορτίο λειτουργίας παρατηρείται μια ομοιόμορφη ελάττωση των καθιζήσεων κατά μήκος του πασσάλου με την αύξηση της σταθερής θερμοκρασίας της επιφάνειας. Ειδικότερα, οι διαφορές κυμαίνονται για την αρχική ψύξη στο 9 %, για τη μετέπειτα θέρμανση στο 12 % και για την τελική ψύξη στο 10 %. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα διαφορετικά θερμοκρασιακά πεδία των τριών αναλύσεων με την αύξηση της συνοριακής συνθήκης $T_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ στην κορυφή να προκαλεί μεγαλύτερη διαστολή του πασσάλου και του εδάφους για την ψύξη και τη θέρμανση αντίστοιχα λόγω της εμφάνισης μεγαλύτερων εφελκυστικών τάσεων στον πάσσαλο (Bourne-Webb, P. J. et al, 2015). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες καθιζήσεις εμφανίζονται για συνοριακή συνθήκη $T_1=15 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ οι μικρότερες για $T_3 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Το γεγονός ότι οι καθιζήσεις για συνοριακή συνθήκη $T_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ στην επιφάνεια του μοντέλου είναι ίσες με αυτές που προκύπτουν με απουσία σταθερής θερμοκρασίας στην κορυφή, οφείλεται στην ομοιότητα των θερμοκρασιακών πεδίων των δύο αναλύσεων που προκύπτουν λόγω της θερμοκρασίας που ορίζεται στην εδαφική επιφάνεια και ισούται με $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Ειδικότερα, κατά την αρχική ψύξη παρατηρείται για αύξηση του συντελεστή της επιβαλλόμενης σταθερής επιφανειακής θερμοκρασίας μια μετατόπιση του ουδέτερου σημείου (null point) προς τα πάνω σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου σε αντίθεση με τη θέρμανση όπου το ουδέτερο σημείο μετακινείται προς τα κάτω. Αναφορικά με το λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τη μόνη διαφορά ότι ελαττώνονται οι διακυμάνσεις μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών όσο μειώνεται ο λόγος α_s/α_p όπως παρατηρείται για λόγο $\alpha_s/\alpha_p = 1$ (περίπου στο 4 % η διαφορές) από μέσα από τα Σχήματα 6.8.2, 6.8.6 για ψύξη και θέρμανση αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι στην έρευνα του Rui Assunção (2014) για θέρμανση του πασσάλου με απουσία μηχανικής φόρτισης και προσομοίωση της ανάλυσης χρησιμοποιώντας σταθερή θερμοκρασία στην κορυφή του εδάφους και του πασσάλου παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία που τοποθετείται ως θερμική συνοριακή συνθήκη στην επιφάνεια τόσο μεγαλύτερες είναι οι θετικές μετατοπίσεις. Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται και στην παρούσα ανάλυση με τη μείωση των καθιζήσεων με την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας.

Όσον αφορά τις τιμές των αξονικών δυνάμεων παρατηρώντας κανείς τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Σχήμα 6.8.3, Σχήμα 6.8.7, Σχήμα 6.8.11) μπορεί να διακρίνει ότι για την επιβολή του κάθε βήματος της θερμικής φόρτισης παρατηρείται ότι η διατήρηση σταθερής και διαφορετικής θερμοκρασίας στην κορυφή της εδαφικής επιφάνειας επηρεάζει ανεπαίσθητα την κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ταύτιση των διαγραμμάτων της πλευρικής τριβής που παράγεται. Αναφορικά με το λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

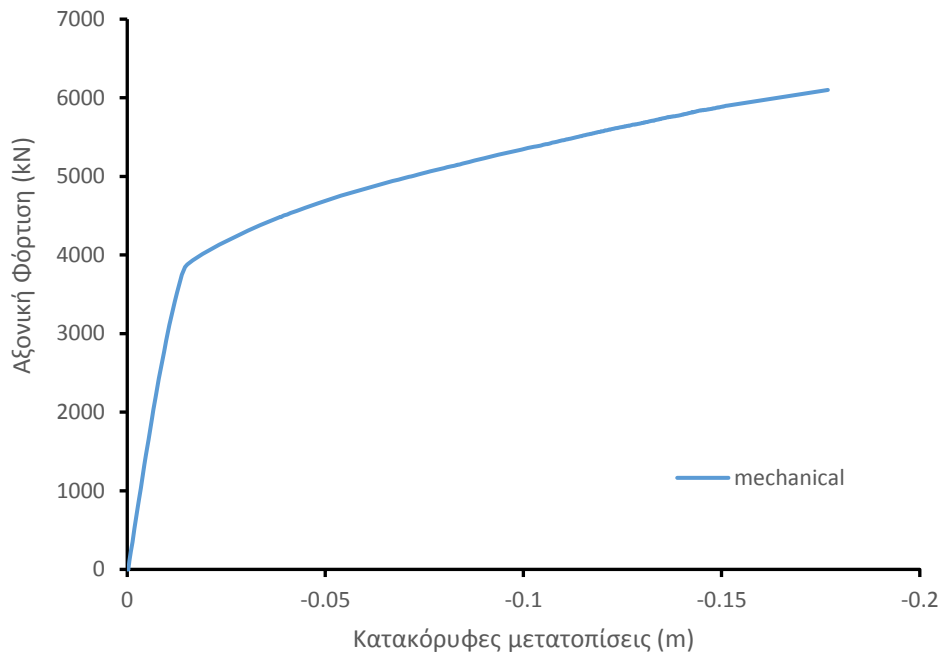
Τέλος, αναφορικά με τις τιμές της πλευρικής τριβής βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων (βλ. Σχήμα 6.8.4, Σχήμα 6.8.8, Σχήμα 6.8.12) συμπεραίνεται ότι για την επιβολή του κάθε βήματος της θερμικής φόρτισης παρατηρείται ότι η διατήρηση

σταθερής και διαφορετικής θερμοκρασίας στην κορυφή της επιφάνειας του μοντέλου δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται εξαιτίας της μηχανικής φόρτισης των 6000 kN που έχει επιβληθεί στην κεφαλή του πασσάλου με την οποία η μέγιστη διατμητική αντοχή έχει ήδη εμφανιστεί με την παρουσία της μηχανικής φόρτισης πριν από την εισαγωγή των θερμικών φορτίσεων. Επιπλέον, όσον αφορά το λόγο $\alpha_s/\alpha_p < 3$ αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

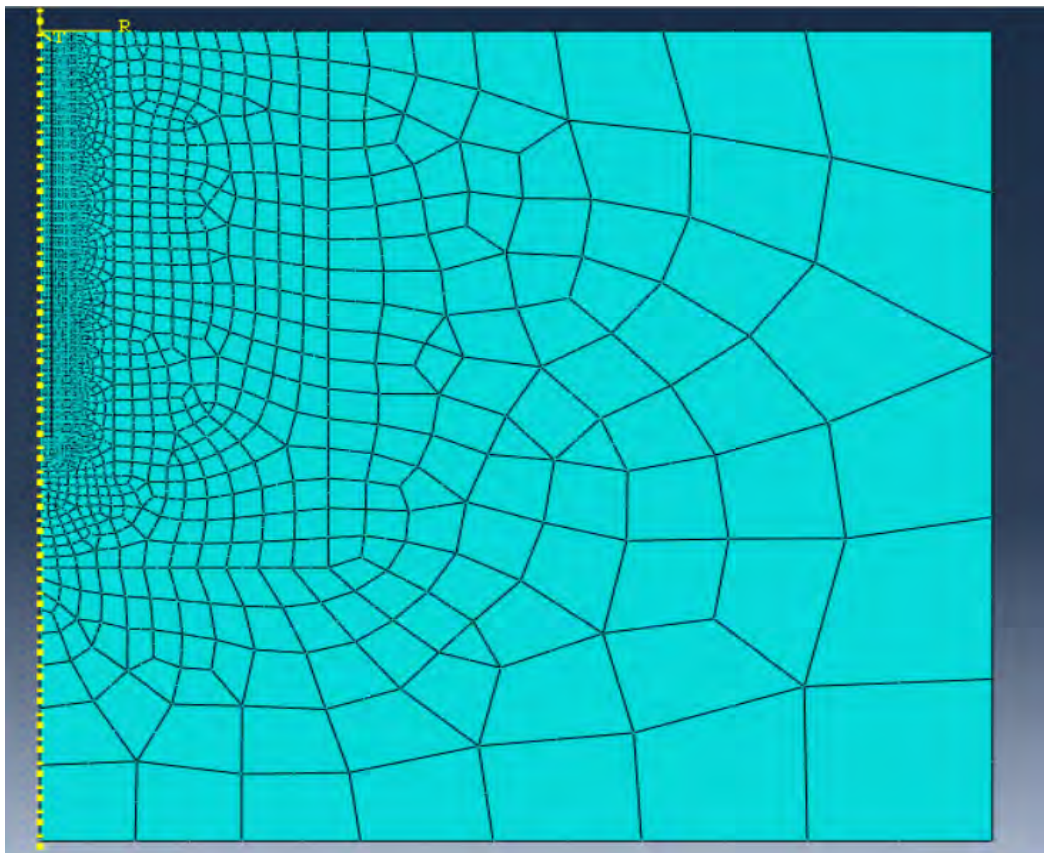
6.9) Επιρροή του μήκους του πασσάλου

Το μήκος του πασσάλου είναι σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό του μεγέθους της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης και της φέρουσας ικανότητας ενός πασσάλου καθώς επηρεάζει την αντίσταση πλευρικής τριβής που δέχεται ο πάσσαλος. Για την παρατήρηση πιθανών διαφορών που μπορεί να προκαλέσει η αλλαγή του μήκους πασσάλου στην κατανομή των εξεταζόμενων μεγεθών υπό την επιβολή ενός θερμικού κύκλου δημιουργήθηκε ένας καινούργιος κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων για μεμονωμένο ελεύθερο ενεργειακό πάσσαλο μήκους 20m. Επιπλέον για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του πασσάλου και του περιβάλλοντος αμμώδους εδάφους να είναι παρόμοιες με την ανάλυση που προαναφέρθηκε (σελ. 16-17). Επίσης ο κάρναβος δημιουργήθηκε με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του πασσάλου 30 μέτρων με τη μόνη διαφορά ότι οι διαστάσεις για το αμμώδες έδαφος επιλέχθηκαν ίσες με 40m για το μήκος και το βάθος.

Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου εκτιμήθηκε περίπου στα 6000 kN από το διάγραμμα καμπύλης φορτίου-μετατόπισης και επιλέχθηκε ως φορτίο λειτουργίας στην κεφαλή του πασσάλου το φορτίο των 3000 kN (περίπου το μισό της φέρουσας ικανότητας). Τα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω εξήχθησαν μέσα από αναλύσεις για λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$, συντελεστή αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις, οι αξονικές δυνάμεις και η πλευρική τριβή θα παρουσιαστούν για μη-μόνιμη θερμική ροή χρονικής διάρκειας 6 μηνών (transient state) σε συνθήκες μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή ίση με 0 kN και 3000 kN.

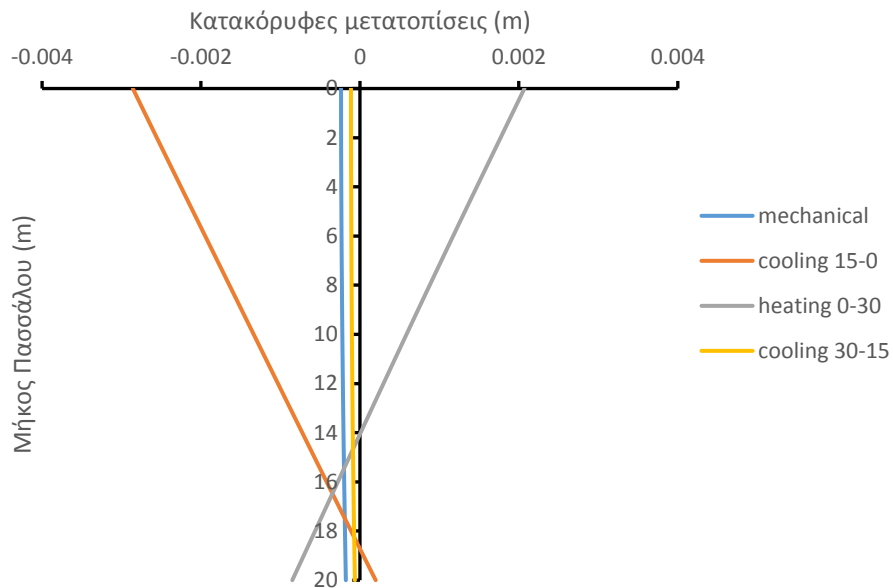


Σχήμα 6.9.3 Διάγραμμα καμπύλης φορτίου-μετατόπισης πασσάλου μήκους 20m.

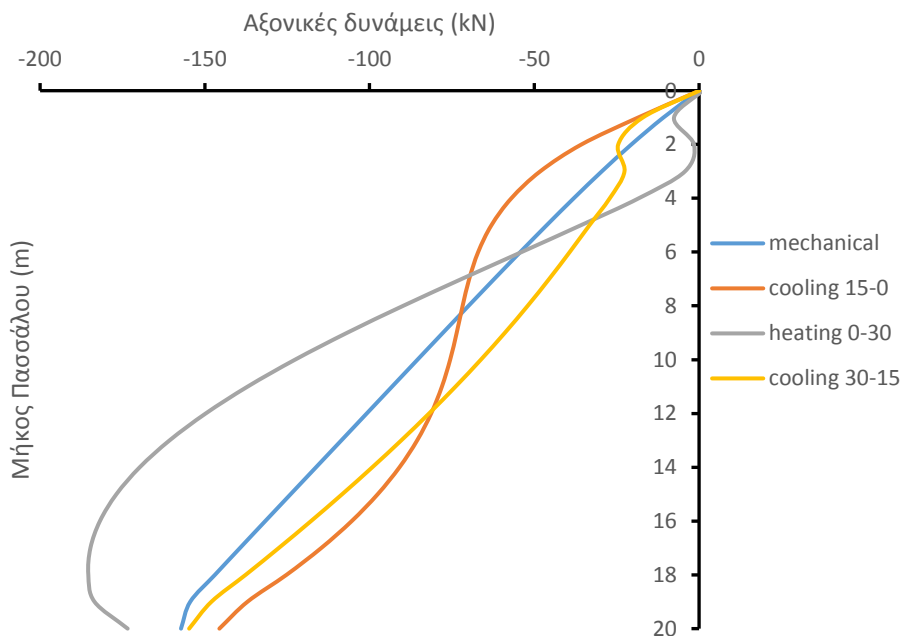


Σχήμα 6.9.2. Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων μεμονωμένου πασσάλου μήκους 20m και διαμέτρου 1m.

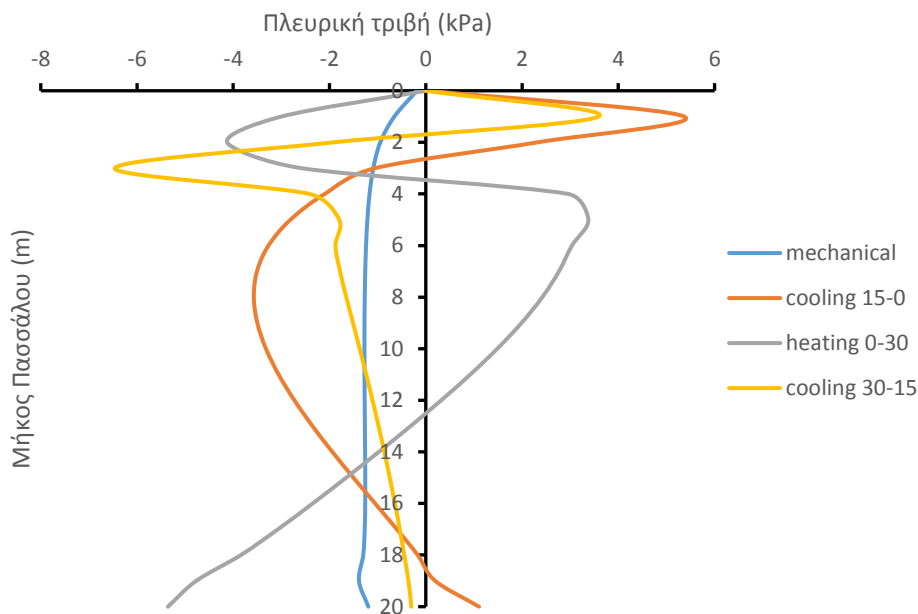
Χωρίς μηχανική φόρτιση



Σχήμα 6.9.3) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων πασσάλου μήκους 20m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.9.4) Κατανομή αξονικών δυνάμεων πασσάλου μήκους 20m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.



Σχήμα 6.9.5) Κατανομή πλευρικής τριβής πασσάλου μήκους 20m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.

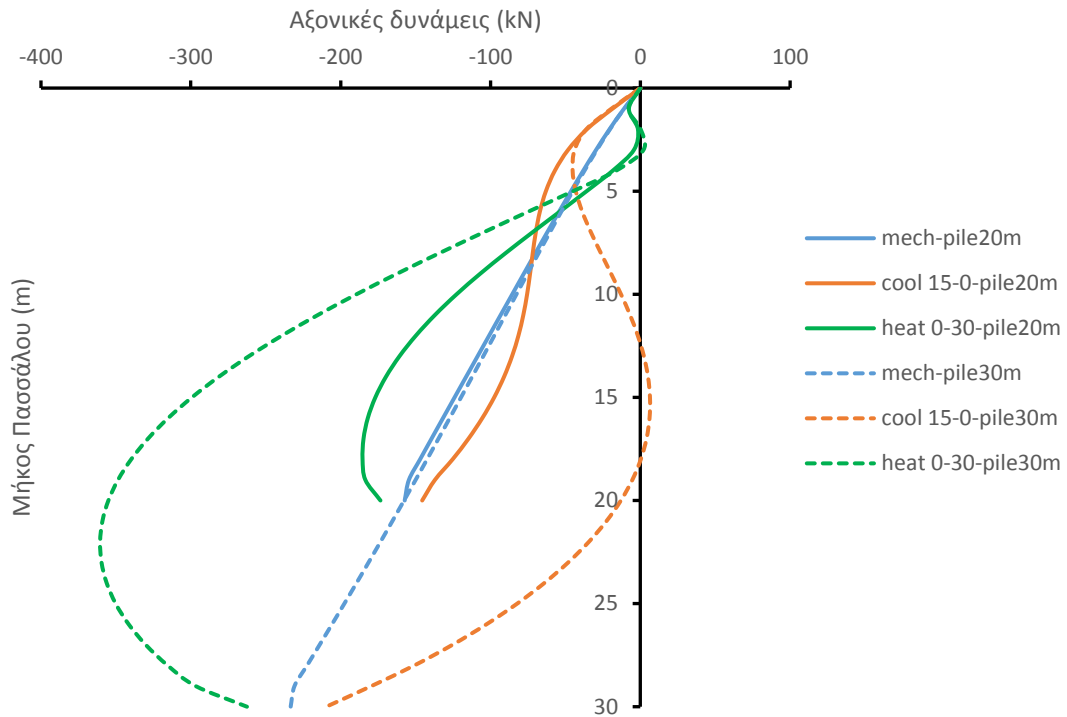
Από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.9.3) παρατηρείται ότι για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η ψύξη του πασσάλου από του 15 °C στους 0 °C προκαλεί αρνητικές κατακόρυφες μετατοπίσεις στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη καθίζηση να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου) και θετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις στην αιχμή. Αντιθέτως, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί θετικές μετατοπίσεις στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου (με τη μεγαλύτερη θετική μετατόπιση να απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου) και καθιζήσεις στην αιχμή. Επιπρόσθετα, για έλλειψη μηχανικής φόρτισης, η ψύξη του πασσάλου από του 30 °C στους 15°C προκαλεί ανεπαίσθητες αρνητικές μετατοπίσεις σχεδόν παρόμοιες στην αριθμητική τιμή και στη μορφή με αυτές που προϋπήρχαν χωρίς τη θερμική μεταβολή. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι με την μεταβολή του μήκους του πασσάλου δεν προκαλούνται αλλαγές στην κατανομή των αποτελεσμάτων των κατακόρυφων μετατοπίσεων με την επίδραση του κύκλου των θερμικών φορτίσεων για μηδενικό επιβαλλόμενο φορτίο, αλλά η κατανομή τους είναι παρόμοια με αυτήν του κεφαλαίου 6.1 για μήκος πασσάλου ίσο με 30m.

Επιπροσθέτως, όσον αφορά τις τιμές των αξονικών δυνάμεων για έλλειψη μηχανικής φόρτισης (βλ. Σχήμα 6.9.4) η αρχική ψύξη του πασσάλου από 15 °C στους 0 °C προκαλεί μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο άνω μέρος μήκος του πασσάλου ($z < 8\text{m}$) και μικρότερες αξονικές δυνάμεις στο κάτω μέρος του ($z > 8\text{m}$). Αντιθέτως, η θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί μικρότερες αξονικές δυνάμεις στο άνω μέρος μήκος του πασσάλου ($z < 6\text{m}$) και μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο κάτω μέρος του ($z > 6\text{m}$) από τις αντίστοιχες της μηχανικής φόρτισης. Τέλος, για απουσία μηχανικής φόρτισης, η τελική ψύξη του πασσάλου από τους 30 °C στους 15 °C επιφέρει μικρότερες αξονικές δυνάμεις σε σύγκριση με την αρχική ψύξη κατά μήκος όλου του πασσάλου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παραπλήσια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για τον πάσσαλο μήκους 30 μέτρων που εξετάστηκε παραπάνω στο Κεφάλαιο 6.1 με τη μόνη διαφορά ότι για τον πάσσαλο 20

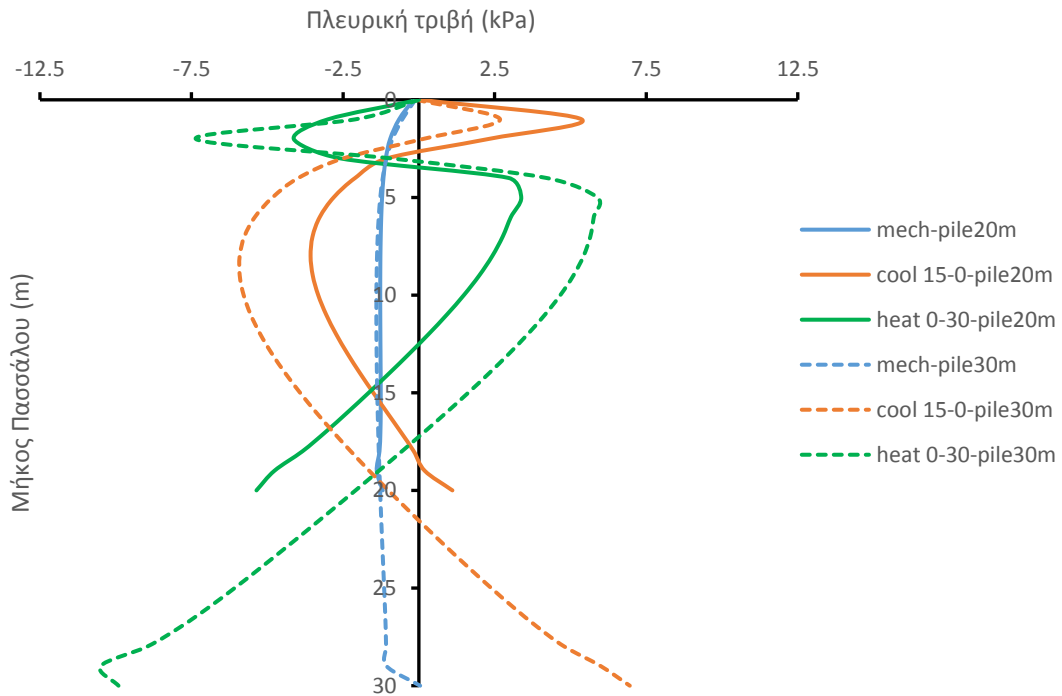
μέτρων η χρονική διάρκεια φόρτισης των έξι μηνών επιφέρει μικρότερου μεγέθους συστολή ή διαστολή στον πάσσαλο συγκριτικά σε σχέση με το έδαφος. Το γεγονός αυτό προκαλεί τη γένεση πρόσθετων θλιπτικών και εφελκυστικών αξονικών τάσεων στο άνω μέρος του πασσάλου οι οποίες προκαλούν την αύξηση της αξονικών δυνάμεων για την αρχική ψύξη και την μείωση τους για τη θέρμανση αντίστοιχα. Ωστόσο, διατυπώνεται το συμπέρασμα ότι σε ένα γενικό πλαίσιο η αλλαγή του μήκους πασσάλου δεν καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιρροή των θερμικών φορτίσεων στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου για απουσία μηχανικής φόρτισης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην έρευνα του ο Rui Assunção (2014) κατέληξε σε παραπλήσιο συμπέρασμα. Στη μελέτη του εξέτασε την συμπεριφορά των αξονικών τάσεων για μήκη ελεύθερων μεμονωμένων πασσάλων 15, 30, 45 μέτρων τα οποία υποβλήθηκαν σε θέρμανση με $\Delta T = +30$ για μόνιμο χρονικό διάστημα θερμικής φόρτισης και με απουσία μηχανικού φορτίου.

Βάσει του διαγράμματος (βλ. Σχήμα 6.9.5) όσον αφορά την κατανομή της πλευρικής τριβής προκύπτει ότι για απουσία μηχανικής φόρτισης στην αρχική ψύξη η πλευρική τριβή που παράγεται στην κορυφή και κοντά στην αιχμή του πασσάλου για ($z < 3,5\text{m}$) και ($z > 16\text{m}$) εμφανίζει μικρότερες τιμές από αυτή που παράγεται από το ίδιο βάρος χωρίς παρουσία θερμικής φόρτισης με ορισμένες τιμές μάλιστα να έχουν αντίστροφο πρόσημο (θετικές τιμές), ενώ αυτές που δημιουργούνται στο υπόλοιπο μήκος του από ($z = 3,5 - 16\text{m}$) εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές. Αντιθέτως, για τη θέρμανση παρατηρείται η ανάστροφη συμπεριφορά δηλαδή, η πλευρική τριβή που δημιουργείται στην κορυφή και κοντά στην αιχμή του πασσάλου για ($z < 3,5\text{m}$) και ($z > 16\text{m}$) εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από την αντίστοιχη της μηχανικής φόρτισης, ενώ αυτή που παράγεται στο υπόλοιπο μέρος του από ($z = 3,5 - 16\text{m}$) παρουσιάζει μικρότερες τιμές με ορισμένες από αυτές να εμφανίζουν και αντίθετο πρόσημο. Επιπλέον, όσον αφορά την τελική ψύξη από τους $30\text{ }^\circ\text{C}$ στους $15\text{ }^\circ\text{C}$ οι τιμές της πλευρικής τριβής είναι μεγαλύτερες από αυτές της πλευρικής τριβής του ίδιου βάρους στο άνω μέρος του πασσάλου ($z = 2 - 10\text{m}$) και μικρότερες στην κορυφή ($z < 2\text{m}$) όπου αποκτούν και αντίθετο πρόσημο και στο κάτω μέρος του πασσάλου ($z > 10\text{m}$). Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στην κατανομή της πλευρικής τριβής που προέκυψε από την ανάλυση του πασσάλου μήκους 30m με αποτέλεσμα να εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του μήκους πασσάλου δεν διαφοροποιεί την επιρροή των θερμικών φορτίσεων τη φορά των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια και κατ' επέκταση την κατανομή της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου για το ίδιο βάρος του πασσάλου. Αξίζει να επισημανθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά για την πλευρική τριβή βρέθηκε και στην έρευνα του Rui Assunção (2014) για μήκη ελεύθερων μεμονωμένων πασσάλων 15, 30, 45 μέτρα σε καθεστώς μόνιμης ροής θέρμανσης και απουσίας μηχανικής φόρτισης.

Παρακάτω στα σχήματα 6.9.6 και 6.9.7 παραθέτονται μεγέθη των αξονικών δυνάμεων και της πλευρικής τριβής για μήκη πασσάλου 20 και 30 μέτρων με την επιβολή μη-μόνιμης ψύξης $15\text{ }^\circ\text{C} - 0\text{ }^\circ\text{C}$ και θέρμανσης $0\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$ χωρίς μηχανική φόρτιση για την επαλήθευση των παραπάνω συμπερασμάτων.

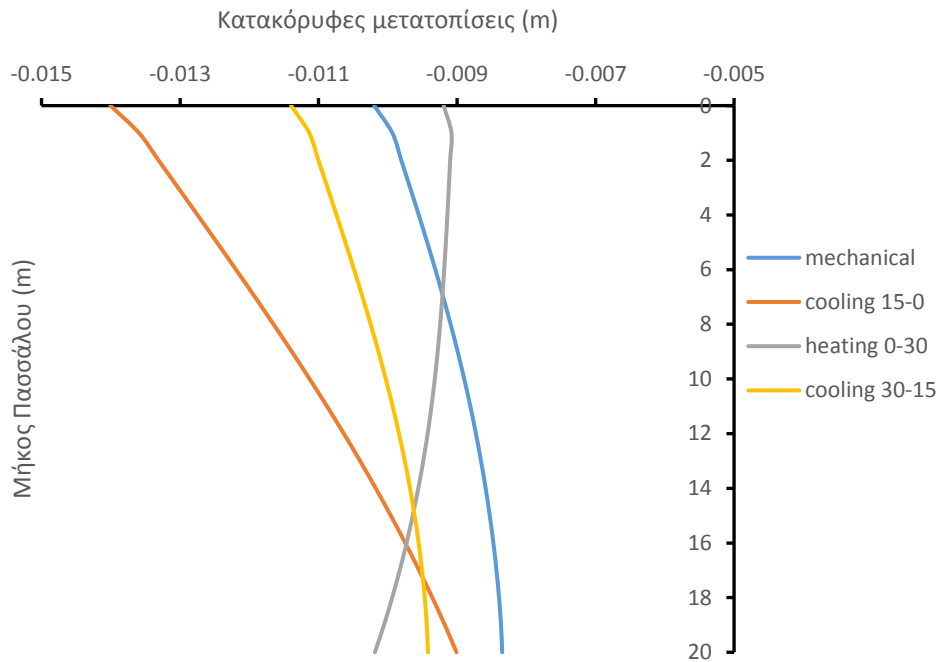


Σχήμα 6.9.6) Κατανομή αξονικών δυνάμεων πασσάλων μήκους 20m και 30m για ψύξη 15 °C - 0 °C και θέρμανση 0 °C - 30 °C μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.

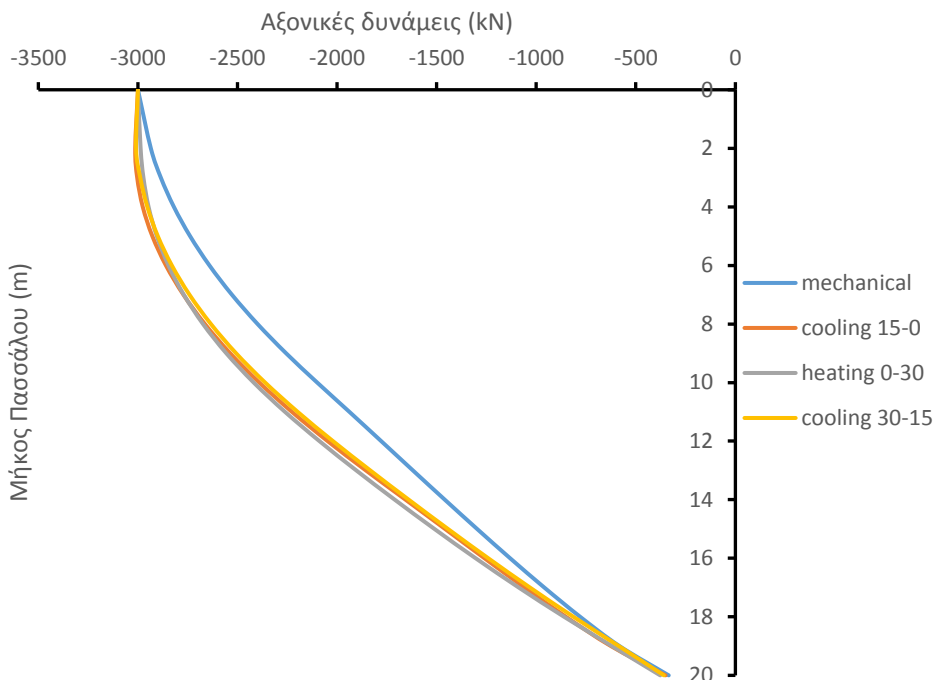


Σχήμα 6.9.7) Κατανομή πλευρικής τριβής πασσάλων μήκους 20m και 30m για ψύξη 15 °C - 0 °C και θέρμανση 0 °C - 30 °C μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση.

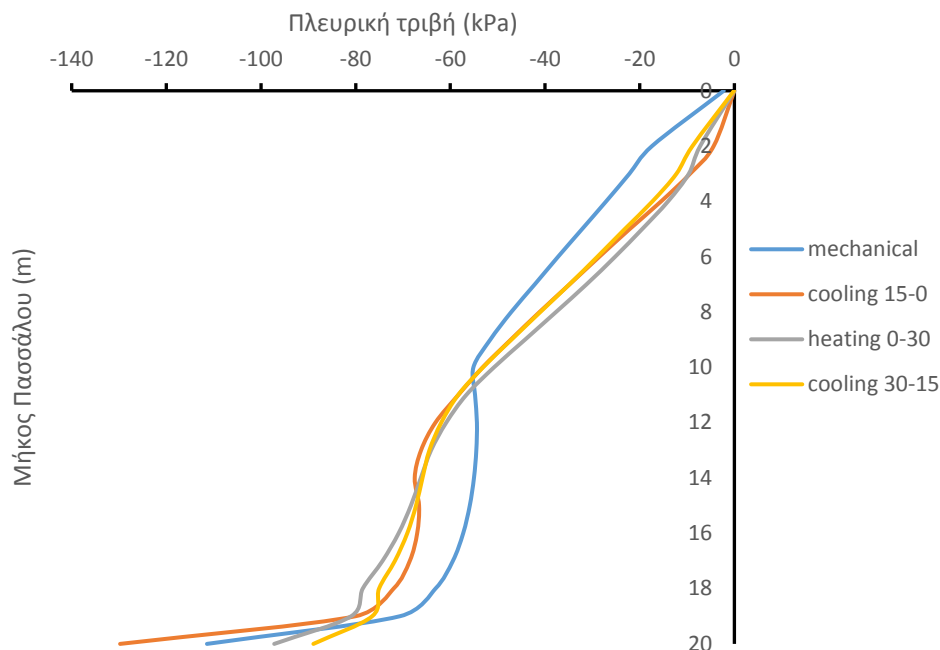
Επιβολή μηχανικής φόρτισης 3000 kN



Σχήμα 6.9.8) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων πασσάλου μήκους 20m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και επιβολή μηχανικής φόρτισης 3000 kN.



Σχήμα 6.9.9) Κατανομή αξονικών δυνάμεων πασσάλου μήκους 20m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και επιβολή μηχανικής φόρτισης 3000 kN.



Σχήμα 6.9.10) Κατανομή πλευρικής τριβής πασσάλου μήκους 20m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και επιβολή μηχανικής φόρτισης 3000 kN.

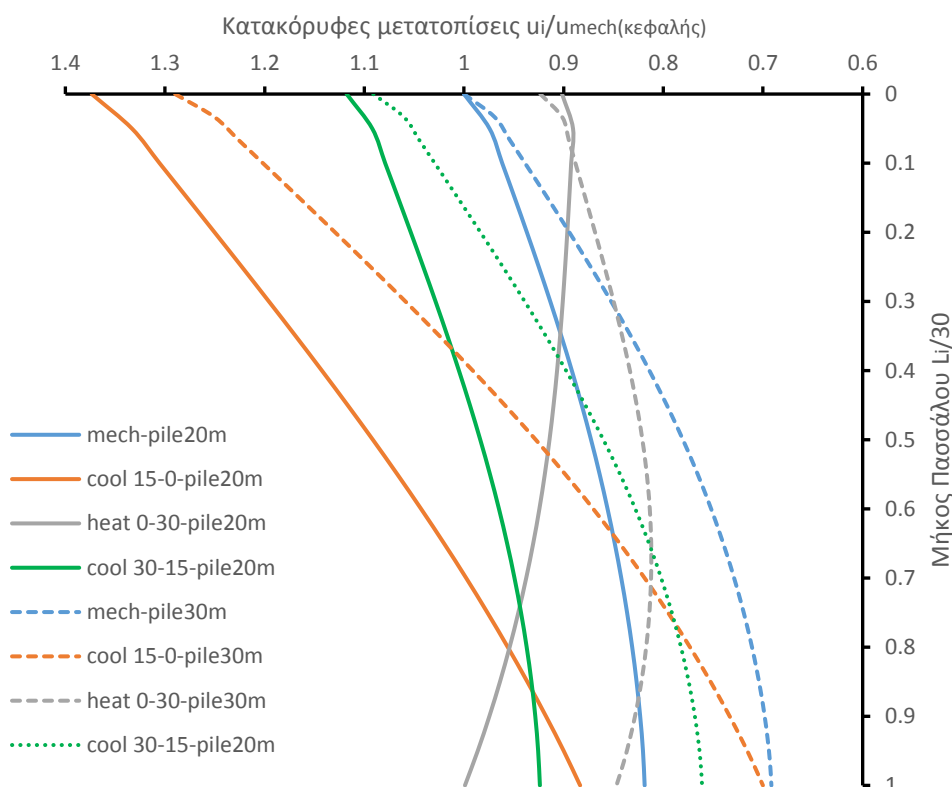
Μέσα από το Σχήμα 6.9.8. παρατηρείται ότι φόρτιση 3000 kN, η ψύξη από του 15 °C στους 0 °C δίνει μεγαλύτερες καθιζήσεις από τη μηχανική καθίζηση σε όλο το μήκος του πασσάλου λόγω της συστολής που υφίσταται ο πάσσαλος. Επίσης, η θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C προκαλεί μικρότερες καθιζήσεις από τη μηχανική καθίζηση στο άνω τμήμα και μεγαλύτερες στο κάτω τμήμα του πασσάλου λόγω της διαστολής που υφίσταται ο πάσσαλος. Επιπλέον, η ψύξη από του 30 °C στους 15 °C δίνει μεγαλύτερες καθιζήσεις από τη μηχανικές σε όλο το μήκος του πασσάλου λόγω της συστολής που υφίσταται η επιφάνεια του πασσάλου, οι οποίες έχουν ίδια μορφή με τις καθιζήσεις της μηχανικής φόρτισης, λόγω της ταύτισης της θερμοκρασίας του πασσάλου μετά από την ψύξη με την αρχική θερμοκρασία. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι το με την αλλαγή του μήκους του πασσάλου δεν προκαλούνται διαφοροποιήσεις στην κατανομή των αποτελεσμάτων των κατακόρυφων μετατοπίσεων με την επίδραση των θερμικών φορτίσεων για το φορτίο λειτουργίας, αλλά η κατανομή τους είναι παρόμοια με αυτήν του κεφαλαίου 6.1 για μήκος πασσάλου ίσο με 30m.

Επιπλέον, από το Σχήμα 6.9.9. φαίνεται ότι με την τοποθέτηση μηχανικής φόρτισης 3000 kN στην κεφαλή του πασσάλου, παρουσιάζονται παρόμοιες αξονικές δυνάμεις για τις 3 θερμικές φορτίσεις (αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C, μετέπειτα θέρμανση από τους 0 °C στους 30 °C και τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C) κατά μήκος του πασσάλου οι οποίες είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκαλούνται με τη επίδραση μηχανικής φόρτισης χωρίς την επιβολή θερμικής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παραπλήσια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για τον πάσσαλο μήκους 30m που εξετάστηκε παραπάνω με τη μόνη διαφορά ότι στον πάσσαλο 20m οι διαφορές που εμφανίζονται ανάμεσα στις αξονικές δυνάμεις που

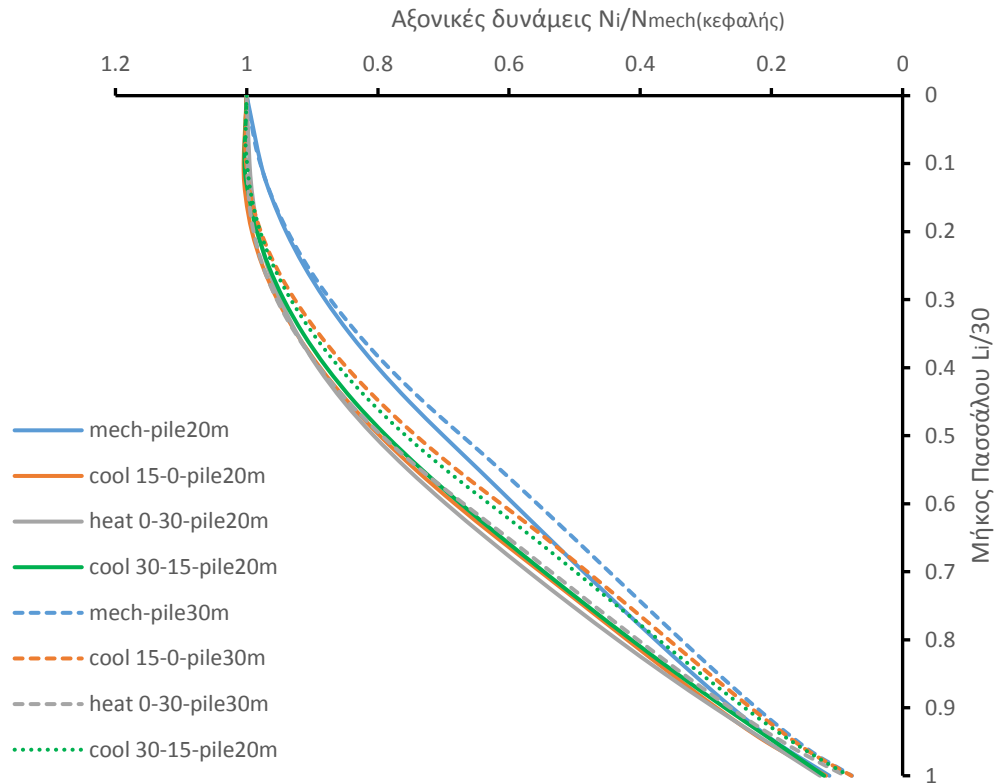
προκύπτουν από τις τρεις θερμικές φορτίσεις είναι ελαφρώς μικρότερες. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή του μήκους πασσάλου δεν καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιρροή των θερμικών φορτίσεων στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου για το φορτίο λειτουργίας.

Τέλος μέσα από το Σχήμα 6.9.10. φαίνεται ότι οι παραγόμενες αριθμητικές τιμές πλευρικής τριβής και των 3 θερμικών φορτίσεων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και είναι μικρότερες σε σύγκριση με αυτές της μηχανικής φόρτισης στο άνω μέρος του πασσάλου ($z < 10\text{m}$) και μεγαλύτερες στο κάτω μέρος του πασσάλου ($z > 10\text{m}$). Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στην κατανομή της πλευρικής τριβής που προέκυψε από την ανάλυση του πασσάλου μήκους 30m με αποτέλεσμα να εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του μήκους πασσάλου δεν διαφοροποιεί την επιρροή των θερμικών φορτίσεων στην κατανομή της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου για το φορτίο λειτουργίας.

Παρακάτω στα σχήματα 6.9.11 και 6.9.12 παραθέτονται σε κανονικοποιημένη μορφή τα εξεταζόμενα μεγέθη των κατακόρυφων μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων για μήκη πασσάλου 20 και 30 μέτρων με την επιβολή του φορτίου λειτουργίας στην εκάστοτε περίπτωση για την επαλήθευση των παραπάνω συμπερασμάτων.



Σχήμα 6.9.11) Κατανομή κανονικοποιημένων κατακόρυφων μετατοπίσεων πασσάλου μήκους 20m και 30m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών με επιβολή μηχανικής φόρτισης ίση με το φορτίο λειτουργίας για τον εκάστοτε πάσσαλο.

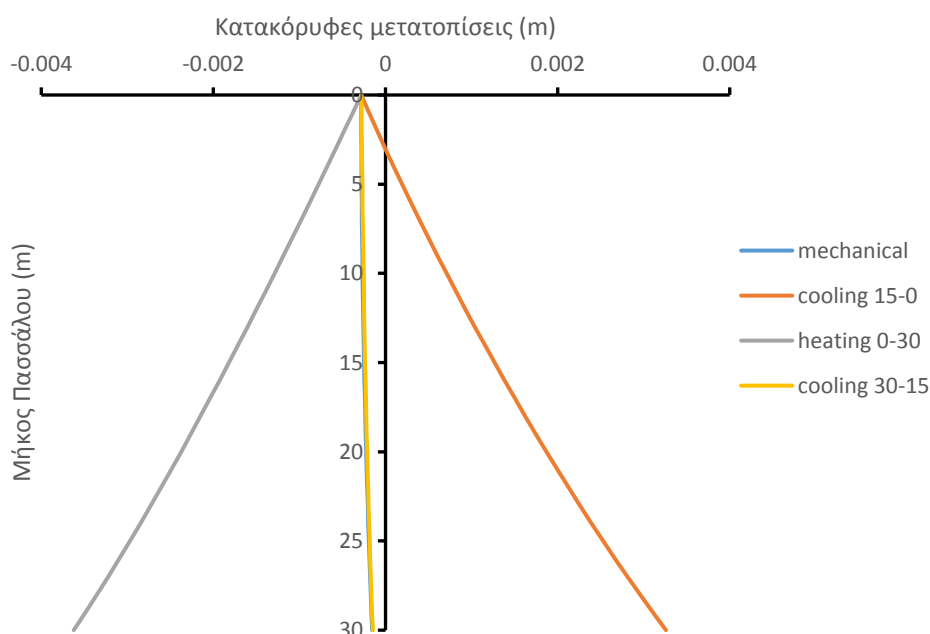


Σχήμα 6.9.12) Κατανομή κανονικοποιημένων αξονικών δυνάμεων πασσάλων μήκους 20m και 30m για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών με επιβολή μηχανικής φόρτισης ίση με το φορτίο λειτουργίας για τον εκάστοτε πάσσαλο.

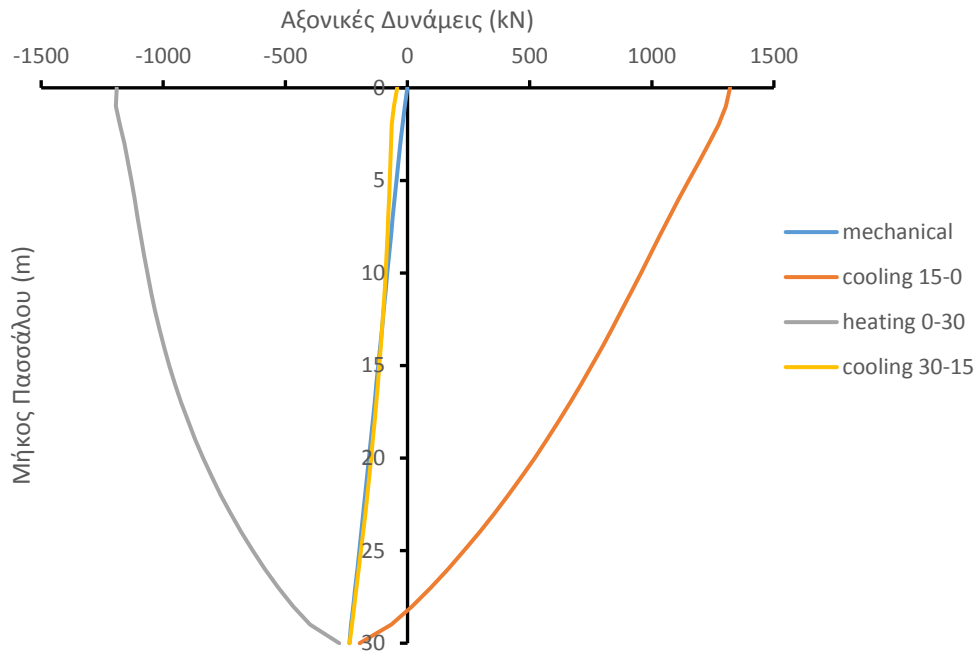
6.10) Επιρροή της δέσμευσης της κεφαλής του πασσάλου

Η τοποθέτηση δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου στη μηχανική ανάλυση της προσομοίωσης, η οποία δεν επιτρέπει τις κατακόρυφες μετακινήσεις στην κεφαλή του πασσάλου, πραγματοποιείται με την εισαγωγή μιας εξαναγκασμένης μετατόπισης στο βήμα της φόρτισης (step loading) με την μορφή συνοριακής συνθήκης (boundary condition). Ειδικότερα, αυτή ισούται με την καθίζηση που προέκυψε στην κεφαλή του πασσάλου, υπό την επίδραση μιας μηχανικής φόρτισης, από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για ελεύθερο πάσσαλο στο (κεφάλαιο 6.1) των αποτελεσμάτων και αντικαθιστά την φόρτιση που ασκήθηκε στην κεφαλή. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η δέσμευση της κεφαλής του πασσάλου δεν δημιουργεί διαφοροποιήσεις στην προσομοίωση της θερμικής ανάλυσης του προγράμματος.

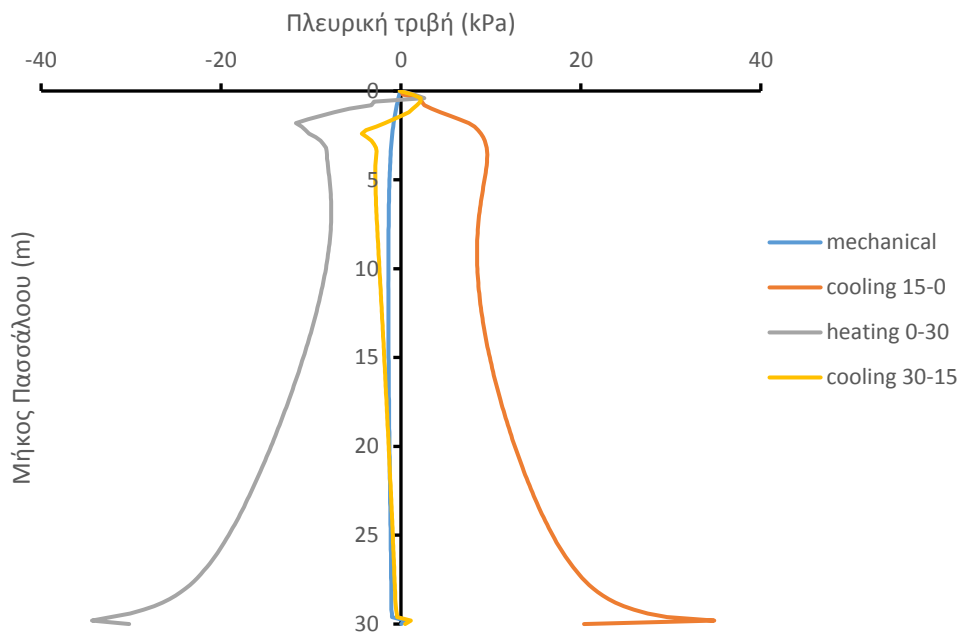
Τα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω εξήχθησαν μέσα από αναλύσεις για λόγο θερμικής διόγκωσης $\alpha_s/\alpha_p = 3$, συντελεστή αγωγιμότητας $\lambda = 2.5(\text{W/m/K})$ και συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p = 1200(\text{J/kg/K})$. Οι καθιζήσεις, οι αξονικές δυνάμεις και οι διατμητικές τάσεις θα παρουσιαστούν για τον κύκλο μη-μόνιμης θερμικής φόρτισης χρονικού διαστήματος 6 μηνών (transient state) του Κεφαλαίου 6.1. σε συνθήκες μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή ίση με 0 kN και 6000 kN.



Σχήμα 6.10.1) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση για δεσμευμένη κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 6.10.2) Κατανομή αξονικών για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση για δεσμευμένη κεφαλή του πασσάλου.



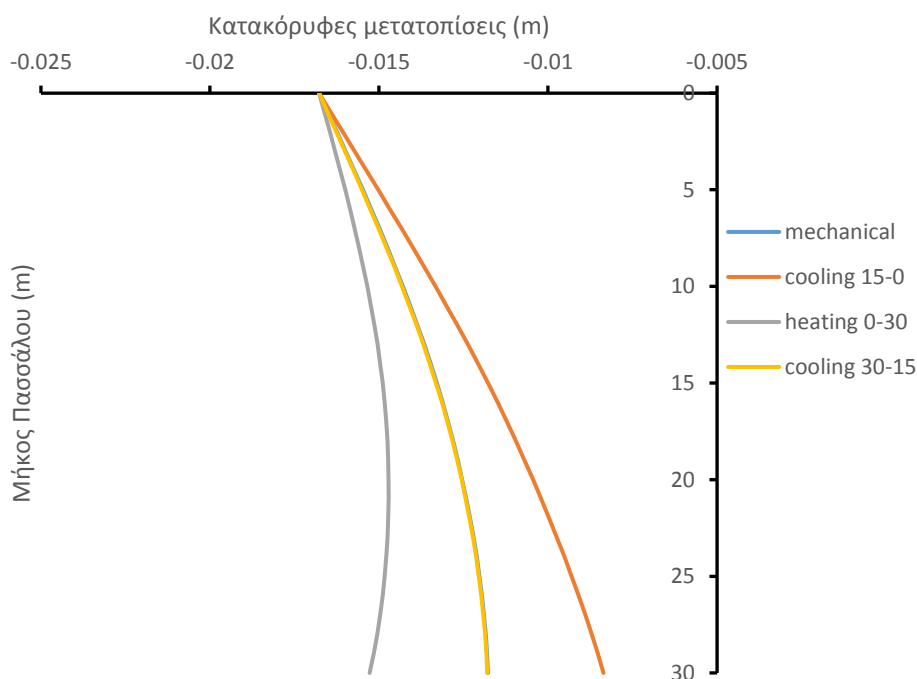
Σχήμα 6.10.3) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμων ροής διάρκειας 6 μηνών χωρίς μηχανική φόρτιση για δεσμευμένη κεφαλή του πασσάλου.

Από το Σχήμα 6.10.1 παρατηρείται ότι η κατακόρυφη μετατόπιση στην κεφαλή του πασσάλου είναι για όλες τις θερμικές φορτίσεις ίδια και ίση με την εξαναγκασμένη μετατόπιση που ορίστηκε για την προσομοίωση του προβλήματος όπως και αναμένεται. Επιπλέον, κατά την ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C προκαλούνται θετικές μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη συστολή που υφίσταται ο πάσσαλος με αποτέλεσμα να ανυψώνεται η αιχμή του με δεδομένο όπως προαναφέρθηκε ότι η κεφαλή του είναι δεσμευμένη. Επιπρόσθετα, κατά τη θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C παρουσιάζονται αρνητικές μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη διαστολή που υφίσταται ο πάσσαλος με αποτέλεσμα να καθιζάνει η αιχμή του με δεδομένο όπως προαναφέρθηκε ότι η κεφαλή του είναι δεσμευμένη. Τέλος, κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C παρατηρούνται παραπλήσιες καθιζήσεις με αυτές που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης, λόγω του παραπλήσιου θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει μετά τη τελική ψύξη με το αρχικό των 15 °C. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου τροποποιεί σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων σε σύγκριση με αυτήν που συναντάται στον ελεύθερο πάσσαλο και πιο συγκεκριμένα αντιστρέφει το πρόσημο τους με την ψύξη-θέρμανση.

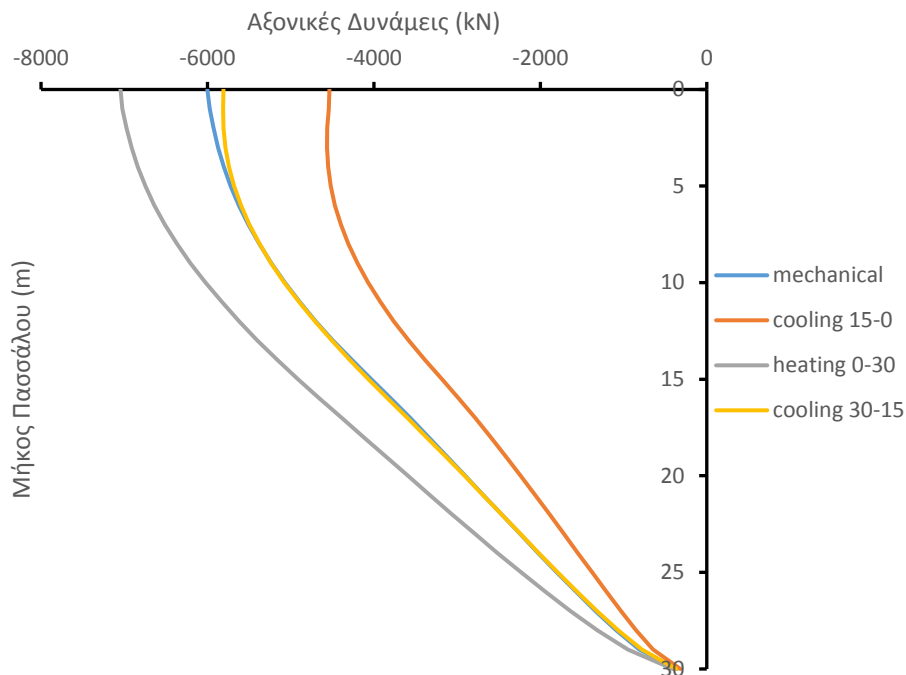
Μέσα από το Σχήμα 6.10.2 φαίνεται ότι αξονικές δυνάμεις που προκύπτουν από την αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C είναι θετικές με τη μεγαλύτερη τιμή να απαντάται στην κεφαλή του. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου η οποία παρεμποδίζει τη συστολή που τείνει να εμφανιστεί με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλου μεγέθους εφελκυστικών αξονικών δυνάμεων. Επιπλέον, κατά τη θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C οι αξονικές δυνάμεις είναι αρνητικές με τη μεγαλύτερη τιμή να βρίσκεται στην κεφαλή του. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται εξαιτίας της δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου η οποία παρεμποδίζει τη διαστολή που τείνει να δημιουργηθεί με αποτέλεσμα τη δημιουργία δυσμενέστερων θλιπτικών αξονικών δυνάμεων στην κεφαλή του πασσάλου. Τέλος, κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C παρατηρούνται παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις με αυτές που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης, λόγω του παραπλήσιου θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει μετά τη τελική ψύξη με το αρχικό των 15 °C. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των αξονικών δυνάμεων σε σύγκριση με αυτήν που συναντάται στον ελεύθερο πάσσαλο. Η κύρια διαφορά απαντάται στην κεφαλή του πασσάλου όπου παρουσιάζεται σημαντική αύξηση στο αριθμητικό μέγεθος των αξονικών δυνάμεων (παραπάνω από τριπλάσιες οι αξονικές δυνάμεις που προκύπτουν κατά την ψύξη –θέρμανση στην κεφαλή του πασσάλου με την παρουσία δέσμευσης). Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στη μεγαλύτερη θλίψη που υφίσταται ο πάσσαλος κατά την αρχική ψύξη εξαιτίας της δέσμευσης στην κεφαλή και αντίστοιχα στο μεγαλύτερο εφελκυσμό που δημιουργείται κατά τη θέρμανση. Ακόμα, για όλες τις θερμικές φορτίσεις οι αξονικές δυνάμεις εκτονώνονται στην αιχμή του πασσάλου.

Από το Σχήμα 6.10.3 παρατηρείται ότι τιμές της πλευρικής τριβής που εμφανίζονται κατά την αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C είναι θετικές, γεγονός

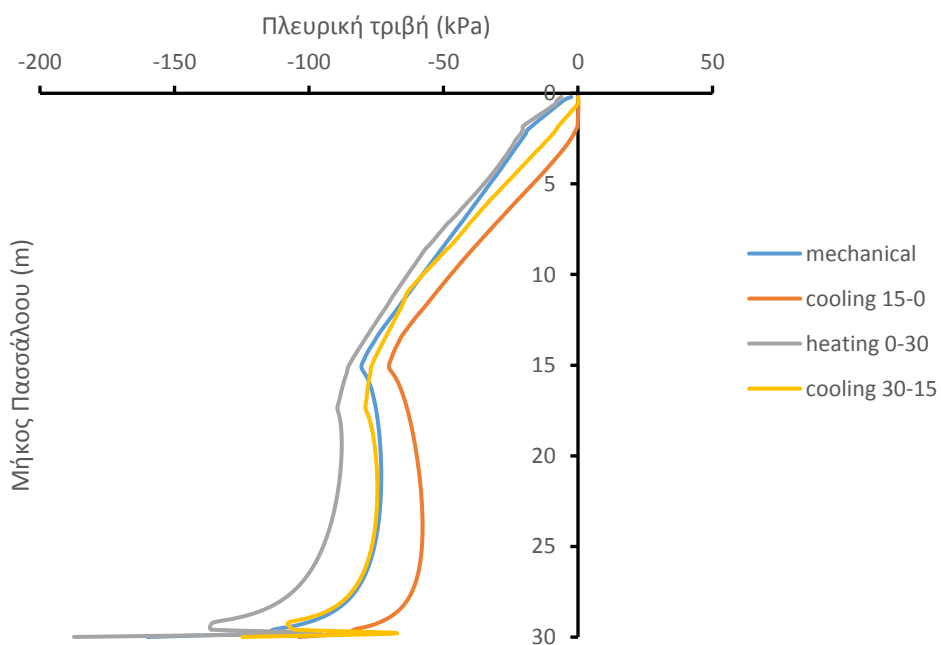
που οφείλεται στην παρεμπόδιση της συστολής του πασσάλου στη κορυφή λόγω της δέσμευσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα κάτω σε όλο το μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους. Αντίστροφα, κατά την θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C οι τιμές της πλευρικής τριβής είναι αρνητικές, γεγονός που οφείλεται στην παρεμπόδιση της διαστολής του πασσάλου στη κορυφή λόγω της δέσμευσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω στη διεπιφάνεια. Τέλος, κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C παρουσιάζεται παραπλήσια πλευρική τριβή (δηλαδή διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω) με αυτή που προκύπτει από το ίδιο βάρος χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης, λόγω του παραπλήσιου θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει μετά τη τελική ψύξη με το αρχικό των 15 °C. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου τροποποιεί σε μεγάλο βαθμό τη φορά των διατμητικών τάσεων και κατ' επέκταση της πλευρικής τριβής σε σύγκριση με αυτήν που συναντάται στον ελεύθερο πάσσαλο ιδιαίτερα στο κάτω τμήμα του πασσάλου όπου αντιστρέφεται η φορά των διατμητικών τάσεων.



Σχήμα 6.10.4) Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης για δεσμευμένη κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 6.10.5) Κατανομή αξονικών δυνάμεων για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης για δεσμευμένη κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 6.10.6) Κατανομή πλευρικής τριβής για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης μη-μόνιμης ροής διάρκειας 6 μηνών και υπό την επίδραση 6000 kN μηχανικής φόρτισης για δεσμευμένη κεφαλή του πασσάλου.

Από το Σχήμα 6.10.4 παρατηρείται ότι η καθίζηση στην κεφαλή του πασσάλου για όλες τις θερμικές φορτίσεις του κύκλου είναι ίσες με την εξαναγκασμένη μετατόπιση που ορίστηκε για την προσομοίωση του προβλήματος όπως και αναμένεται. Επιπλέον, κατά την ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C προκαλούνται καθιζήσεις μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται σε περίπτωση μεμονωμένης μηχανικής φόρτωσης κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη συστολή που υφίσταται ο πάσσαλος με αποτέλεσμα να ανυψώνεται η αιχμή του με δεδομένο όπως προαναφέρθηκε ότι η κεφαλή του είναι δεσμευμένη. Επιπρόσθετα, κατά τη θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C παρουσιάζονται καθιζήσεις μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μηχανικές κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που οφείλεται στη διαστολή που παθαίνει ο πάσσαλος με αποτέλεσμα να καθιζάνει η αιχμή του με δεδομένο όπως προαναφέρθηκε ότι η κεφαλή του είναι δεσμευμένη. Τέλος, κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C παρατηρούνται παραπλήσιες καθιζήσεις με αυτές που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης, λόγω του παραπλήσιου θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει μετά τη τελική ψύξη με το αρχικό των 15 °C. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου τροποποιεί σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων σε σύγκριση με αυτήν που συναντάται στον ελεύθερο πάσσαλο και πιο συγκεκριμένα αντιστρέφει τη συμπεριφορά των κατακόρυφων μετατοπίσεων για τις θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση).

Μέσα από το Σχήμα 6.10.5 φαίνεται ότι αξονικές δυνάμεις που προκύπτουν από την αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C είναι μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται στην περίπτωση μηχανικής φόρτισης χωρίς την παρουσία θερμικής, με τη μεγαλύτερη αριθμητική τιμή να απαντάται στην κεφαλή του. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου η οποία παρεμποδίζει τη συστολή που τείνει να εμφανιστεί με αποτέλεσμα την εμφάνιση αρκετά μικρότερου μεγέθους θλιπτικών αξονικών τάσεων στην κεφαλή του πασσάλου. Αντιθέτως, κατά τη θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C οι αξονικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της μεμονωμένης μηχανικής φόρτισης με τη μέγιστη τιμή να βρίσκεται στην κεφαλή του. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται εξαιτίας της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου η οποία παρεμποδίζει τη διαστολή που τείνει να δημιουργηθεί με αποτέλεσμα την εμφάνιση στην κεφαλή δυσμενέστερων θλιπτικών αξονικών τάσεων. Τέλος, κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C παρατηρούνται παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις με αυτές που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης, λόγω του παραπλήσιου θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει μετά τη τελική ψύξη με το αρχικό των 15 °C. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των αξονικών δυνάμεων σε σύγκριση με αυτήν που συναντάται στον ελεύθερο πάσσαλο. Ειδικότερα, η κύρια διαφορά συναντάται στην κεφαλή του πασσάλου όπου εμφανίζεται σημαντική μείωση ή αύξηση στο αριθμητικό μέγεθος των αξονικών δυνάμεων με την επιρροή της ψύξης και της θέρμανσης αντίστοιχα. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στην παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου που ενισχύει τις πρόσθετες θλιπτικές και εφελκυστικές αξονικές τάσεις που δέχεται ο πάσσαλος κατά την ψύξη και τη θέρμανση αντίστοιχα. Ακόμα, για όλες τις θερμικές φορτίσεις οι αξονικές δυνάμεις εκτονώνονται στην αιχμή του πασσάλου όπως και στον ελεύθερο πάσσαλο.

Από το Σχήμα 6.10.6 παρατηρείται ότι οι τιμές της πλευρικής τριβής που εμφανίζονται κατά την αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση, γεγονός που οφείλεται στην παρεμπόδιση της συστολής του πασσάλου στη κορυφή λόγω της δέσμευσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες εφελκυστικές αξονικές τάσεις σε όλο το μήκος του πασσάλου εξαιτίας της ψύξης. Αντίστροφα, κατά την θέρμανση του πασσάλου από τους 0 °C στους 30 °C η πλευρική τριβή είναι μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζεται υπό την επιβολή μηχανικής φόρτισης με απουσία θερμικής φόρτισης, γεγονός που οφείλεται στην παρεμπόδιση της διαστολής του πασσάλου στην κεφαλή λόγω της δέσμευσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπρόσθετες θλιπτικές αξονικές τάσεις σε όλο το μήκος του πασσάλου λόγω της θέρμανσης. Τέλος, κατά την τελική ψύξη από τους 30 °C στους 15 °C παρουσιάζονται παραπλήσιες αριθμητικές τιμές πλευρικής τριβής με αυτές που προκύπτουν από τη μηχανική φόρτιση χωρίς την παρουσία θερμικής φόρτισης, λόγω του παραπλήσιου θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει μετά τη τελική ψύξη με το αρχικό των 15 °C. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η παρουσία της δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου τροποποιεί σε μεγάλο βαθμό την κατανομή της πλευρικής τριβής σε σύγκριση με αυτήν που συναντάται στον ελεύθερο πάσσαλο καθώς η πλευρική τριβή είναι ομοιόμορφα μεγαλύτερη ή μικρότερη κατά την θέρμανση και την ψύξη αντίστοιχα από την μηχανική πλευρική τριβή που εμφανίζεται στον πάσσαλο.

7.Γενικά Συμπεράσματα

Ως επίλογος αυτής της διπλωματικής εργασίας, διατυπώνονται σε αυτό το κεφάλαιο τα πιο βασικά και σημαντικά χαρακτηριστικά για την απόκριση του μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου τα οποία προέκυψαν μέσω των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Αρχικά, για την εκτέλεση των αναλύσεων και την εύρεση αποτελεσμάτων με υψηλή ακρίβεια δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο διαμορφώθηκε με σκοπό να αποδίδει αποτελέσματα που να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Το αντικείμενο που εξετάστηκε μέσω της προσομοίωσης των αναλύσεων διαπραγματευόταν τη μηχανική απόκριση ενός μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου σε αμμώδες έδαφος και πιο συγκεκριμένα την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων, αξονικών δυνάμεων και πλευρικής τριβής που προκύπτουν υπό καθεστώς ιδίου βάρους (χωρίς μηχανικό φορτίο) και με σταθερό αξονικό μηχανικό φορτίο κεφαλής, με την επιβολή κύκλων ψύξης-θέρμανσης. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο κύκλος ψύξης-θέρμανσης αποτελούταν από μια αρχική ψύξη του πασσάλου από τους 15 °C στους 0 °C, τη μετέπειτα θέρμανση του από τους 0 °C στους 30 °C και την τελική ψύξη από του 30 °C στου 15 °C για επαναφορά του στην αρχική του θερμοκρασία.

Έπειτα, μέσα από τις αναλύσεις εξετάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα θερμοκρασιακά πεδία που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω της θερμικής φόρτισης του πασσάλου. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η μεταβολή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης ενός ενεργειακού πασσάλου με την επιβολή ψύξης ή θέρμανσης. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επιρροή των συνθηκών δέσμευσης της κεφαλής του πασσάλου (πάσσαλος με ελεύθερη ή πλήρως δεσμευμένη κεφαλή). Επίσης, μελετήθηκε η απόκριση ενός ενεργειακού πασσάλου υπό διαφορετικά σταθερά αξονικά φορτία κεφαλής, η επιρροή του τρόπου θέρμανσης του πασσάλου και της χρονικής διάρκειας της θερμικής φόρτισης. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η επιρροή των θερμικών και μηχανικών παραμέτρων του εδάφους, της θερμικής συνοριακής συνθήκης στην επιφάνεια του εδάφους-πασσάλου καθώς και του μήκους του πασσάλου.

Παρατηρήθηκε ότι τα θερμοκρασιακά πεδία που προκύπτουν από τις θερμικές φορτίσεις μεταβάλλονται με την αλλαγή της χρονικής διάρκειας της φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση του χρονικού διαστήματος της θερμικής φόρτισης αυξάνεται η έκταση της περιοχής που επηρεάζεται.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η επιβολή ψύξης ή θέρμανσης στους ενεργειακούς πασσάλους έχει επίδραση στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Ειδικότερα, με την επιβολή της ψύξης προκαλείται μια μείωση της εκτιμώμενης φέρουσας ικανότητας (περίπου 3%) και με την παρουσία θέρμανσης εμφανίζεται μια αύξηση της εκτιμώμενης φέρουσας ικανότητας (περίπου 3%).

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν όσον αφορά τις υπολογισθείσες κατακόρυφες μετατοπίσεις του ενεργειακού πασσάλου είναι τα εξής:

- Κατά την ψύξη του ελεύθερου πασσάλου οι καθιζήσεις του αυξάνονται στο άνω μέρος του και ελαττώνονται στην αιχμή του λόγω της συστολής που υφίσταται ο πάσσαλος. Αντίστροφα, με τη θέρμανση οι καθιζήσεις του πασσάλου μειώνονται στο άνω μέρος του και αυξάνονται στην αιχμή του λόγω της διαστολής που υφίσταται ο πάσσαλος. Μετά το τελικό βήμα ψύξης και την επιστροφή του πασσάλου στην αρχική θερμοκρασία οι καθιζήσεις είναι παραπλήσιες με τις αρχικές καθιζήσεις λόγω ιδίου βάρους και όσο αυξάνεται το μηχανικό φορτίο τόσο αυξάνονται και οι καθιζήσεις που εμφανίζονται συγκριτικά με τις μηχανικές καθιζήσεις.
- Για μη-μόνιμη (transient) θερμική φόρτιση η προγενέστερη ψύξη του πασσάλου επηρεάζει τις καθιζήσεις που προκύπτουν μετά τη θέρμανση (μεγαλύτερες καθιζήσεις). Σε περίπτωση συνθηκών μόνιμης θερμικής ροής (steady state) δεν προκαλούνται διαφορές λόγω προγενέστερης θερμικής φόρτισης.
- Με την αύξηση της μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου αυξάνονται ομοιόμορφα και οι καθιζήσεις που δημιουργούνται με την επιβολή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση).
- Η αύξηση της χρονικής διάρκειας επιβολής της θερμικής φόρτισης (ψύξη, θέρμανση) αυξάνει το μέγεθος των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου. Πιο συγκεκριμένα οι μεγαλύτερες καθιζήσεις προκύπτουν όταν ο χρόνος γίνεται άπειρος δηλαδή για συνθήκες μόνιμης θερμικής ροής (steady state).
- Η αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης α (m/m/K) του εδάφους αυξάνει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά την ψύξη του πασσάλου, ενώ αντίστροφα τις ελαττώνει κατά την επιβολή θέρμανσης εξαιτίας της μεγαλύτερης συστολής ή διαστολής που υφίσταται το έδαφος αντίστοιχα με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει και τον πάσσαλο. Οι κυριότερες διαφορές συναντώνται για απουσία μηχανικής φόρτισης, ενώ για το φορτίο λειτουργίας παρουσιάζονται μικρές διαφορές στην ψύξη και αμελητέες στη θέρμανση για τη μη-μόνιμη θερμική φόρτιση των 6 μηνών. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα θερμικής φόρτισης τόσο αυξάνεται και η επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης στην τιμή των κατακόρυφων μετατοπίσεων.
- Η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) και του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) του εδάφους δε μεταβάλλει σημαντικά την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων.
- Η ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους δε δημιουργεί σημαντικές μεταβολές στην επιρροή των θερμικών φορτίσεων στις κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου για την επιβολή μόνιμης ή μη-μόνιμης ροής θερμική φόρτιση.
- Η αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής του εδάφους προκαλεί ανεπαίσθητη μείωση στην επιρροή που έχουν οι θερμικές φορτίσεις στις καθιζήσεις λόγω της μεγαλύτερης τριβής που εμφανίζεται στη διεπιφάνεια εδάφους πασσάλου.

- Η μεταβολή του λόγου Poisson ν του εδάφους δεν έχει επιρροή στις κατακόρυφες μετατοπίσεις που προκύπτουν από τις θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση).
- Η ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση προκαλεί αύξηση στις καθιζήσεις της πρώτης θερμικής φόρτισης που εμφανίζονται από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο στην περίπτωση που επιβληθεί αρχικά στον ενεργειακό πάσσαλο θέρμανση, ενώ αν επιβληθεί αρχικά ψύξη παρατηρούνται ανεπαίσθητες μεταβολές στις καθιζήσεις. Ωστόσο από τον δεύτερο κύκλο της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης και μετά παρατηρείται ότι οι καθιζήσεις που προκύπτουν από την ψύξη και τη θέρμανση του πασσάλου δεν επηρεάζονται σημαντικά (περίπου 2.5 %) από την πορεία που θα ακολουθήσει ο θερμικός κύκλος.
- Η προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιώντας σταθερή θερμοκρασία στην επιφάνεια του μοντέλου δύναται να οδηγήσει σε διαφορετικές καθιζήσεις σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διαφορετική θερμοκρασία από την αρχική θερμοκρασία του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, χρήση υψηλότερης θερμοκρασίας στην κορυφή της εδαφικής επιφάνειας προκαλεί μικρότερες καθιζήσεις κατά μήκος του πασσάλου. Η αύξηση του συντελεστή διάγκωσης προκαλεί αύξηση στο μέγεθος της διαφοράς που εμφανίζεται στις τιμές των καθιζήσεων λόγω της προσομοίωσης του προβλήματος με σταθερή θερμοκρασία στην επιφάνεια.
- Η αλλαγή του μήκους του πασσάλου δεν επιφέρει μεταβολές στην επιρροή που προκαλούν οι θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση) στην κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου.
- Η παρουσία δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου συντελεί στη μεταβολή της κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων που προκύπτουν για ένα κύκλο θερμικής φόρτισης σε σύγκριση με τον ελεύθερο πάσσαλο. Ειδικότερα, παρατηρείται η αντίστροφη συμπεριφορά δηλαδή με την ψύξη του πασσάλου ελαττώνονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις ενώ με τη θέρμανση αυξάνονται κατά μήκος του πασσάλου με την επιβολή μηχανικής φόρτισης. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λόγω της δέσμευσης στην κεφαλή η καθιζήση είναι ίση για όλες τις θερμικές φορτίσεις. Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται στην αιχμή του πασσάλου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του ενεργειακού πασσάλου είναι τα εξής:

- Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων με την επιβολή ενός κύκλου θέρμανσης εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης που θα επιβληθεί στην κεφαλή του πασσάλου, με τις μικρότερες φορτίσεις να προκαλούν αυξημένη επιρροή στις διαφορές που εμφανίζονται ενώ τις μεγαλύτερες φορτίσεις να παράγουν σχετικά παραπλήσιες αξονικές δυνάμεις για όλα τα βήματα θερμικής φόρτισης. Ειδικότερα, κατά την αρχική ψύξη του ελεύθερου πασσάλου οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζουν μια ιδιόμορφη κατανομή. Όταν το μηχανικό φορτίο είναι πολύ μικρό, οι αξονικές δυνάμεις μειώνονται κατά μήκος του πασσάλου, ενώ για μεγαλύτερα μηχανικά φορτία αυξάνονται. Επιπρόσθετα,

κατά τη θέρμανση οι αξονικές δυνάμεις του πασσάλου αυξάνονται ανεξάρτητα από το μέγεθος του μηχανικού φορτίου. Τέλος, η τελική ψύξη και η επιστροφή του πασσάλου στην αρχική θερμοκρασία οδηγεί, για μικρά αξονικά φορτία, σε λίγο μικρότερες αξονικές δυνάμεις από τις μηχανικές ενώ για μεγάλες φορτίσεις επιφέρει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου.

- Για μη-μόνιμη διάρκεια θερμικής φόρτισης (transient state) η προγενέστερη ψύξη του πασσάλου επηρεάζει τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων που προκύπτουν από τη θέρμανση (μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις). Σε περίπτωση μόνιμης ροής (steady state) δεν εμφανίζονται μεταβολές λόγω προγενέστερης θερμικής φόρτισης.
- Με την αύξηση της μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου αυξάνονται ομοιόμορφα και οι αξονικές δυνάμεις που δημιουργούνται με την επιβολή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση) οι οποίες τείνουν να εκτονωθούν στην αιχμή του πασσάλου.
- Η αύξηση της χρονικής διάρκειας επιβολής της θερμικής φόρτισης (ψύξη, θέρμανση) προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων για τις μικρές μηχανικές φορτίσεις ενώ για τις μεγάλες φορτίσεις όπως το φορτίο λειτουργίας δεν επιφέρει γενικά σημαντικές μεταβολές. Επιπλέον, το μέγεθος της μεταβολής που εμφανίζεται εξαρτάται από το συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους και όσο αυξάνεται αυτός τόσο μεγθύνεται η διακύμανση μεταξύ των διαφορετικών αξονικών δυνάμεων που παρουσιάζονται. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $a_s/a_p \leq 1$ χωρίς μηχανική φόρτιση με την επιβολή ψύξης όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα του βήματος παρουσιάζεται μια αύξηση της θλιπτικής αξονικής δύναμης ενώ αντίθετα με την επιβολή θέρμανσης παρατηρείται μια ελάττωση της αξονικής δύναμης κατά μήκος του πασσάλου. Στην περίπτωση που ο λόγος $a_s/a_p = 3$ χωρίς μηχανική φόρτιση παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά των αξονικών δυνάμεων κατά την ψύξη με μεγαλύτερες διακυμάνσεις ιδιαίτερα στην περίπτωση της μόνιμης θερμικής ροής όπου για την ψύξη του πασσάλου προκύπτουν μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις από του ίδιου βάρους ενώ για τη θέρμανση εμφανίζονται μικρότερες αξονικές δυνάμεις από του ίδιου βάρους. Όσον αφορά την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN η μεταβολή της χρονικής διάρκειας ψύξης του πασσάλου κρίνεται αμελητέα για την κατανομή των αξονικών δυνάμεων που εμφανίζονται, ενώ για τη θέρμανση του πασσάλου προκαλείται σημαντική διαφορά για τη μόνιμη ροή σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χρονικές διάρκειες μη μόνιμης ροής που εξετάστηκαν όπου παρουσιάζονται εμφανώς μικρότερες αξονικές δυνάμεις (περίπου 16.5 %) κατά μήκος του πασσάλου.
- Η αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης a (m/m/K) του εδάφους χωρίς μηχανική φόρτιση αυξάνει τις θλιπτικές αξονικές δυνάμεις κατά την ψύξη του πασσάλου (για $a_s/a_p \leq 1$ οι στο μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου εμφανίζονται εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις). Αντίστροφα κατά τη θέρμανση του πασσάλου η αύξηση του a (m/m/K) χωρίς μηχανική φόρτιση προκαλεί μείωση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων. Επιπλέον κατά την επιβολή της τελικής ψύξης για επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία παρουσιάζεται μια μικρή ελάττωση των θλιπτικών αξονικών με την αύξηση του λόγου a_s/a_p . Οι κυριότερες διαφορές με τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του

εδάφους απαντώνται για απουσία μηχανικής φόρτισης, ενώ για το φορτίο λειτουργίας δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές για μη-μόνιμη θερμική ροή. Η κυριότερη διαφορά που εμφανίζεται είναι μια ανεπαίσθητη αύξηση της θλιπτικής αξονικής δύναμης με την μεγέθυνση του λόγου a_s/a_p στην επιβολή της αρχικής ψύξης.

- Η αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (W/m/K) χωρίς μηχανική φόρτιση επιφέρει μια μικρή αύξηση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων κατά την επιβολή της ψύξης ενώ προκαλεί αντίστροφα μια μείωση τους κατά την επιβολή θέρμανσης. Για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN η μεταβολή του λ δεν επηρεάζει την κατανομή των αξονικών δυνάμεων
- Η αύξηση του συντελεστή ειδικής θερμότητας c_p (J/kg/K) του εδάφους χωρίς μηχανική φόρτιση μειώνει τις θλιπτικές αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του πασσάλου με την επιβολή της ψύξης ενώ αντίθετα συντελεί στην αύξηση τους κατά τη θέρμανση του πασσάλου. Για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN η μεταβολή του c_p (J/kg/K) δεν επηρεάζει την κατανομή των αξονικών δυνάμεων
- Η ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους επιφέρει σημαντική μείωση στην επιρροή που προκαλούν οι θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση) στις αριθμητικές τιμές των αξονικών δυνάμεων για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN.
- Η αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής προκαλεί μετατόπιση προς τα πάνω του σημείου του πασσάλου στο οποίο εμφανίζεται η μεγαλύτερη επιρροή από την επιβολή των θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση) του πασσάλου δηλαδή του ουδέτερου σημείου για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN.
- Η μείωση του λόγου Poisson ν δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά την ψύξη ή τη θέρμανση του πασσάλου για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN.
- Η ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση προκαλεί αύξηση στις αξονικές δυνάμεις της πρώτης θερμικής φόρτισης που εμφανίζονται από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο στην περίπτωση που επιβληθεί αρχικά στον ενεργειακό πάσσαλο θέρμανση, ενώ αν επιβληθεί αρχικά ψύξη παρατηρούνται ανεπαίσθητες μεταβολές στις τιμές των αξονικών δυνάμεων. Ωστόσο από τον δεύτερο κύκλο της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης και μετά παρατηρείται ότι οποιαδήποτε πορεία και να ακολουθήσει ο θερμικός κύκλος δεν επηρεάζει την αριθμητική τιμή των αξονικών δυνάμεων οι οποίες παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες για την εκάστοτε θέρμανση-ψύξη.
- Η προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιώντας υψηλότερες σταθερές τιμές θερμοκρασίας στην επιφάνεια του μοντέλου δεν προκαλεί διακριτές διαφορές στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων για τον ελεύθερο μεμονωμένο πάσσαλο.
- Η αλλαγή του μήκους του πασσάλου δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην επιρροή που επιφέρουν οι θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση) στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του πασσάλου.
- Η παρουσία δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου κατά την ψύξη ή θέρμανση του προκαλεί την σημαντική αύξηση της μεταβολής του μεγέθους της αξονικής δύναμης σε σύγκριση με τη μηχανική, στο σημείο της κεφαλής του πασσάλου

σε σύγκριση με τον ελεύθερο πάσσαλο. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αρχική ψύξη του πασσάλου παρατηρείται σημαντική μείωση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων για το φορτίο λειτουργίας οι οποίες για το ίδιο βάρος του πασσάλου μετατρέπονται σε αμιγώς εφελκυστικές. Αντιθέτως με την επιβολή της θέρμανσης παρουσιάζεται μια σημαντική αύξηση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων. Τέλος, με την επιβολή της τελικής ψύξης του πασσάλου για επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία εμφανίζονται αξονικές δυνάμεις παραπλήσιες με τις μηχανικές κατά μήκος του πασσάλου.

7.3) Τέλος, τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την κατανομή της πλευρικής τριβής που εμφανίζεται με την επιβολή των θερμικών φορτίσεων κατά μήκος του ενεργειακού πασσάλου είναι τα εξής:

- Η κατανομή της πλευρικής τριβής με την επιβολή ενός κύκλου θέρμανσης εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανικής φόρτισης που θα ασκηθεί στην κεφαλή του πασσάλου, με τις μικρότερες μηχανικές φορτίσεις να προκαλούν αυξημένη επιρροή στις διαφορές που εμφανίζονται στην πλευρική τριβή ενώ τις μεγαλύτερες μηχανικές φορτίσεις να παράγουν παραπλήσια πλευρική τριβή για όλα τα βήματα θερμικής φόρτισης. Ειδικότερα, χωρίς μηχανική φόρτιση με μη-μόνιμη θερμική ροή οι πρόσθετες διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια υπό την επιβολή ψύξης είναι με φορά προς τα πάνω στο άνω μέρος του πασσάλου και με φορά προς τα κάτω στο κάτω μέρος του. Με την επιβολή της θέρμανσης παρουσιάζεται η ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά αυξάνονται οι ενώ στην τελική ψύξη του πασσάλου για επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία έχουν παραπλήσια φορά με τις μηχανικές (προς τα πάνω). Κατά την άσκηση του φορτίου λειτουργίας οι τιμές της πλευρικής τριβής και για τα 3 βήματα θερμικής φορτίσεις του κύκλου παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές λόγω της εμφάνισης της διατμητικής αντοχής του εδάφους με την μεγάλη φόρτιση που επιβάλλεται και πιο συγκεκριμένα είναι μεγαλύτερες στο άνω μέρος του πασσάλου σε σύγκριση με τη μηχανική πλευρική τριβή και μικρότερες στο κάτω μέρος του.
- Για μη-μόνιμη διάρκεια θερμικής φόρτισης (transient state) η προγενέστερη ψύξη του πασσάλου επηρεάζει τα αποτελέσματα της πλευρικής τριβής που προκύπτουν από τη θέρμανση. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται μικρότερου μεγέθους τιμές της πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και μεγαλύτερες στο κάτω. Σε περίπτωση μόνιμης χρονικής φόρτισης (steady state) δεν παρουσιάζονται αλλαγές λόγω προγενέστερης θερμικής φόρτισης.
- Με την αύξηση της μηχανικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου παρατηρείται μια μετατόπιση του σημείου εμφάνισης της διατμητικής αντοχής προς τα κάτω κατά μήκος του πασσάλου που δημιουργούνται κατά την επιβολή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση).
- Η αύξηση της χρονικής διάρκειας επιβολής της θερμικής φόρτισης (ψύξη, θέρμανση) προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην κατανομή της πλευρικής τριβής για τις μικρές μηχανικές φορτίσεις ενώ για τις μεγάλες φορτίσεις όπως το φορτίο λειτουργίας δεν επιφέρει γενικά σημαντικές μεταβολές. Επιπλέον, το μέγεθος της μεταβολής που εμφανίζεται εξαρτάται από το συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους και όσο αυξάνεται αυτός τόσο μεγεθύνεται η

διακύμανση μεταξύ των διαφορετικών κατανομών πλευρικής τριβής που παρουσιάζονται. Πιο συγκεκριμένα, για λόγο $\alpha_s/\alpha_p \leq 1$ χωρίς μηχανική φόρτιση όσο αυξάνεται η χρονική διάρκεια της ψύξης παρουσιάζεται μια ελάττωση της τιμής της πλευρικής τριβής (αρνητικής ή θετικής) κατά μήκος του πασσάλου. Αντιστοίχως, με την επιβολή της θέρμανσης παρατηρείται μια ελάττωση των τιμών της πλευρικής τριβής (θετικές ή αρνητικές) κατά μήκος του πασσάλου. Όσον αφορά την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN η μεταβολή της χρονικής διάρκειας ψύξης του πασσάλου κρίνεται αμελητέα για την κατανομή της πλευρικής τριβής που εμφανίζεται κατά μήκος του πασσάλου, ενώ για τη θέρμανση του πασσάλου προκαλείται σημαντική διαφορά για τη μόνιμη ροή σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χρονικές διάρκειες μη μόνιμης ροής που εξετάστηκαν όπου παρουσιάζονται εμφανώς μεγαλύτερες τιμές πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και αντίστοιχα μικρότερες στο κάτω μέρος του.

- Η αύξηση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης $\alpha(m/m/K)$ του εδάφους χωρίς μηχανική φόρτιση για την επιβολή ψύξης στον πάσσαλο ελαττώνει τις τιμές της πλευρικής τριβής (θετικές ή αρνητικές) κατά μήκος του πασσάλου. Επίσης, κατά τη θέρμανση μειώνει τις τιμές της πλευρικής τριβής (θετικές ή αρνητικές) κατά μήκος του πασσάλου. Για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN στην αρχική ψύξη μη-μόνιμης ροής του πασσάλου εμφανίζεται μια ανεπαίσθητη μείωση των αριθμητικών τιμών πλευρικής τριβής στο άνω μέρος του πασσάλου και αντιστοίχως αύξηση στο κάτω μέρος του με την αύξηση του λόγου α_s/α_p . Επιπλέον, για τη θέρμανση μη-μόνιμης ροής του πασσάλου δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές στην κατανομή της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου με τη μεταβολή του λόγου α_s/α_p .
- Η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda(W/m/K)$ του εδάφους δεν αλλάζει σημαντικά την κατανομή της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου για απουσία φόρτισης και για το φορτίο λειτουργίας.
- Η αύξηση του συντελεστή ειδικής θερμότητας $c_p(J/kg/K)$ του εδάφους χωρίς μηχανική φόρτιση προκαλεί γενικότερα αύξηση της πλευρικής τριβής (θετικής ή αρνητικής) κατά μήκος του πασσάλου για την ψύξη-θέρμανση του για 6 μήνες. Στην περίπτωση μηχανικής φόρτισης ίση με το φορτίο λειτουργίας των 6000 kN η αλλαγή του $c_p(J/kg/K)$ δε μεταβάλλει σημαντικά την κατανομή της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου για την επιβολή θερμικών φορτίσεων (ψύξη, θέρμανση).
- Η ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους επιφέρει σημαντική μείωση στην επιρροή που προκαλούν οι θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση) στις αριθμητικές τιμές της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου.
- Η αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής επιφέρει μετατόπιση προς τα πάνω του ουδέτερου σημείου (null point) κατά μήκος του πασσάλου λόγω της επιρροής της θερμικής φόρτισης (ψύξη, θέρμανση).
- Η μείωση του λόγου Poisson ν δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην κατανομή της πλευρικής τριβής κατά την ψύξη ή τη θέρμανση του πασσάλου για την επιβολή του φορτίου λειτουργίας των 6000 kN.
- Η ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση προκαλεί μεταβολή στην κατανομή της πλευρικής τριβής της πρώτης θερμικής φόρτισης που εμφανίζονται από τον

πρώτο στο δεύτερο κύκλο στην περίπτωση που επιβληθεί αρχικά στον ενεργειακό πάσσαλο θέρμανση, ενώ αν επιβληθεί αρχικά ψύξη παρατηρούνται ανεπαίσθητες μεταβολές στις τιμές της πλευρικής τριβής. Ωστόσο από τον δεύτερο κύκλο της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης και μετά παρατηρείται ότι οποιαδήποτε πορεία και να ακολουθήσει ο θερμικός κύκλος δεν επηρεάζει την κατανομή της πλευρικής τριβής η οποία παραμένει σχεδόν αμετάβλητη για την εκάστοτε θέρμανση-ψύξη.

- Η προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιώντας υψηλότερες σταθερές τιμές θερμοκρασίας στην επιφάνεια του μοντέλου δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην κατανομή της πλευρικής τριβής για το μεμονωμένο ελεύθερο πάσσαλο.
- Η αλλαγή του μήκους του πασσάλου δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην επιρροή που επιφέρουν οι θερμικές φορτίσεις (ψύξη, θέρμανση) στην κατανομή της πλευρικής τριβής κατά μήκος του πασσάλου.
- Η παρουσία δέσμευσης στην κεφαλή του πασσάλου επιφέρει μια ομοιομορφία στη μεταβολή του μεγέθους της πλευρικής τριβής σε σύγκριση με την αντίστοιχη μηχανική. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αρχική ψύξη του πασσάλου παρατηρείται η μείωση της πλευρικής τριβής η οποία για το ίδιο βάρος του πασσάλου εμφανίζει αντίθετο πρόσημο (διατμητικές τάσεις με φορά προς τα κάτω). Αντιστρόφως, με την παρουσία της θέρμανσης παρουσιάζεται αύξηση της πλευρικής τριβής (διατμητικές τάσεις με φορά προς τα πάνω). Τέλος, με την επιβολή της τελικής ψύξης εμφανίζεται παρόμοια κατανομή πλευρικής τριβής με τη μηχανική για οποιαδήποτε μηχανική φόρτιση κατά μήκος του πασσάλου.

Καταλήγοντας, η έρευνα που πραγματοποιήθηκε οδήγησε στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόκριση ενός μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου με την επιβολή κύκλων ψύξης-θέρμανσης.

Η μελέτη των ενεργειακών πασσάλων θέμα το οποίο πραγματεύεται αυτή η διπλωματική είναι ένας καινούργιος κλάδος στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού που δύναται να συμβάλει στην περιβαλλοντική αειφορία και στη μακροχρόνια εξοικονόμηση χρημάτων. Για να μπορέσουν τα παραπάνω συμπεράσματα να σταθούν ως αρχές για την απόκριση και τη μηχανική συμπεριφορά του μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου πρέπει να εμπλουτισθούν με περισσότερες αναλύσεις, μελέτες και πειράματα πάνω στο αντικείμενο οι οποίες θα επιβεβαιώνουν και παράλληλα θα ενισχύουν τα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Amatya B. L., Soga K., Bourne- Webb P. J., Amis T & Laloui L., Thermo-mechanical behaviour of energy piles, *Géotechnique* 62, 2012
2. Bodas Freitas T. M. & Bourne-Webb P. J., The response of energy foundations under thermo-mechanical loading, *ResearchGate*, Technical University of Lisbon, 2016
3. Bourne-Webb P. J., Amatya B. L & Soga K., A framework for understanding energy pile behavior. *ICE Publishing*, 2011
4. Bourne-Webb P. J., An overview of observed thermal and thermo-mechanical response of piled energy foundations, *ResearchGate*, Technical University of Lisbon, 2013
5. Bourne-Webb P. J., Bodas Freitas T. M & Freitas Assuncao R. M., Soil–pile thermal interactions in energy foundations, *Géotechnique* 00, 2015
6. Bourne-Webb P. J., Burlon S., Javed S., Kürten S. & Loveridge F., Renewable and Sustainable Energy Reviews, *ELSEVIER*, 2016
7. Brandl H., Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Géotechnique* 56, 2006
8. Freitas Assunção R. M., Supervisor: Prof. Bourne-Webb P. J., Thermal and Thermal-Mechanical Analysis of Thermo-Active Pile Foundations, Thesis to obtain the Master of Science Degree in Civil Engineering, Technical University of Lisbon, March 2014
9. Rotta Loria A. F., Gunawanb A., Chao Shi, Laloui L. & Charles W.W., Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2015
10. Suryatriyastutia M.E., Mroueha H. & Burlonb S., Understanding the temperature-induced mechanical behavior of energy pile foundations, *ELSEVIER*, 2012
11. Suryatriyastuti M. E., doctoral thesis, Numerical Study of the thermo-active piles behavior in cohesionless soils, University of Lille, 2013
12. Tsetoulidis C., Naskos A. & Georgiadis K., Numerical investigation of the mechanical behaviour of single energy piles and energy pile groups, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 2016

1. Γεωργιάδης Κ. & Γεωργιάδης Μ., Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2009.
2. Κωμοδρόμος Α. Μ., Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2008.
3. Κωμοδρόμος Α. Μ., Θεμελιώσεις - Αντιστηρίξεις, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2012.
4. Μπόζης Δ., Ο Πάσσαλος Θεμελίωσης ως Γεωεναλλάκτης-Διευρύνσεις για τη θερμική του συμπεριφορά, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ενεργειακός Τομέας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2011.
5. Φραγκογιάννης Γ. Ι., Αναλυτικός Σχεδιασμός και Παραμετρική ανάλυση-συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες. Πειραματική διερεύνηση του θερμικού δυναμικού του υπεδάφους, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011.