



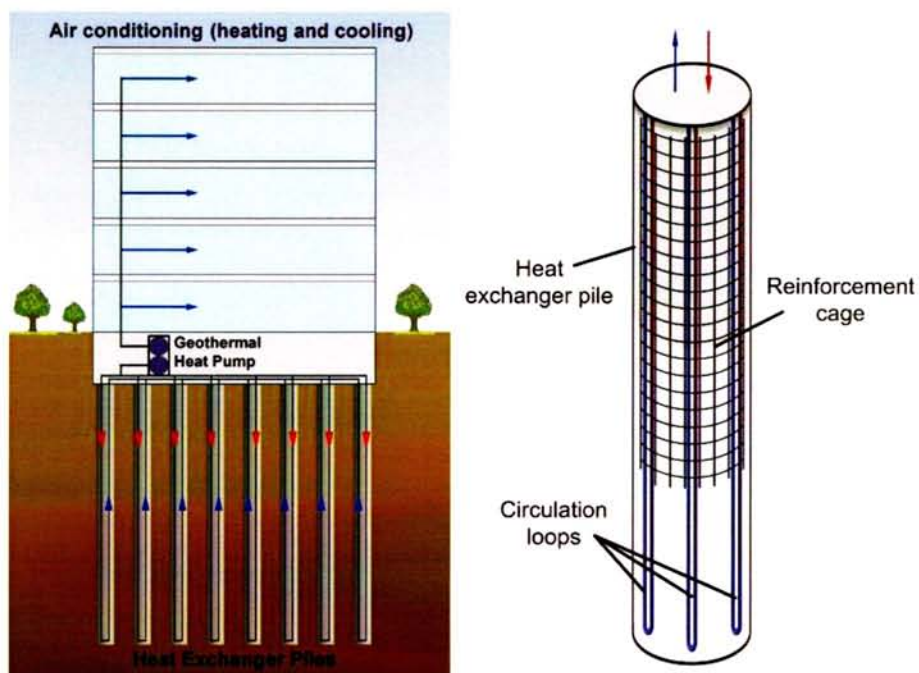
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ
ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Εκπόνηση: Κάντας Ιωάννης

Επιβλέπων: Κωμοδρόμος Αιμίλιος

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14758/1
Ημερ. Εισ.: 03-10-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2016
ΚΑΝ

Copyright © Κάντας Ιωάννης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

*στον αγώνα για την πρόοδο της ανθρωπότητας,
σε ισορροπία και αρμονία με τον πλανήτη που τη γέννησε και την κρατάει ζωντανή*

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015.

Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωσή της και των σπουδών μου συνολικά.

Καταρχάς οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερώς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο, για την υπομονή, τις συμβουλές και την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη φίλη και συνάδελφο Λαμπρινή, αλλά και όλους τους φίλους και συναδέλφους που ήταν κοντά μου όποτε τους χρειάστηκα, τόσο για τη βοήθεια και τη συμπαράστασή τους, όσο και για τις όμορφες στιγμές και αγωνίες που μοιραστήκαμε στα φοιτητικά μας χρόνια.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου για την οικονομική υποστήριξη και για την πίστη τους σε μένα, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Εργασία.....	4
Κεφάλαιο 2 ^ο : Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας.....	7
2.1. Γεωθερμία και αβαθής γεωθερμία.....	7
2.2. Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας.....	16
2.2.1. Πρωτεύον δίκτυο.....	22
2.2.2. Γεωθερμική αντλία θερμότητας.....	27
2.2.3. Δευτερεύον δίκτυο.....	35
Κεφάλαιο 3 ^ο : Ενεργειακοί πάσσαλοι.....	40
3.1. Ορισμός, τύποι και χρήσεις.....	40
3.2. Ιστορικό.....	45
3.3. Παραδείγματα εφαρμογών ενεργειακών πασσάλων.....	47
3.4. Κατασκευαστικά ζητήματα.....	51
3.5. Οφέλη και πλεονεκτήματα.....	58
3.6. Περιορισμοί, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μειονεκτήματα.....	64
3.7. Νομοθεσία, οδηγίες και προώθηση.....	68
Κεφάλαιο 4 ^ο : Συμπεριφορά και σχεδιασμός των ενεργειακών πασσάλων.....	70
4.1. Θερμική συμπεριφορά ενεργειακών πασσάλων.....	70
4.1.1. Μετάδοση θερμότητας.....	70
4.1.2. Θερμική απόδοση και σχεδιασμός.....	75
4.1.3. Πεδία μελλοντικής έρευνας θερμικής συμπεριφοράς ενεργειακών πασσάλων.....	81
4.2. Θερμομηχανική συμπεριφορά ενεργειακών πασσάλων.....	82
4.2.1. Επίδραση θερμικής φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων και την αλληλεπίδρασή τους με το έδαφος.....	83
4.2.1.1. Πειράματικά δεδομένα.....	83
4.2.1.2. Μελέτες προσομοίωσης.....	103
4.2.2. Επίδραση θερμικής φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά και ιδιότητες του εδάφους.....	127
4.2.3. Πεδία μελλοντικής έρευνας θερμομηχανικής συμπεριφοράς ενεργειακών πασσάλων.....	129

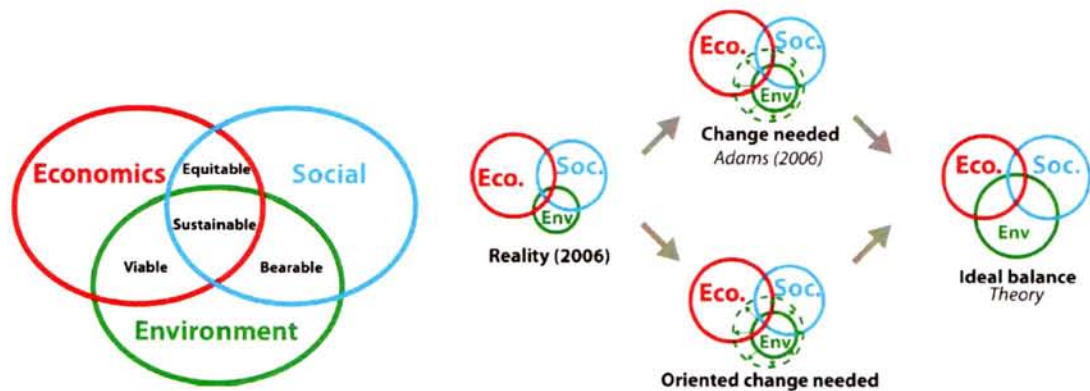
Κεφάλαιο 5 ^ο : Συμπεράσματα.....	134
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	136

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

1.1. Γενικά

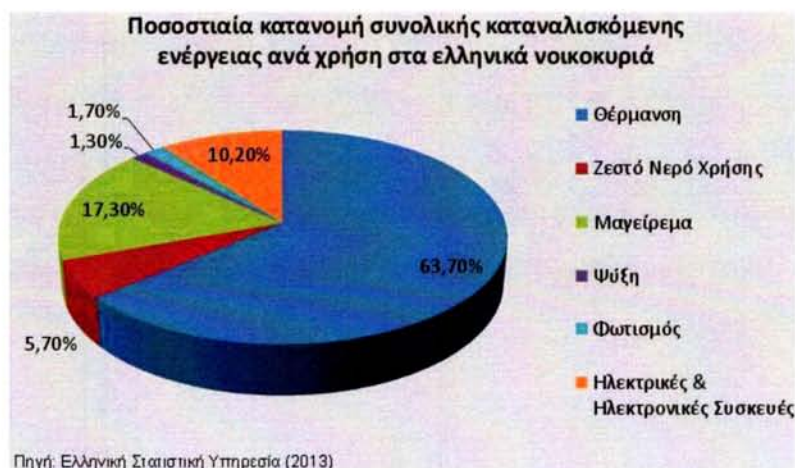
Η κλιματική αλλαγή είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα τον αιώνα που διανύουμε. Το 2015 ήταν, σύμφωνα με μετρήσεις της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (NASA) και της Υπηρεσίας Παρακολούθησης των Ωκεανών και της Ατμόσφαιρας (NOAA) των ΗΠΑ, το θερμότερο έτος από όταν άρχισε η συστηματική καταγραφή των θερμοκρασιών του πλανήτη, το 1880 (www.nasa.gov). Συγκεκριμένα, η μέση ετήσια θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης και των ωκεανών κατά τη διάρκεια 2015 ήταν περίπου 0,90 °C πάνω από το μέσο όρο του 20^{ου} αιώνα. Αυτή είναι συγχρόνως και η μεγαλύτερη διαφορά με την οποία έχει σπάσει το ρεκόρ της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του πλανήτη (www.climate.gov). Η άνοδος της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του πλανήτη έχει προκληθεί κυρίως από τις αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (www.nasa.gov). Το μεγαλύτερο ποσοστό της ανόδου αυτής σημειώθηκε τα τελευταία 35 χρόνια, ενώ τα 15 από τα 16 θερμότερα έτη σ' αυτά τα 136 έτη καταγραφών ήταν μετά το 2001 (www.nasa.gov). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων θερμοκηπίου οφείλονται στην καύση των λεγόμενων ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία εκτός από την περιβαλλοντική επιβάρυνση έχουν και το μειονέκτημα της ενεργειακής εξάρτησης από τις χώρες που τα εξάγουν (Καρύτσας, 2015).

Παράλληλα με την υπερθέρμανση του πλανήτη, η ανθρωπότητα κάθε χρόνο εξαντλεί όλο και νωρίτερα τη «βιοικανότητα» του πλανήτη να συντηρεί την οικονομία της, σύμφωνα με τη μ.κ.ο. - «δεξαμενή σκέψης για τη βιωσιμότητα» Global Footprint Network (www.econews.gr). Έτσι, το 2015 οι φυσικοί πόροι που μπορεί να διαθέσει ο πλανήτης σε ένα έτος εξαντλήθηκαν στις 13 Αυγούστου, ενώ 15 χρόνια πριν αυτή η «ημέρα εξάντλησης της γης» ήταν στις αρχές Οκτωβρίου (www.econews.gr).

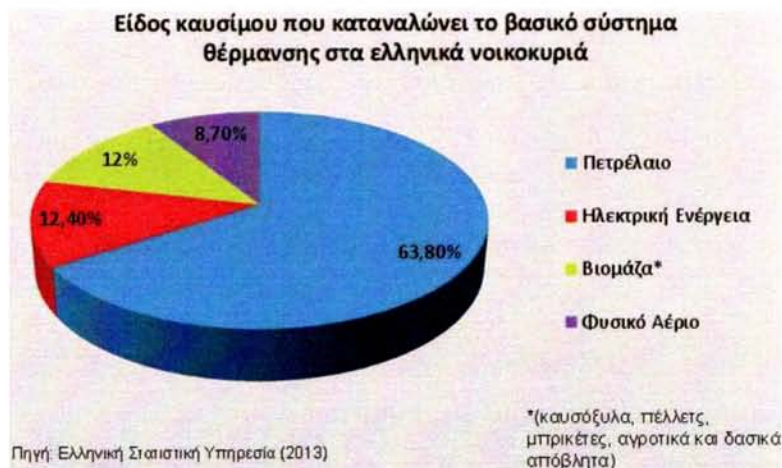


Σχήμα 1.1: Βιωσιμότητα (sustainability): το περιβάλλον σε ισορροπία με την κοινωνία και την οικονομία (Mimouni, 2014)

Η θέρμανση και ο δροσισμός των κτιρίων αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα, ενώ το μεγαλύτερο τμήμα της ενέργειας προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων (Καρύτσας, 2015). Συγκεκριμένα, στην Ε.Ε. το 2011 η θέρμανση και ο δροσισμός συναποτελούσαν το 86 % της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας στα νοικοκυριά, το 76 % της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας στον αγροτικό τομέα, τις υπηρεσίες και το εμπόριο και το 55 % της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας στη βιομηχανία, ενώ το 81 % της ενέργειας ήταν προϊόν καύσης ορυκτών καυσίμων (European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, 2011, οπ. αναφ. στον Καρύτσα, 2015). Αντίστοιχα, στην Ελλάδα το 2013 η θέρμανση αντιπροσώπευε το 63,70 % της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στα ελληνικά νοικοκυριά, ενώ το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο συναποτελούσαν το 72,50 % των καυσίμων που προορίζονταν για τη θέρμανση των ελληνικών νοικοκυριών (Καρύτσας, 2015).



Σχήμα 1.2: Ποσοστά καταναλισκόμενης ενέργειας ανά χρήση στα ελληνικά νοικοκυριά (Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία, 2013, οπ. αναφ. στον Καρύτσα, 2015)



Σχήμα 1.3: Τύπος καυσίμου που καταναλώνει το κύριο σύστημα θέρμανσης στα ελληνικά νοικοκυριά (Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία, 2013, οπ. αναφ. στον Καρύτσα, 2015)

Γίνεται επομένως ξεκάθαρο ότι είναι επιτακτική η ανάγκη άμεσης απεξάρτησης της οικονομίας από τα ορυκτά καύσιμα, καθώς και ότι είναι απαραίτητος ο ενεργειακός σχεδιασμός των κατασκευών, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των ανθρώπων σε θέρμανση και δροσισμό, με τη χρήση συστημάτων που αξιοποιούν τις φιλικές προς το περιβάλλον ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (α.π.ε.). Σύμφωνα με τη Μαστοράκη (2012), ενεργειακός σχεδιασμός των κτιρίων είναι η εφαρμογή τεχνικών και σχεδιαστικών λύσεων, οι οποίες με την αξιοποίηση περιβαλλοντικών πηγών ενέργειας και με τη ελάχιστη δυνατή ενεργειακή εξάρτηση του κτιρίου από συμβατικά καύσιμα, καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και εξασφαλίζουν συνθήκες άνεσης. Ο ενεργειακός σχεδιασμός των κτιρίων εξυπηρετεί τους παρακάτω βασικούς στόχους (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, οπ. αναφ. σε Μαστοράκη, 2012):

1. Απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.
2. Προστασία του περιβάλλοντος.
3. Εξοικονόμηση χρημάτων.
4. Βελτίωση της θερμικής άνεσης και δημιουργία υγιεινών συνθηκών διαβίωσης εντός του κτιρίου.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αξιοποίησης των α.π.ε. είναι τα παρακάτω:

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον.
- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες.
- Με την αξιοποίησή τους μειώνεται η εξάρτηση από τα ορυκτά και εξαντλήσιμα καύσιμα.

- Είναι εγχώριες και συνεπώς συμβάλλουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού.

- Η γεωγραφική τους διαθέσιμότητα συμβάλλει στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, μειώνοντας έτσι τις ενεργειακές και χρηματικές απώλειες λόγω μεταφοράς ενέργειας.

- Το λειτουργικό τους κόστος είναι συνήθως χαμηλό και δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας.

- Δημιουργούν θέσεις εργασίας κατά τη κατασκευή και λειτουργία μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση α.π.ε..

Τα συστήματα που αξιοποιούν τις α.π.ε. για θέρμανση και δροσισμό των κτιρίων διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, με κριτήριο την ύπαρξη ή όχι μηχανολογικού συστήματος (Μαστοράκη, 2012):

1. Παθητικά συστήματα: δεν κάνουν χρήση μηχανολογικού συστήματος για τη μεταφορά της θερμότητας στους χώρους του κτιρίου, αλλά αξιοποιούν κυρίως την ηλιακή ακτινοβολία, βασιζόμενα στη φυσική ροή της θερμότητας και στις φυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών του κτιρίου, ενώ χρησιμοποιούν τα δομικά στοιχεία του κελύφους (τοίχοι, οροφές, δάπεδα, δώματα) ως αποθήκη θερμότητας.

2. Ενεργητικά συστήματα: χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για τη μεταφορά και αποθήκευση της θερμότητας, η οποία προήλθε από τη δέσμευση κάποιας ανανεώσιμης ενέργειας. Τέτοια είναι τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, όπως οι ενεργειακοί πάσσαλοι, αφού για τη μεταφορά της θερμότητας χρησιμοποιούν συσκευή αντλίας θερμότητας και κυκλώματα σωληνώσεων.

3. Υβριδικά συστήματα: συνδυάζουν τη φυσική ροή της θερμότητας και τις φυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών με κάποιο μηχανολογικό σύστημα.

1.2. Εργασία

Αντικείμενο και Μεθοδολογία

Η εργασία αυτή αποτελεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας των ενεργειακών πασσάλων. Οι ενεργειακοί πάσσαλοι είναι πάσσαλοι θεμελίωσης στους οποίους έχουν ενσωματωθεί σωληνώσεις, όπου μέσω της ανακυκλοφορίας ρευστού γίνεται ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος για τη θέρμανση και δροσισμό κτιρίων και άλλων κατασκευών. Η εργασία εμβαθύνει στη θερμομηχανική τους συμπεριφορά, την επίδραση δηλαδή της θερμικής φόρτισης που

υφίστανται λόγω ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος, στη μηχανική τους συμπεριφορά.

Κίνητρο

Το κίνητρο για την εκπόνηση της εργασίας αυτής ήταν η ανάδειξη της ανάγκης συμβολής στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και της εξάντλησης των ενεργειακών πόρων του πλανήτη, μέσω του ενεργειακού σχεδιασμού των κατασκευών και συγκεκριμένα μέσω της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας της αβαθούς γεωθερμίας και των συστημάτων που την αξιοποιούν, όπως οι ενεργειακοί πάσσαλοι.

Στόχοι

Οι στόχοι της εργασίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Συγκέντρωση πληροφοριών σε διάφορους τομείς ενδιαφέροντος για το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας των ενεργειακών πασσάλων.
2. Επισκόπηση και κατηγοριοποίηση επιστημονικών ερευνών πάνω στη συμπεριφορά και το σχεδιασμό των ενεργειακών πασσάλων.
3. Προσπάθεια να απαντηθεί από την επισκόπηση των επιστημονικών ερευνών το ερώτημα κατά πόσο η ύπαρξη των σωλήνων απορρόφησης – εκπομπής θερμότητας και της συνεπαγόμενης θερμικής φόρτισης επηρεάζει τη γεωτεχνική λειτουργία των πασσάλων.
4. Ανίχνευση πεδίων έρευνας για το μέλλον πάνω στους ενεργειακούς πασσάλους.

Διάρθρωση

Οι παραπάνω στόχοι επιτεύχθηκαν ως εξής:

Στο πρώτο μέρος του 1^{ου} εισαγωγικού κεφαλαίου της εργασίας αναδεικνύεται η ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής μέσω της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αντικατάστασή τους από α.π.ε. και με τον ενεργειακό σχεδιασμό των κατασκευών για τη θέρμανση και το δροσισμό τους. Στο δεύτερο μέρος διασαφηνίζονται το αντικείμενο και η μεθοδολογία, το κίνητρο, οι στόχοι και η διάρθρωση της εργασίας.

Στο πρώτο μέρος του 2^{ου} κεφαλαίου γίνεται αναφορά στην ορολογία, την ταξινόμηση και τις χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, υποκατηγορία της οποίας

είναι η αβαθής γεωθερμία που αξιοποιείται από τους ενεργειακούς πασσάλους. Στο δεύτερο μέρος επεξηγείται η λειτουργία ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας και των τριών μερών από τα οποία αποτελείται, γίνεται αναφορά στις κατηγορίες των συστημάτων και παρουσιάζονται περαιτέρω λεπτομέρειες για καθένα από τα τρία αυτά μέρη: πρωτεύον δίκτυο, γεωθερμική αντλία θερμότητας, δευτερεύον δίκτυο.

Στο 3^ο κεφάλαιο δίνονται γενικές πληροφορίες για τους ενεργειακούς πασσάλους, όπως για τους τύπους και τις χρήσεις τους, το ιστορικό τους, ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογών, κατασκευαστικά ζητήματα, τα οφέλη και τα πλεονεκτήματα τους σε σχέση με άλλα συστήματα καθώς και τους περιορισμούς και τα μειονεκτήματά τους. Επιπλέον γίνεται αναφορά στη σχετική νομοθεσία, σε σχετικές οδηγίες για το σχεδιασμό και την κατασκευή τους και σε μέτρα για την προώθησή τους από τις χώρες στις οποίες χρησιμοποιούνται.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση και κατηγοριοποίηση των επιστημονικών ερευνών πάνω στη συμπεριφορά και το σχεδιασμό των ενεργειακών πασσάλων, καθώς και ανίχνευση πεδίων μελλοντικής έρευνας. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού γίνεται αναφορά στη θερμική συμπεριφορά, απόδοση και σχεδιασμό των ενεργειακών πασσάλων. Στο δεύτερο μέρος, η εργασία εμβαθύνει στη θερμομηχανική τους συμπεριφορά που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το γεωτεχνικό τους σχεδιασμό, με την αναλυτική επισκόπηση αφενός πειραμάτων πεδίου και εργαστηρίου και αφετέρου μελετών προσομοίωσης της θερμομηχανικής τους συμπεριφοράς. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη θερμομηχανική συμπεριφορά των εδαφών.

Στο 5^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Κεφάλαιο 2^ο : Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας

2.1. Γεωθερμία και αβαθής γεωθερμία

Ορολογία και ταξινόμηση

Η γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμία (geothermal energy) είναι εν γένει η θερμική ενέργεια της γης. Αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (α.π.ε.) με συνεχώς αυξανόμενη χρήση, μαζί με πηγές όπως η αιολική ενέργεια, η βιομάζα (στερεή βιομάζα, βιοαέριο, βιομηχανικά απόβλητα, αστικά απόβλητα), η ηλιακή ενέργεια, η κυματική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια και η ενέργεια από το υδρογόνο (Πολύζου, 2007), με κύριο κοινό στόχο την ελαχιστοποίηση της παραγωγής ρύπων κατά την παραγωγή ενέργειας. Στη σχετική βιβλιογραφία διαπιστώνεται μια σύγχυση ως προς την ορολογία και την ταξινόμηση της γεωθερμίας.

Σύμφωνα με την οδηγία της ΕΕ 2009/28/ΕΕ (οπ. αναφ. στο Μενδρινό & Καρύτσα, 2015), σχετικά με την προώθηση των Α.Π.Ε., ««Γεωθερμική ενέργεια» είναι η αποθηκευμένη ενέργεια σε μορφή θερμότητας κάτω από την επιφάνεια του στερεού φλοιού της γης». Επίσημη διάκριση ανάμεσα στη βαθιά και την αβαθή (shallow) γεωθερμική ενέργεια προς το παρόν δεν υπάρχει, ενώ για το διαχωρισμό αυτό χρησιμοποιείται στην Ελλάδα εμπειρικά ένα ενδεικτικό βάθος 200 m (Μενδρινός & Καρύτσας, 2015).

Σύμφωνα με το ASTM E-957 (Standard Terminology Relating to Geothermal Energy), ο ορισμός της γεωθερμίας είναι αρκετά γενικός: «η θερμική ενέργεια που περιέχεται στα πετρώματα και στα ρευστά της γης» (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004, οπ. αναφ. στο Φυτίκα κ.α., 2008). Με τον όρο «γεωθερμική ενέργεια» όμως, συνήθως εννοούμε το τμήμα της γήινης θερμότητας που βρίσκεται αποθηκευμένο με τη μορφή θερμού νερού, ατμού ή θερμών πετρωμάτων σε ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες και περιορίζεται περίπου στα πρώτα τρία χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004, οπ. αναφ. στο Φυτίκα κ.α., 2008).

Σύμφωνα με τους Φυτίκα κ.α. (2008), τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, όπως το είδος των γεωθερμικών πόρων, ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών, ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά, το είδος της εστίας θερμότητας, αν κυκλοφορούν ή όχι ρευστά στον ταμειυτήρα κ.α., ενώ σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- Υδροθερμικά συστήματα ή πόροι, δηλαδή τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά που συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων και ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων που αξιοποιούνται.

- Αβαθής γεωθερμία (earth energy), δηλαδή η θερμική ενέργεια από μικρά βάθη στα πρώτα 100 m από την επιφάνεια της γης, η οποία λαμβάνεται με την ανακυκλοφορία νερού ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή νερών από λίμνες, ποτάμια και τη θάλασσα.

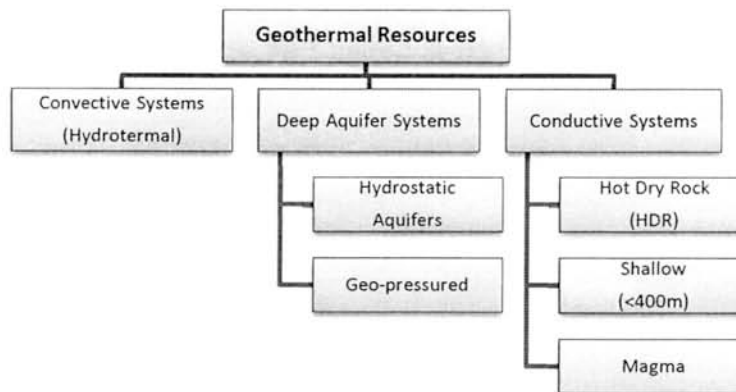
- Προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα ή πόροι (enhanced geothermal systems), δηλαδή θερμά πετρώματα σε βάθος 2 - 10 km, των οποίων η θερμική ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί διοχετεύοντας μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων νερό από την επιφάνεια, το οποίο ανακτάται αρκετά θερμότερο μέσω άλλων γεωτρήσεων.

- Γεωπεπιεσμένα συστήματα ή πόροι (geopressured systems), δηλαδή ρευστά σε μεγάλο βάθος, περιορισμένα από μη περατά πετρώματα, με πίεση μεγαλύτερη από την υδροστατική.

- Μαγματικά συστήματα ή πόροι (magma systems), δηλαδή η θερμότητα μάγματος μικρού σχετικά βάθους, η οποία λαμβάνεται με τη χρήση γεωτρήσεων.



Σχήμα 2.1: Είδη γεωθερμικών πόρων κατά σειρά ενδιαφέροντος ως προς τη χρήση τους (Φυτίκας κ.α., 2008)



Σχήμα 2.2: Ταξινόμηση γεωθερμικών πόρων (Goldstein et al., 2011, as cited in Cervera, 2013)

Σύμφωνα με τους Μενδρινό & Καρύτσα (2005), η γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμικό δυναμικό είναι η θερμότητα της γης, περιλαμβάνει γεωθερμικά πεδία υψηλής ή χαμηλής ενθαλπίας, αβαθείς υδροφόρους και εδάφη θερμοκρασίας μικρότερης των 25°C και μπορεί να ταξινομηθεί ως εξής:

- Θερμά ξηρά πετρώματα με θερμοκρασία 100 - 150 °C, σε βάθη 3 - 5 km, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους με το βάθος κατά περίπου 30 °C ανά 1 km (γεωθερμική βαθμίδα).

- Υδροφόροι ορίζοντες με θερμοκρασίες 150 °C - 300+ °C, σε μικρά σχετικά βάθη σε περιοχές γεωλογικά πρόσφατης ηφαιστειακής δράσης με γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας.

- Υδροφόροι ορίζοντες με θερμοκρασίες 25 °C - 100+ °C, σε μικρά σχετικά βάθη σε περιοχές κοντά σε θερμές πηγές με γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

- Υδροφόροι ορίζοντες με θερμοκρασίες 15 °C - 30 °C.

- Εδάφη με σταθερή θερμοκρασία 15 °C, μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Σύμφωνα με το Νόμο 3175/2003 (ΦΕΚ Α' 207) με τίτλο «Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις», προβλέπονται τα ακόλουθα (Πολύζου, 2007):

α) Γεωθερμικό δυναμικό ονομάζεται το σύνολο των γηγενών φυσικών ατμών, των θερμών νερών, επιφανειακών ή υπόγειων και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, των οποίων η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 25 °C.

β) Γεωθερμικό πεδίο ονομάζεται ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος εντός του οποίου εντοπίζεται το γεωθερμικό δυναμικό.

γ) Προϊόν του γεωθερμικού πεδίου ονομάζεται το αξιοποιήσιμο θερμοενεργειακό του περιεχόμενο.

Με βάση τον ίδιο νόμο, τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται σε:

- Χαμηλής θερμοκρασίας, για θερμοκρασία προϊόντος από 25 - 90 °C.
- Υψηλής θερμοκρασίας, για θερμοκρασία προϊόντος άνω των 90 °C.

Σύμφωνα με την Πολύζου (2007), ομαλή ή αβαθής γεωθερμική ενέργεια, ονομάζεται η ενέργεια που προέρχεται από τη θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών καθώς και των επιφανειακών και υπόγειων νερών, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό και βρίσκονται σε μικρό βάθος, 0 - 200 m.

Οι θερμοκρασίες των πετρωμάτων και των υπόγειων νερών της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας είναι κατά κανόνα κατώτερες από 25 °C και σε αντίθεση με το γεωθερμικό δυναμικό του οποίου η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 25 °C, στην περίπτωση αυτή μιλάμε για αβαθή υπεδάφική θερμότητα, η οποία είναι μία περιβαλλοντική ενέργεια και ένα μέρος της είναι ηλιακής προέλευσης, κυρίως στα βάθη 0 - 30 m περίπου. Το ποσοστό αυτό της θερμότητας ηλιακής προέλευσης γίνεται πιο εμφανές στα βάθη 0 - 15 m και αυξάνεται όσο μικραίνει η απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους και όσο μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (Πολύζου, 2007).

Ο Καρύτσας (2009) κάνει την εξής διάκριση για τη γεωθερμική ενέργεια:

- Υψηλής Ενθαλπίας: $T > 150 \text{ }^\circ\text{C}$
- Χαμηλής Ενθαλπίας: $T \geq 25 \text{ }^\circ\text{C} - 150 \text{ }^\circ\text{C}$
- Αβαθής Γεωθερμία: $T < 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Σύμφωνα με το Βραχόπουλο (2009), τα γεωθερμικά πεδία ανάλογα με τη θερμοκρασία του υπεδάφους ή του ρευστού χωρίζονται σε:

- Υψηλής Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες ρευστών άνω των 150 °C.
- Μέσης Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες ρευστών μεταξύ 90 - 150 °C.
- Χαμηλής Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες ρευστών μεταξύ 25 - 100 °C
- Περιβαλλοντική, Κανονική, Ομαλή, Αβαθής ή Πολύ Χαμηλής Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες αντίστοιχες των μέσων ετησίων του περιβάλλοντος αέρα και συνήθως μικρότερες των 25 °C.

- Παγετός ή Πάρα Πολύ Χαμηλής Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες μικρότερες των 0 °C (Permafrost).

Σύμφωνα με την Οικονόμου (2012), ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών που ανέρχονται στην επιφάνεια, η γεωθερμική ενέργεια διακρίνεται σε:

- Υψηλής θερμοκρασίας, για θερμοκρασίες άνω των 150 °C,
- Μέσης θερμοκρασίας, για θερμοκρασίες μεταξύ 100 - 150 °C
- Χαμηλής θερμοκρασίας, για θερμοκρασίες μικρότερες από 100 °C.

Όπως παρατηρεί η Οικονόμου (2012), το πιο σύνηθες κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι η ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία αποτελούν τους φορείς της θερμότητας από τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Σημειώνει επίσης ότι η ενθαλπία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας τους και χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών. Οι Dickson & Fanelli (2004, οπ. αναφ. στην Οικονόμου, 2012) σημειώνουν ότι δεν

υπάρχει κάποια διεθνώς καθιερωμένη ορολογία, ούτε μια κοινώς αποδεκτή μέθοδος ταξινόμησης και για το λόγο αυτό θα πρέπει κάθε φορά για την αποφυγή συγχύσεων να δηλώνουμε το εύρος θερμοκρασιών, διότι όροι όπως «χαμηλή», «μέση», «υψηλή» δεν έχουν πάντα την ίδια ερμηνεία.

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση γεωθερμικών πόρων από διάφορους συγγραφείς (Dickson & Fanelli, 2004, οπ. αναφ. στην Οικονομία, 2012)

ΕΝΘΑΛΠΙΑ	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Χαμηλή Ενθαλπία	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Μέση Ενθαλπία	90-150	125-225	100-200	-	-
Υψηλή Ενθαλπία	>150	>225	>200	>150	>190

(a) Muffler and Cataldi (1978).

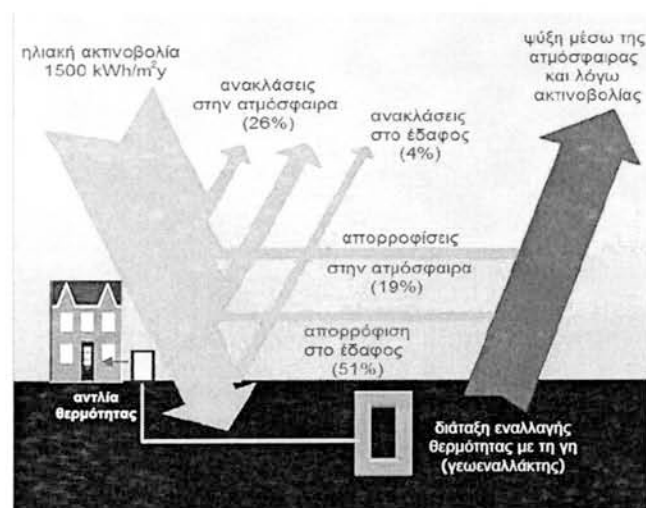
(b) Holchstein (1990).

(c) Benderitter and Cormy (1990).

(d) Nicholson (1993).

(e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000).

Συμπερασματικά, η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αφορά τη θερμική ενέργεια των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, υπόγειων και επιφανειακών, στα πρώτα 200 m περίπου από την επιφάνεια της γης, η θερμοκρασία της δεν ξεπερνάει τους 25 °C και προέρχεται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2.3: Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος (Μποζής, 2013)

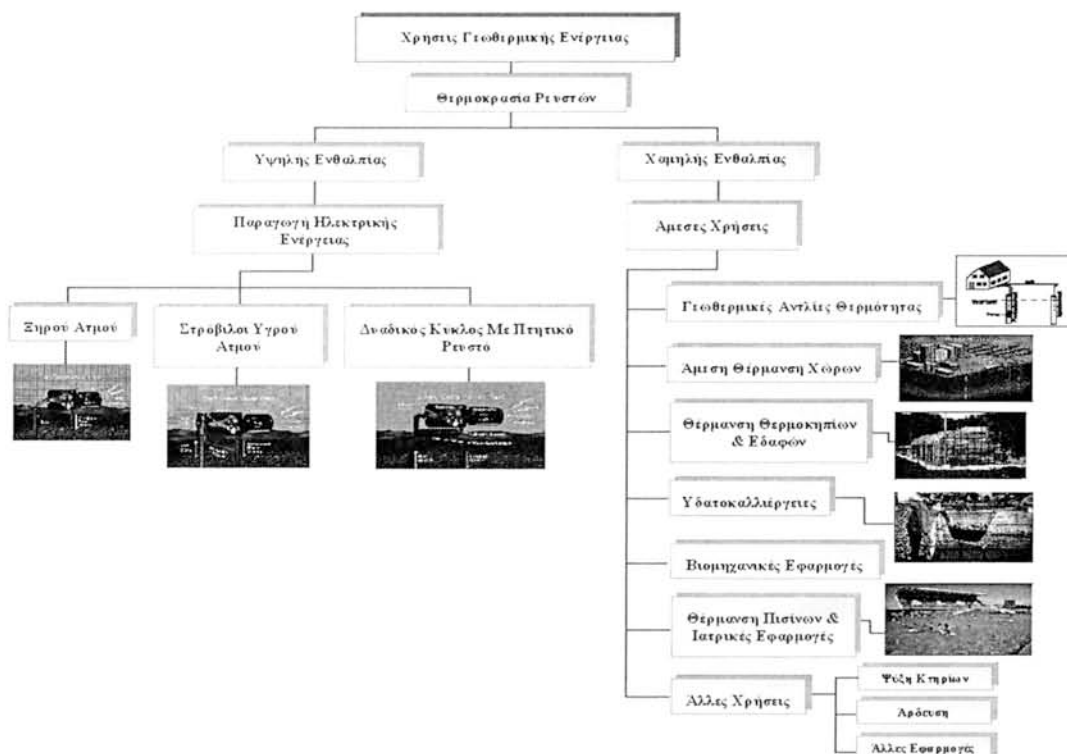
Χρήσεις

Οι δυνατότητες αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία σύμφωνα με την Πολύζου (2007) ταξινομούνται σε:

- Υψηλής Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες ρευστών $> 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- Χαμηλής Ενθαλπίας, για θερμοκρασίες ρευστών $25 \text{ }^\circ\text{C} - 90 \text{ }^\circ\text{C}$

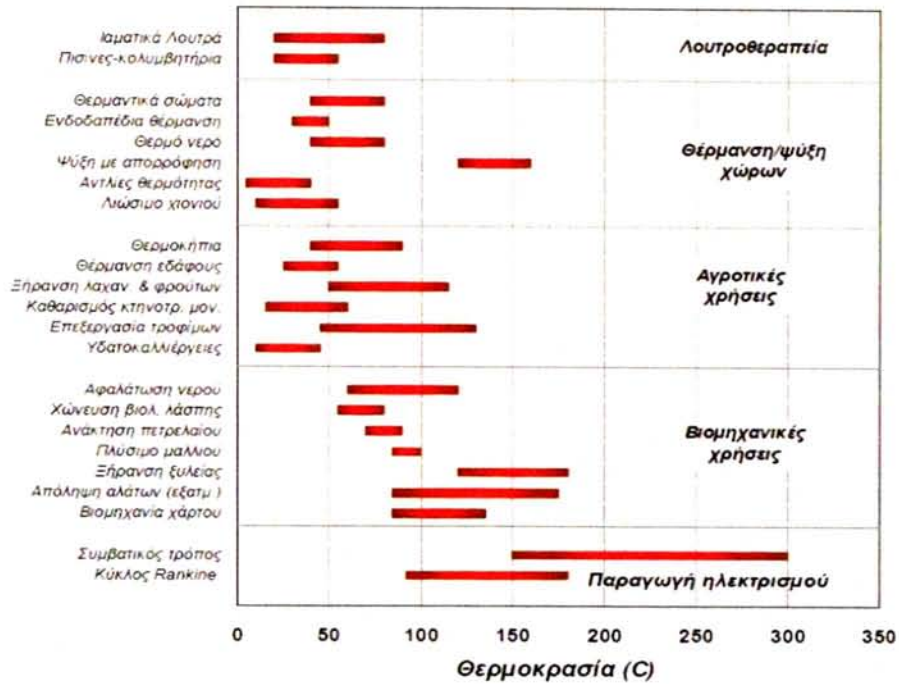
Η γεωθερμική ενέργεια των ρευστών υψηλής ενθαλπίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας περιλαμβάνουν (Αρβανίτης, 2008 · Πολύζου, 2007):

- α) Αντλίες θερμότητας συνδεδεμένες στο έδαφος,
- β) Θέρμανση χώρων,
- γ) Αγροτικές χρήσεις,
- δ) Υδατοκαλλιέργειες,
- ε) Βιομηχανικές εφαρμογές,
- στ) Λουτροθεραπεία και θέρμανση πισινών,
- ζ) Άλλες χρήσεις.



Σχήμα 2.4: Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών (Πολύζου, 2007)

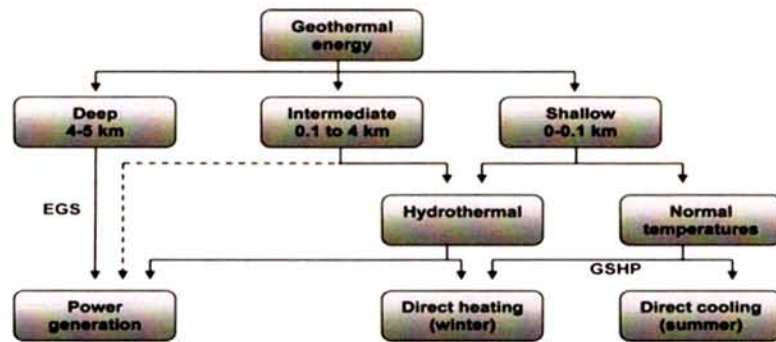
Κεφάλαιο 2^ο : Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας



Σχήμα 2.5: Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal: χρήσεις γεωθερμίας (Φυτίκας κ.α., 2008)



Σχήμα 2.6: Χρήσεις γεωθερμικής ενέργειας (Αρβανίτης, 2008)

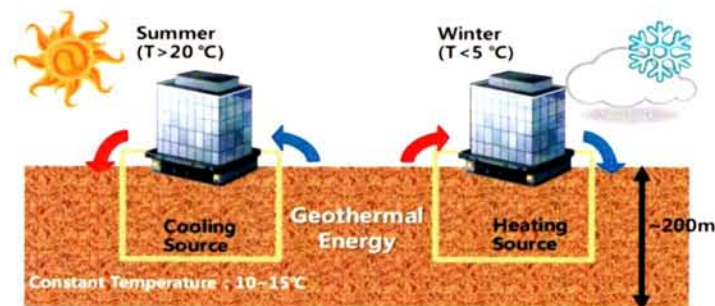


Σχήμα 2.7: Χρήσεις γεωθερμικής ενέργειας (Johnsston et al., 2011, as cited in Cervera, 2013)

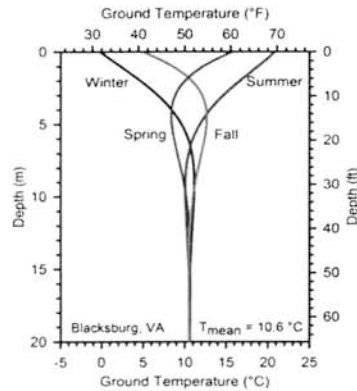
Η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται με τη χρήση αντλιών θερμότητας συνδεδεμένων στο έδαφος για θέρμανση και δροσισμό κτιρίων και για παραγωγή ζεστού νερού, ενώ η εκμετάλλευσή της γίνεται χρησιμοποιώντας ως πηγή ενέργειας είτε τα αβαθή υπόγεια ή επιφανειακά νερά, είτε τα πετρώματα μικρού βάθους (Πολύζου, 2007).

Πλεονεκτήματα αβαθούς γεωθερμίας

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αβαθών γεωθερμικών πηγών είναι οι σταθερές θερμοκρασίες σε όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς δεν επηρεάζονται από τις θερμοκρασιακές και μετεωρολογικές, εποχιακές και ημερήσιες μεταβολές που συμβαίνουν στον αέρα και την επιφάνεια του εδάφους (Παπαγεωργάκης Ι. 1992, οπ. αναφ. στη Πολύζου, 2007). Συνεπώς η θερμοκρασία του εδάφους κάτω από ένα ορισμένο βάθος είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα το χειμώνα και χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα το καλοκαίρι και ως εκ τούτου, το έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας το χειμώνα και ως αποθήκη θερμότητας το καλοκαίρι.



Σχήμα 2.8: Αξιοποίηση αβαθούς γεωθερμίας για θέρμανση το χειμώνα και για δροσισμό το καλοκαίρι (Lee, 2009, as cited in Cervera, 2013)



Σχήμα 2.9: Θερμοκρασία εδάφους σε σχέση με το βάθος από την επιφάνεια (Olgun & McCartney, 2014)

Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους κάτω από 10 - 15 m, περίπου στους 10 - 15 °C στις περισσότερες Ευρωπαϊκές περιοχές και μεταξύ 20 - 25 °C (έως και 28 °C) στις τροπικές περιοχές, όπου εξακολουθεί να επιτρέπει το δροσισμό των κτιρίων (Brandl, 2006). Οι περιοχές με ψυχρό κλίμα και λιγότερη ηλιοφάνεια έχουν και λιγότερη αποθηκευμένη θερμότητα στο έδαφος, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες του υπεδάφους να παραμένουν σταθερές σε χαμηλότερη θερμοκρασία (Αποστολίδου, 2010).

Η αβαθής γεωθερμία έχει σχεδόν μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και από την εκμετάλλευσή της δεν παράγονται κανενός είδους ρύποι (Αρβανίτης, 2008). Οι μόνες περιβαλλοντικές οχλήσεις συμβαίνουν προσωρινά κατά τη διάρκεια της κατασκευής του συστήματος, ενώ μετά την ολοκλήρωσή του υπάρχει πλήρης αποκατάσταση του τοπίου και απουσιάζει οποιαδήποτε εξωτερική μονάδα (Αρβανίτης, 2008). Επιπλέον είναι διαθέσιμη όλο το χρόνο και σε κάθε έδαφος σε όλες τις ηπείρους.

Όπως σημειώνουν οι Φυτίκας κ.α. (2008), η αβαθής γεωθερμία είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή γεωθερμικής ενέργειας, ενώ ο Καρύτσας (2015) εκτιμάει ότι η αβαθής γεωθερμία έχει σημαντική δυναμική εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ότι είναι το κλειδί για την επίτευξη των στόχων «20 - 20 - 20» που έχει θέσει η Ε.Ε. μέχρι το έτος 2020:

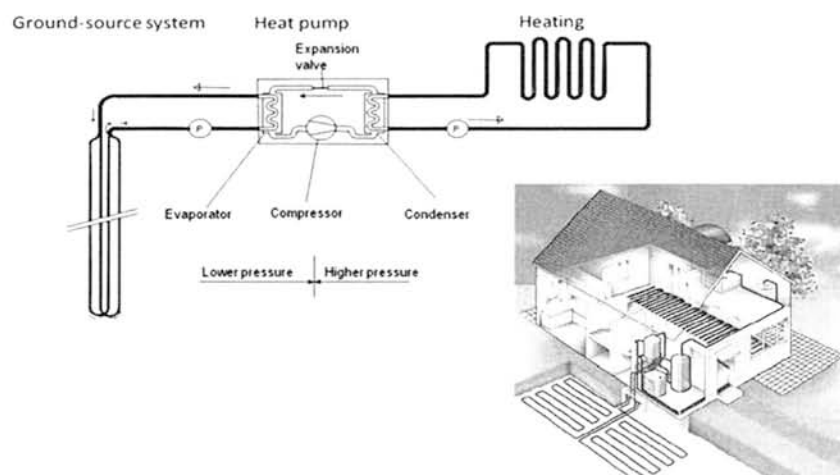
1. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 20 % σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.
2. Αύξηση χρήσης α.π.ε. στο 20 % της ενεργειακής κατανάλωσης.
3. Αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας τουλάχιστον κατά 20 %.

2.2. Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας

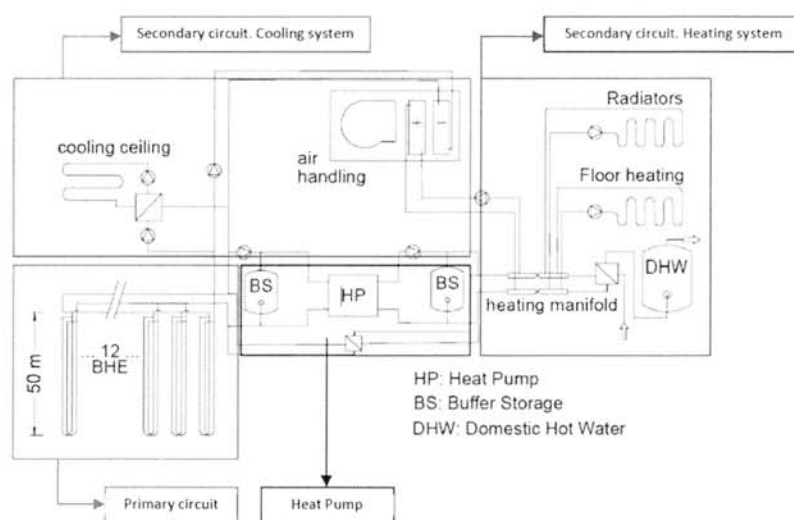
Ορολογία και ταξινόμηση

Ένα σύστημα αβαθούς γεωθερμίας (σ.α.γ.) κατά κανόνα αποτελείται από τρία μέρη (Brandl, 2006):

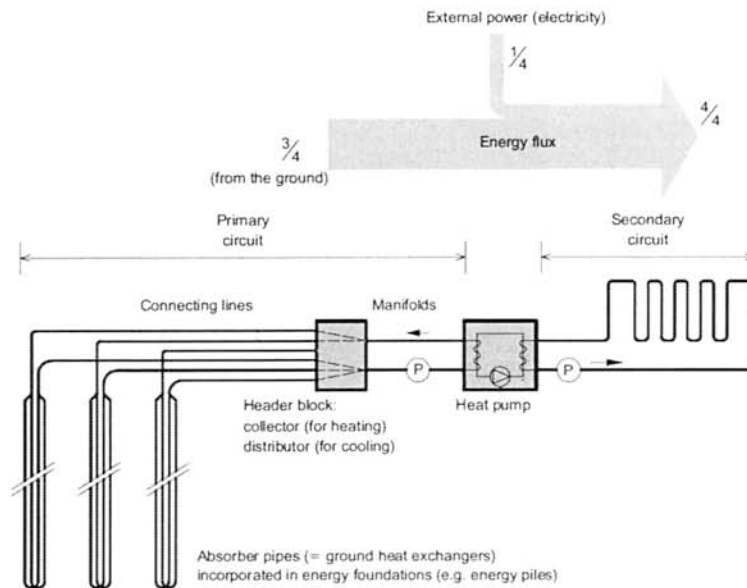
1. Πρωτεύον δίκτυο ή κύκλωμα (primary circuit), δηλαδή το ενσωματωμένο στο έδαφος δίκτυο σωλήνων που απορροφά ή απορρίπτει θερμότητα στη γη.
2. Γεωθερμική αντλία θερμότητας (geothermal heat pump).
3. Δευτερεύον δίκτυο ή κύκλωμα (secondary circuit), δηλαδή το εσωτερικό στο κτίριο/κατασκευή δίκτυο σωλήνων εκπομπής ή απορρόφησης θερμότητας.



Σχήμα 2.10: Διάταξη συστήματος αβαθούς γεωθερμίας (Μιχόπουλος, 2011)



Σχήμα 2.11: Διάταξη συστήματος αβαθούς γεωθερμίας (Sanner, 2005, as cited in Cervera, 2013)



Σχήμα 2.12: Διάταξη συστήματος αβαθούς γεωθερμίας (Brandl, 2006)

Συνήθως η ταξινόμηση των σ.α.γ. γίνεται με βάση το είδος του πρωτεύοντος δικτύου. Με κριτήριο αν στο πρωτεύον δίκτυο χρησιμοποιούνται απευθείας υπόγεια ή επιφανειακά νερά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου ή αν χρησιμοποιείται κλειστό κύκλωμα σωλήνων όπου ανακυκλοφορεί ρευστό - φορέας θερμότητας, τα σ.α.γ. διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού κύκλου (γεωεναλλάκτες) αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την «Εφημερίδα της κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας», τεύχος δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1249: Απ. Αρ. Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488, 24 Ιουνίου 2009, με τίτλο «Άδειες εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανση-ψύξης χώρων μέσω εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό» (οπ. αναφ. στο Μιχόπουλο, 2011),

α) Σύστημα, είναι ο συνδυασμός μηχανημάτων ή/και δικτύων ή/και γεωτρήσεων ή/και εγκαταστάσεων, με τον οποίο επιτυγχάνεται η θέρμανση ή και η ψύξη χώρων μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται από την κείμενη νομοθεσία ως γεωθερμικό δυναμικό.

β) Σύστημα κλειστού κυκλώματος ονομάζεται εκείνο το οποίο συνδυάζει αντλία θερμότητας με γεωεναλλάκτη. Ο γεωεναλλάκτης αποτελεί σύνολο σωληνώσεων εντός του εδάφους ή εντός γεωτρήσεων μετά των παρελκομένων του όπου κυκλοφορεί ρευστό σε κλειστό κύκλο, έτσι ώστε να υφίσταται μεταφορά θερμότητας από ή προς το έδαφος χωρίς άντληση νερού.

γ) Όποιο σύστημα δεν ορίζεται ως κλειστό κυκλώματος κατά τα ανωτέρω, χαρακτηρίζεται ως σύστημα ανοικτού κυκλώματος και μπορεί να περιλαμβάνει μεταξύ των άλλων παραγωγική γεώτρηση και γεώτρηση επανεισαγωγής.

δ) Παραγωγική γεώτρηση (extraction well) ανοικτού κυκλώματος είναι η γεώτρηση άντλησης ρευστού από το υπέδαφος.

ε) Γεώτρηση επανεισαγωγής (ή επανέγχυσης) (recharge well) ανοικτού κυκλώματος είναι η γεώτρηση, με την οποία το ρευστό οδηγείται από την επιφάνεια στον υπόγειο αποδέκτη από τον οποίο αντλήθηκε.



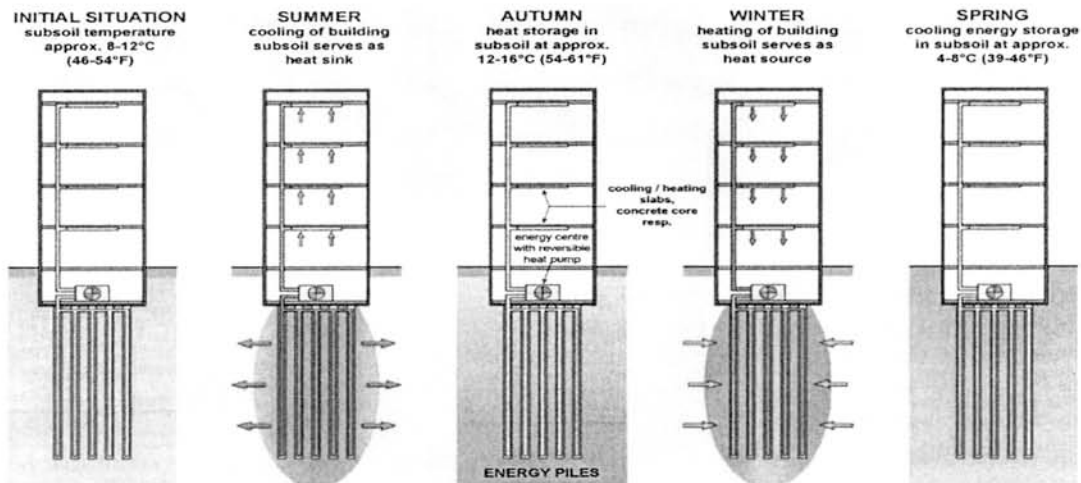
Σχήμα 2.13: Κατηγορίες συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας (Μιχόπουλος, 2011)

Με βάση τις απαιτήσεις του κτιρίου σε θέρμανση – δροσισμό, τον τρόπο της θερμικής ενεργοποίησης του εδάφους και τη θερμική του διαχυτότητα, τα συστήματα γεωεναλλακτών διακρίνονται σε (Μποζής, 2011):

α) συστήματα με μια μόνο φάση λειτουργίας, δηλαδή κατά βάση συστήματα που λειτουργούν μόνο για τη θέρμανση των κτιρίων, όπου η θερμική διαχυτότητα του εδάφους είναι μεγάλη και η θερμική του ισορροπία του μέσα στο έτος επιτελείται μέσω του μηχανισμού θερμικής αναγέννησης (natural thermal recharge) μετά το πέρας της περιόδου θέρμανσης, με εισροή θερμότητας από γειτονικά εδάφη,

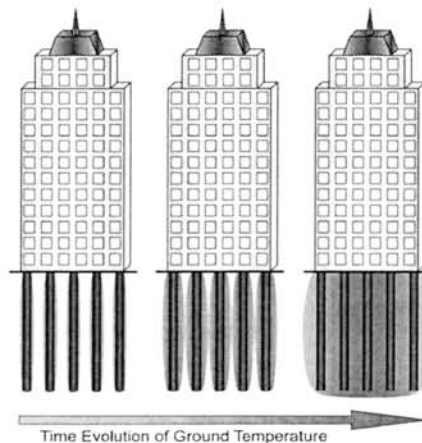
β) συστήματα που στη διάρκεια του έτους αξιοποιούν τη θερμικά ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους κυρίως ως αποθήκη θερμότητας (seasonal heat storage), όπου η θερμική διαχυτότητα του εδάφους είναι μικρή και τα οποία αποθηκεύουν θερμότητα στο έδαφος το καλοκαίρι για το δροσισμό του κτιρίου, την οποία εξάγουν το χειμώνα για τη θέρμανσή του.

Κεφάλαιο 2^ο : Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας



Σχήμα 2.14: Εποχιακή λειτουργία (seasonal operation) ενεργειακών πασσάλων (Brandl, 2008)

Σε χώρες με ψυχρά ή θερμά κλίματα, όπου επικρατούν οι απαιτήσεις είτε σε θέρμανση, είτε σε δροσισμό, υπάρχει ο κίνδυνος σταδιακής μείωσης ή αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθος χρόνου αντίστοιχα (Olgun et al., 2014b).



Σχήμα 2.15: Σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθος χρόνου (Olgun et al., 2014b)

Για να αποφευχθεί αυτός ο κίνδυνος, στις περιοχές όπου κυριαρχεί η λειτουργία θέρμανσης χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες (solar panels) για την θερμική επαναφόρτιση του εδάφους τους καλοκαιρινούς μήνες και την κάλυψη μέρους των θερμικών απαιτήσεων το χειμώνα, ενώ στις περιοχές όπου κυριαρχεί η λειτουργία δροσισμού, εισάγεται στο έδαφος θερμική ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας (cold energy) κατά τη διάρκεια της νύχτας (de Moel et al., 2010). Σε χώρες «4^{ov} εποχών» με ήπιο κλίμα, όπως η Ελλάδα, λόγω των ισοβαθμισμένων απαιτήσεων των κτιρίων

σε θέρμανση και δροσισμό στη διάρκεια του έτους δεν υπάρχει αυτός ο κίνδυνος, γεγονός που καθιστά πλεονεκτική τη θέση της χώρας σε σχέση με χώρες όπως οι Σκανδιναβικές, όπου εντούτοις τα σ.α.γ. χρησιμοποιούνται ευρέως δεκαετίες τώρα (Αποστολίδου, 2010).

Με κριτήριο το ρευστό που κυκλοφορεί στο εσωτερικό των σωλήνων του πρωτεύοντος δικτύου, τα σ.α.γ. διακρίνονται σε (Αποστολίδου, 2010):

- α) συστήματα στα οποία το ρευστό είναι νερό ή αντιψυκτικό υγρό
- β) συστήματα στα οποία το ρευστό είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας

Αναφορικά με την ορολογία των σ.α.γ., θα πρέπει να γίνει μια διευκρίνιση σχετικά με την εννοιολογική σύγχυση του όρου «σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (γ.α.θ.)» (geothermal heat pump system) που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία: αφενός ο όρος αυτός χρησιμοποιείται με την έννοια του σ.α.γ. με τα 3 μέρη όπως προαναφέρθηκαν και αφετέρου με την έννοια της μεμονωμένης συσκευής που είναι ένα από τα 3 αυτά μέρη. Κατ' επέκτασιν δε θα πρέπει να συγχέεται η απόδοση της συσκευής αντλίας θερμότητας με την απόδοση του σ.α.γ. συνολικά.

Πρέπει επιπλέον να διασαφηνιστεί η εννοιολογική σύγχυση του όρου «σύστημα γεωεναλλάκτη θερμότητας» (ground heat exchanger system, GHE) που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία: παρομοίως, αφενός ο όρος αυτός χρησιμοποιείται με την έννοια του σ.α.γ. με τα 3 μέρη όπως προαναφέρθηκαν και αφετέρου με την έννοια του γεωεναλλάκτη θερμότητας που είναι ένα από τα 3 αυτά μέρη.

Οι όροι «σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας» και «σύστημα γεωεναλλάκτη θερμότητας» συνήθως αναφέρονται δηλαδή συνολικά στο σ.α.γ. με τα 3 μέρη όπως προαναφέρθηκαν και όχι σε κάποιο μεμονωμένο μέρος του συστήματος.

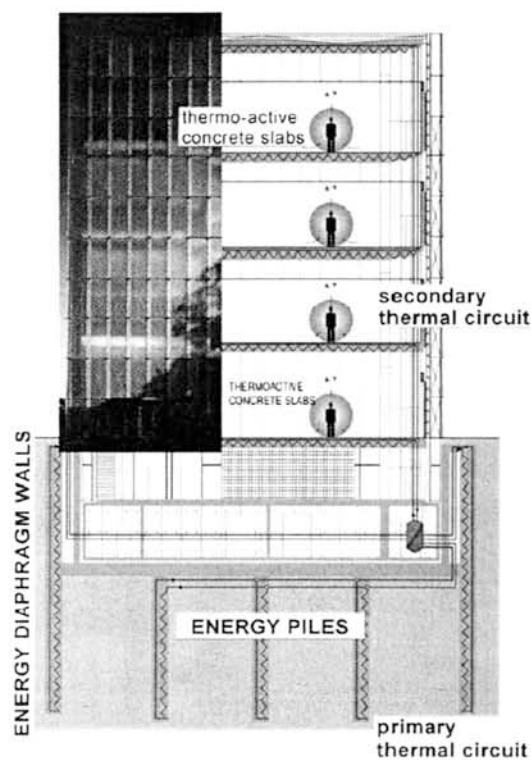
Παρατηρείται επίσης σύγχυση ως προς τον όρο «γεωεναλλάκτης», καθώς κάποιοι συγγραφείς τον χρησιμοποιούν με την έννοια του πρωτεύοντος δικτύου γενικά, κλειστού ή ανοικτού κύκλου, ενώ σύμφωνα με την προαναφερθείσα απόφαση κυβερνήσεως, με τον όρο γεωεναλλάκτης αναφερόμαστε σε πρωτεύον κλειστό κύκλωμα σωλήνων απορρόφησης - εκπομπής θερμότητας.

Ενεργειακές γεωκατασκευές

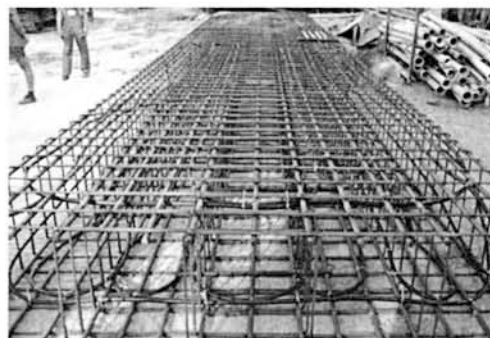
Μια ξεχωριστή κατηγορία κλειστών σ.α.γ. είναι οι ενεργειακές γεωκατασκευές (energy geostuctures), οι οποίες αποτελούν στατικά στοιχεία σκυροδέματος στα οποία έχουν ενσωματωθεί γεωεναλλάκτες: ενεργειακοί πάσσαλοι, πλάκες (slabs)

υπογείων, συστήματα τάφρων (slurry trench systems), διαφραγματικοί τοίχοι, τοίχοι αντιστήριξης (retaining walls), τοίχοι υπογείων και γκαράζ, επενδύσεις σηράγγων (tunnel linings), αγκυρώσεις σηράγγων (tunnel anchors), επιχώματα (embankments) (Brandl, 2006; Mimouni, 2014).

Ανάλογα με το αν καλύπτουν εξ ολοκλήρου τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων, ή αν συνδυάζονται με συμβατικά συστήματα για το σκοπό αυτό, οι ενεργειακές γεωκατασκευές διακρίνονται σε μονοσθενείς (monovalent) ή δισθενείς (bivalent) αντίστοιχα (Mimouni, 2014).



Σχήμα 2.16: Ενεργειακές γεωκατασκευές (Brandl, 2013)

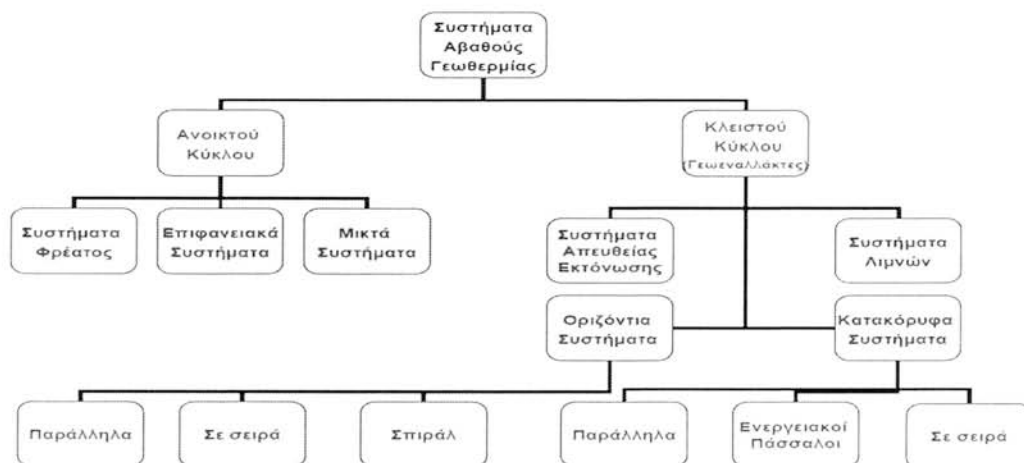


Σχήμα 2.17: Σωλήνες ενσωματωμένοι σε κλωβό οπλισμού διαφραγματικού τοίχου (Brandl, 2008)

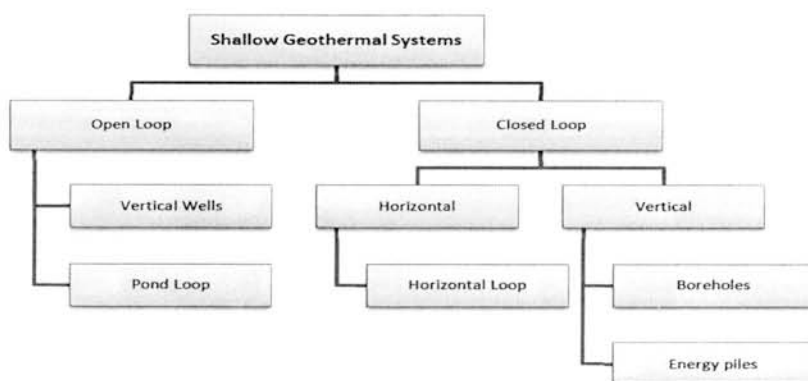
2.2.1. Πρωτεύον δίκτυο

Ο ρόλος του πρωτεύοντος δικτύου ενός σ.α.γ., το οποίο είναι σε επαφή είτε με το υπέδαφος, είτε με υπόγεια ή επιφανειακά νερά, είναι η απορρόφηση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας για θέρμανση το χειμώνα ή η απόρριψη της περιττής θερμότητας για δροσισμό το καλοκαίρι.

Όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα ταξινόμησης των σ.α.γ., τα συστήματα κλειστού κύκλου (γεωεναλλάκτες) διακρίνονται περαιτέρω σε οριζόντια, κάθετα, λιμνών και απευθείας εκτόνωσης. Τα κάθετα αφορούν τις κατακόρυφες γεωτρήσεις (vertical borehole heat exchangers, BHE), και τους ενεργειακούς πασσάλους, ενώ θα μπορούσαμε να προσθέσουμε και τους ενεργειακούς τοίχους. Οι κατακόρυφες γεωτρήσεις κατασκευάζονται εκτός των ορίων του κτιρίου, ενώ μετά την ανόρυξή τους βυθίζονται οι βρόχοι σωλήνων και κατόπιν πληρώνονται με αδρανή (Μποζής, 2011).

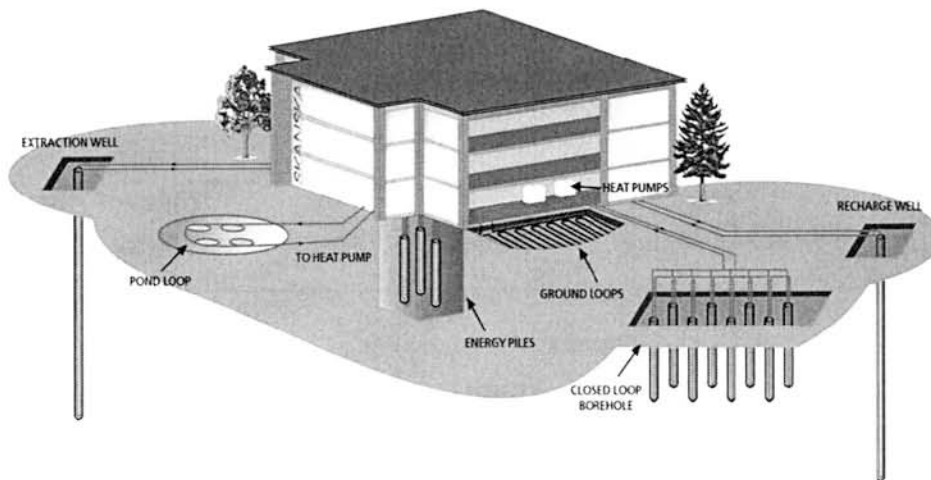


Σχήμα 2.18: Κατηγορίες συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας (Μιχόπουλος, 2011)

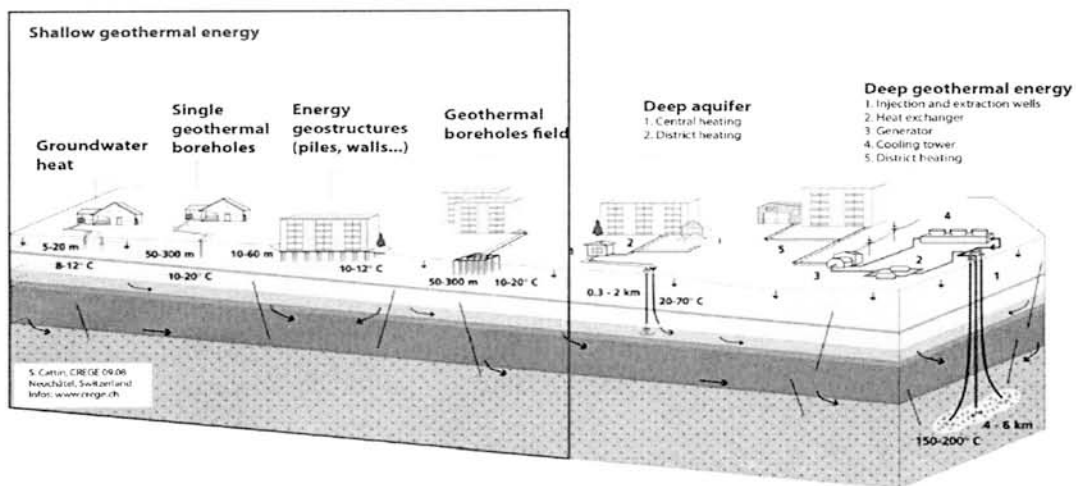


Σχήμα 2.19: Κατηγορίες συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας (LLopis & Rodrigo, 2010, as cited in Cervera, 2013)

Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματικά τα διάφορα σ.α.γ. που αναφέρονται στα παραπάνω διαγράμματα ταξινόμησης.

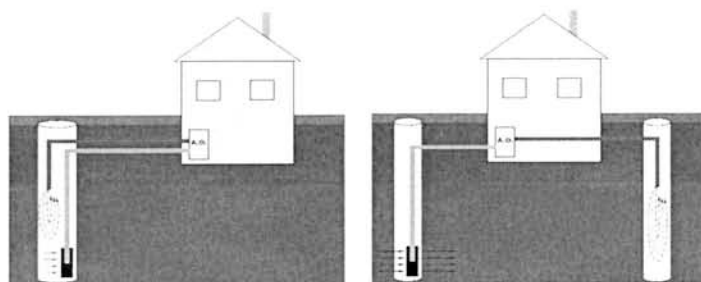


Σχήμα 2.20: Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας (Loveridge, 2012)



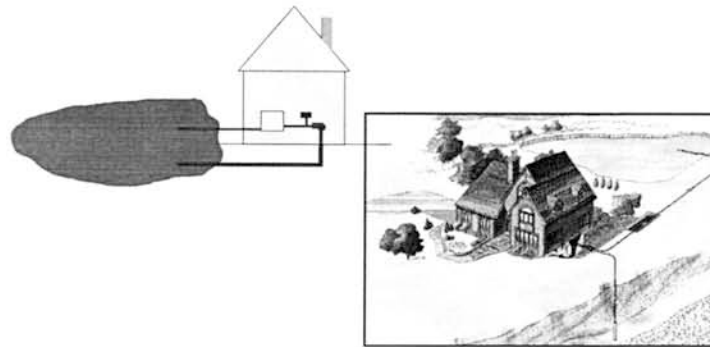
Σχήμα 2.21: Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας (Mimouni, 2014)

Ανοικτού κύκλου

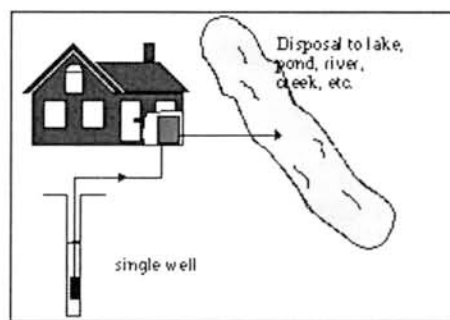


Σχήμα 2.22: Σύστημα φρέατος (Μιχόπουλος, 2011)

Κεφάλαιο 2^ο : Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας

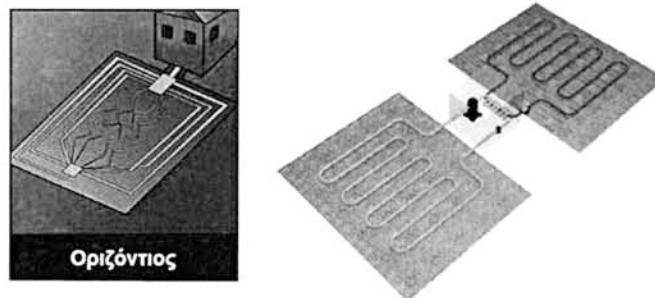


Σχήμα 2.23: Επιφανειακό και μικτό σύστημα (Μιχόπουλος, 2011)

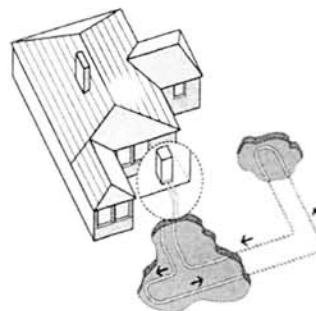


Σχήμα 2.24: Μικτό σύστημα (Πολύζου, 2007)

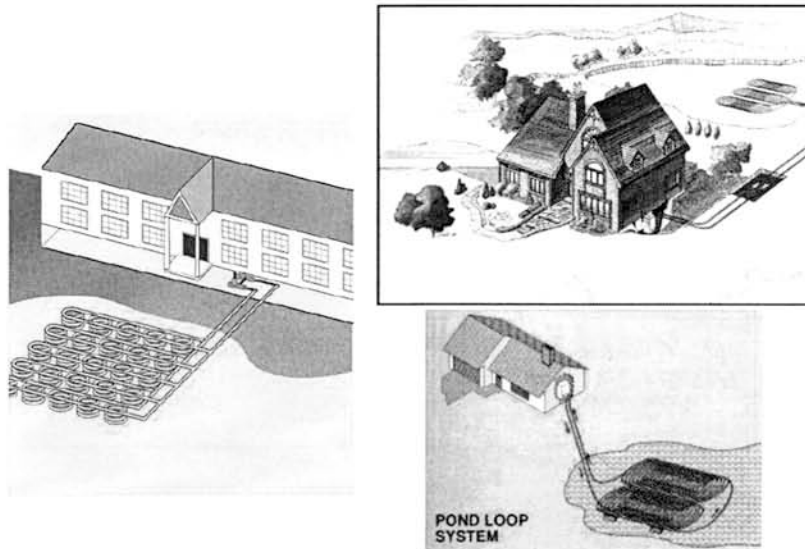
Κλειστού κύκλου - Γεωεναλλάκτες



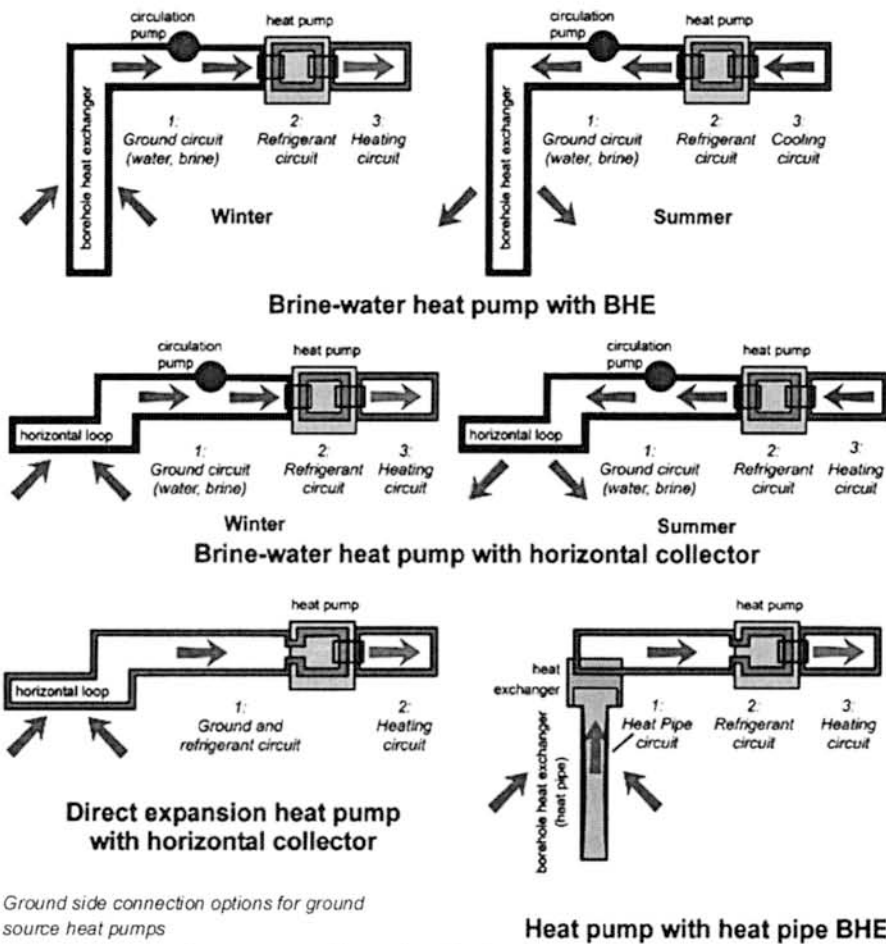
Σχήμα 2.25: Συστήματα απευθείας εκτόνωσης (direct expansion) (Μιχόπουλος, 2011)



Σχήμα 2.26: Σύστημα λιμνών (Μαστοράκη, 2012)

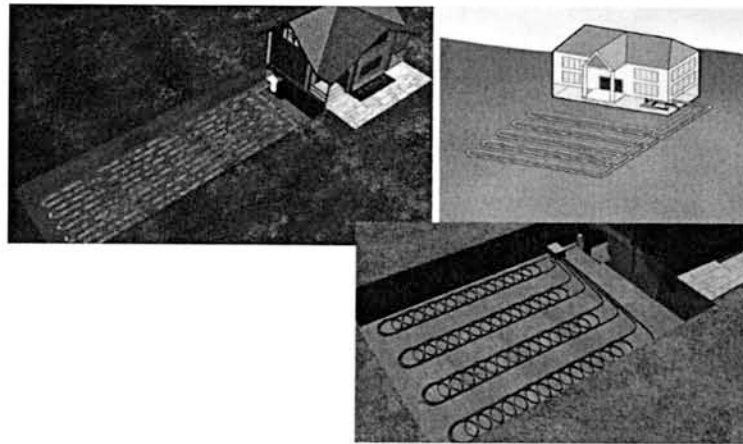


Σχήμα 2.27: Συστήματα λιμνών (Μιχόπουλος, 2011)

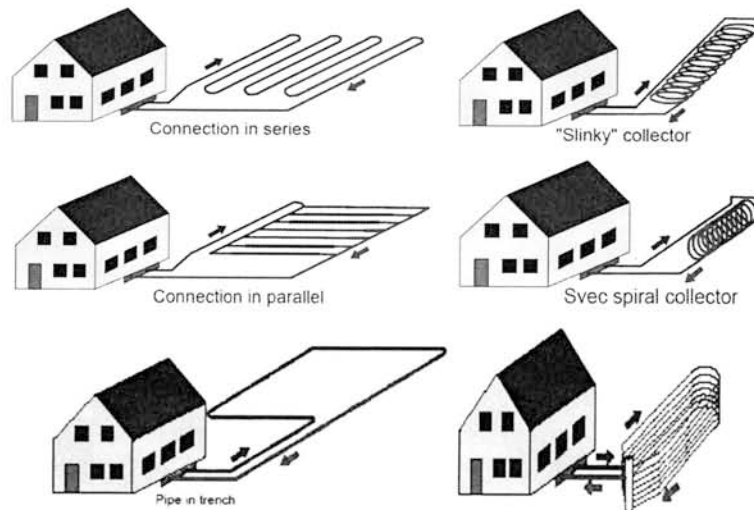


Σχήμα 2.28: Διάφοροι τύποι γεωεναλλακτών. Τα 2 τελευταία συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για θέρμανση (EGEC, 2009)

Οριζόντιοι γεωεναλλάκτες

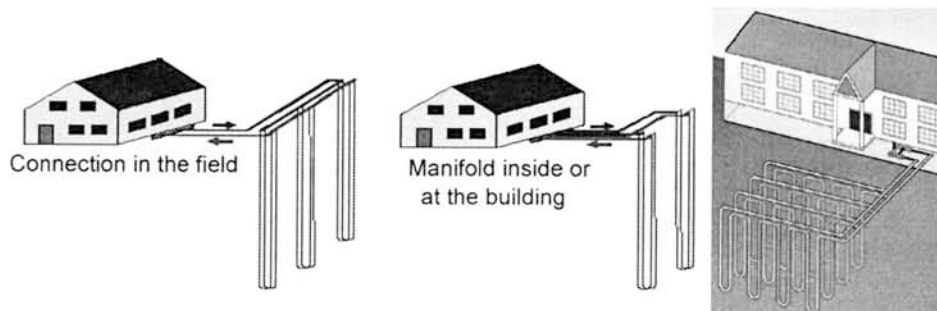


Σχήμα 2.29: Οριζόντιοι γεωεναλλάκτες (Μιχόπουλος, 2011)

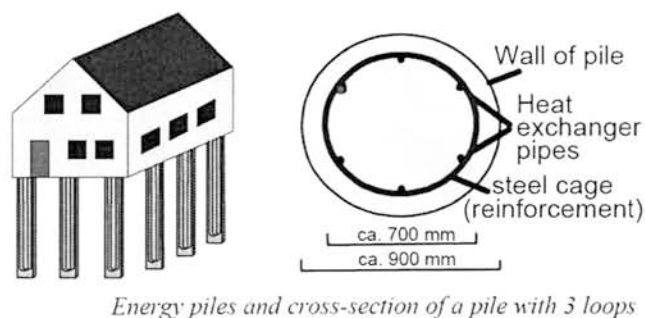


Σχήμα 2.30: Διάφοροι τύποι οριζοντίων γεωεναλλακτών (Omer, 2006; Mands & Sanner, n.d.)

Κάθετοι γεωεναλλάκτες



Σχήμα 2.31: Κατακόρυφες γεωτρήσεις σε σειρά, παράλληλα (Omer, 2006) και μικτά (Μιχόπουλος, 2011)

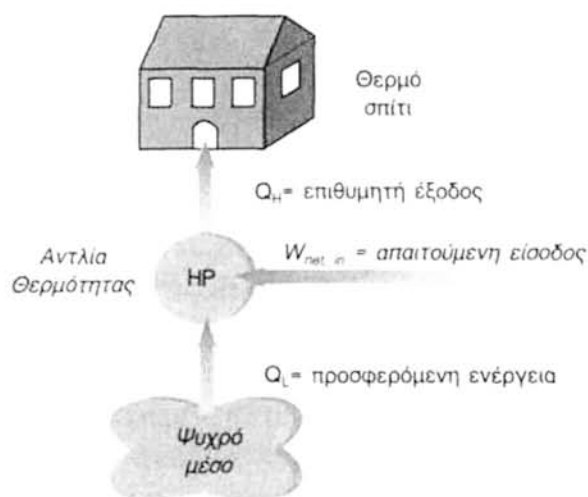


Σχήμα 2.32: Ενεργειακοί πάσσαλοι (Mands & Sanner, n.d.)

2.2.2. Γεωθερμική αντλία θερμότητας

Ορισμός, τύποι και χρήσεις

Γενικά η αντλία θερμότητας (heat pump) είναι μια μηχανή που μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο με χαμηλότερη θερμοκρασία σε ένα άλλο με υψηλότερη θερμοκρασία, είτε για την ψύξη/δροσισμό του πρώτου μέσου, είτε για τη θέρμανση του δεύτερου (Αποστολίδου, 2010 · Μαστοράκη, 2012 · Οικονόμου, 2012) και δεν πρέπει να συγχέεται με τις αντλίες ανακυκλοφορίας του ρευστού (circulation pumps) στους σωλήνες του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου.



Σχήμα 2.33: Αρχή λειτουργίας αντλίας θερμότητας (Οικονόμου, 2012)

Δύο γνωστά παραδείγματα αντλιών θερμότητας είναι τα ψυγεία και τα κλιματιστικά, τα οποία χρησιμοποιούν ως πηγή θερμότητας τον αέρα (air source heat pumps) στο εσωτερικό του ψυγείου και του δωματίου αντίστοιχα, την οποία

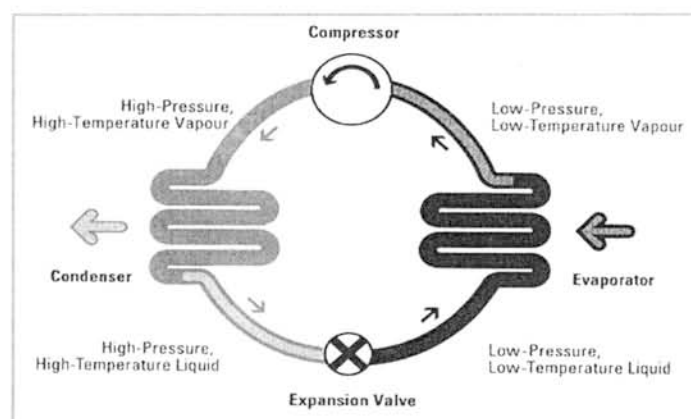
μεταφέρουν στο εξωτερικό τους, με σκοπό την ψύξη και το δροσισμό αντίστοιχα των χώρων αυτών (Αποστολίδου, 2010 · Μαστοράκη, 2012).

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (γ.α.θ., geothermal heat pumps), οι οποίες συνδέουν τα πρωτεύοντα με τα δευτερεύοντα δίκτυα των σ.α.γ., χρησιμοποιούν ως πηγή θερμότητας τους αβαθείς γεωθερμικούς πόρους, δηλαδή είτε το υπέδαφος (ground source heat pumps, GSHP ή ground coupled heat pumps) και τα υπόγεια νερά μικρού βάθους, είτε επιφανειακά νερά (water source heat pumps), την οποία μεταφέρουν στο κτίριο για τη θέρμανσή του το χειμώνα. Επειδή όμως σύμφωνα με το 2^ο νόμο της θερμοδυναμικής, η φυσική ροή της θερμότητας γίνεται από από ένα μέσο με υψηλότερη σε ένα μέσο με χαμηλότερη θερμοκρασία (Αποστολίδου, 2010 · Μαστοράκη, 2012), απαιτείται για τη διαδικασία αυτή η εφαρμογή μιας μικρής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας για την αναβάθμιση των αρχικά μη αξιοποιήσιμων αβαθών γεωθερμικών πόρων θερμότητας θερμοκρασίας συνήθως 10 - 15 °C, σε μια υψηλότερη, χρησιμοποιήσιμη θερμοκρασία, μεταξύ 25 - 35 °C (Brandl, 2006).

Ωστόσο, οι περισσότερες γ.α.θ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το δροσισμό του κτιρίου το καλοκαίρι, αποθηκεύοντας στο έδαφος την περιττή θερμότητα από το εσωτερικό του κτιρίου, καθώς και για την παραγωγή ζεστού νερού.

Λειτουργία

Τα βασικά μέρη μιας αντλίας θερμότητας είναι ο εξατμιστής (evaporator), ο συμπιεστής (compressor), ο συμπυκνωτής (condenser) και η βαλβίδα εκτόνωσης (expansion valve).



Σχήμα 2.34: Θερμοδυναμικός κύκλος αντλίας θερμότητας (Μαστοράκη, 2012)

Ο κύκλος που ακολουθεί μια γ.α.θ. για την αναβάθμιση της θερμοκρασίας της διαθέσιμης θερμότητας του εδάφους με σκοπό τη θέρμανση του κτιρίου είναι ο εξής (Self et al., 2013; Αποστολίδου, 2010 · Μαστοράκη, 2012):

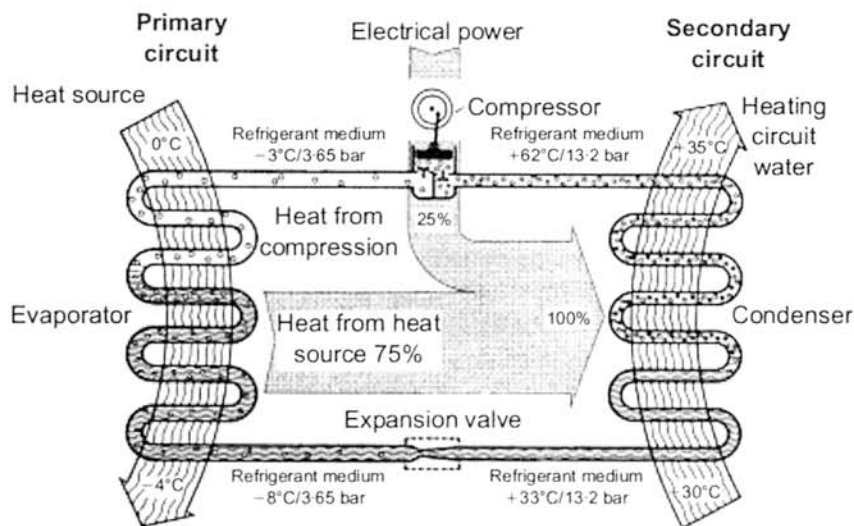
1. Στον εξατμιστή, η θερμότητα που λαμβάνεται από τις αβαθείς γεωθερμικές πηγές μέσω του πρωτεύοντος δικτύου, προκαλεί τη μετατροπή από υγρό σε αέριο του οικολογικού ψυκτικού μέσου μεταφοράς θερμότητας με χαμηλό σημείο βρασμού που ανακυκλοφορεί στο κύκλωμα της γ.α.θ..

2. Στο συμπιεστή, με την εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η πίεση του αερίου ψυκτικού μέσου αυξάνεται, καθώς και η θερμοκρασία του, η οποία είναι πλέον σε επίπεδο κατάλληλο για τη θέρμανση του κτιρίου.

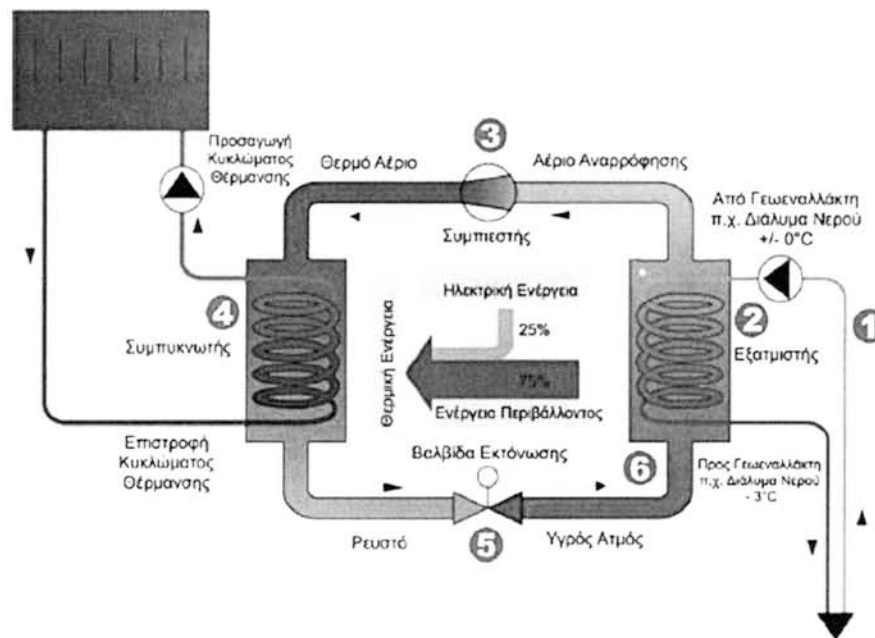
3. Στο συμπυκνωτή, το αέριο ψυκτικό μέσο υδροποιείται, καθώς η θερμότητα μεταφέρεται στο δευτερεύον δίκτυο για τη θέρμανση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου.

4. Στη βαλβίδα εκτόνωσης, η πίεση καθώς και η θερμοκρασία του υγρού ψυκτικού μέσου πέφτει.

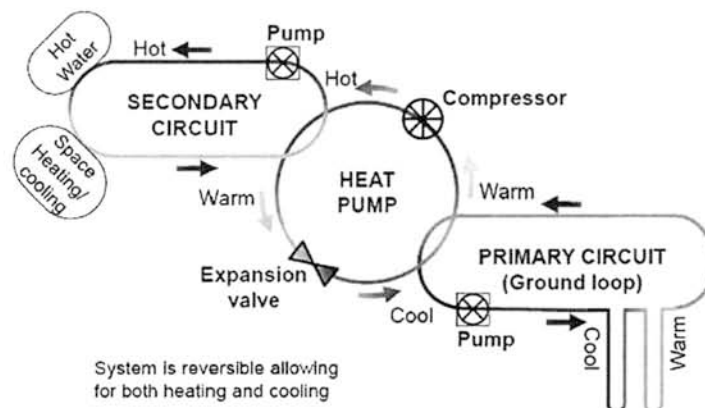
5. Το χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας υγρό ψυκτικό μέσο ρέει και πάλι προς τον εξατμιστή και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 2.35: Λειτουργία αντλίας θερμότητας για θέρμανση: η μεταφορά θερμότητας γίνεται από το πρωτεύον κύκλωμα στο ψυκτικό μέσο διαμέσου του εξατμιστή και από το ψυκτικό μέσο στο δευτερεύον κύκλωμα διαμέσου του συμπυκνωτή (Brandl, 2006)



Σχήμα 2.36: Λειτουργία γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση (Αποστολίδου, 2010)



Σχήμα 2.37: Λειτουργία γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση (Perry et al., 2011, as cited in Loveridge, 2012)

Για το δροσισμό του κτιρίου ο παραπάνω κύκλος αντιστρέφεται. Αυτό πραγματοποιείται μέσω μιας βαλβίδας αντιστροφής (ή εναλλαγής), μέσω της οποίας αντιστρέφεται η κατεύθυνση του ψυκτικού μέσου στο κύκλωμα της γ.α.θ., επιτρέποντας τη χρήση της ίδιας συσκευής για το δροσισμό του κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή το δευτερεύον δίκτυο λειτουργεί ως εξατμιστής και το πρωτεύον δίκτυο ως συμπυκνωτής (Herbasli and Kalinci, 2009; RETScreen International, 2005, as cited in Self et al., 2013; Αποστολίδου, 2010 · Οικονόμου, 2012 · Μποζής, 2011).

Όπως σημειώνει ο Μποζής (2011) με βάση το παραπάνω σχήμα, το θερμοκρασιακό επίπεδο στον εναλλάκτη Β, ο οποίος λειτουργεί ως συμπυκνωτής στη θέρμανση και ως εξατμιστής στη ψύξη, συνήθως ρυθμίζεται από το θερμοστάτη της γ.α.θ. και είναι χαρακτηριστικό της σχεδίασης του δευτερεύοντος δικτύου του κτιρίου. Το θερμοκρασιακό επίπεδο στον εναλλάκτη Α, ο οποίος λειτουργεί ως εξατμιστής στη θέρμανση και ως συμπυκνωτής στην ψύξη, καθορίζεται από τη λειτουργία του πεδίου γεωεναλλάκτη, της σύνθετης δηλαδή διάταξης εναλλαγής και αποθήκευσης θερμότητας που συναποτελούν το πρωτεύον δίκτυο και ο θερμικά ενεργοποιούμενος όγκος του εδάφους.

Απόδοση

Ο συντελεστής απόδοσης COP (coefficient of performance) μιας αντλίας θερμότητας ορίζεται από τη σχέση (Brandl, 2006):

$$COP = (\text{ενεργειακό προϊόν από την αντλία θερμότητας [kW]}) / (\text{εισροή ενέργειας για τη λειτουργία της [kW]})$$

Ο συντελεστής εποχιακής απόδοσης SPF (seasonal performance factor) ορίζεται από τη σχέση (Brandl, 2006):

$$SPF = (\text{χρησιμοποιούμενο ενεργειακό προϊόν του ενεργειακού συστήματος [kW]}) / (\text{εισροή ενέργειας για τη λειτουργία του ενεργειακού συστήματος [kW]})$$

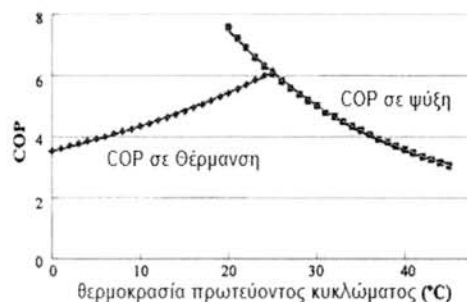
και εκφράζει την απόδοση του σ.α.γ. συνολικά, συμπεριλαμβάνοντας πέραν της αντλίας θερμότητας και τα άλλα στοιχεία που καταναλώνουν ενέργεια (αντλίες ανακυκλοφορίας).

Μια αντλία θερμότητας έχει μεγαλύτερη απόδοση όταν η διαφορά θερμοκρασίας πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κυκλώματος είναι μικρότερη, το οποίο για τη λειτουργία θέρμανσης σημαίνει υψηλή θερμοκρασία γεωεναλλάκτη - χαμηλή θερμοκρασία διανομής, ενώ για τη λειτουργία δροσισμού χαμηλή θερμοκρασία γεωεναλλάκτη - υψηλή θερμοκρασία διανομής (Μποζής, 2013). Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων Q_B του κτιρίου, ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας μεγαλώνει όσο μειώνεται η ηλεκτρική ισχύς E στο συμπιεστή και η τιμή της απορροφούμενης ή απορριπτόμενης θερμότητας Q_P αυξάνεται στη θέρμανση και μειώνεται στην ψύξη του κτιρίου αντίστοιχα (Μποζής, 2011). Επίσης, η αντλία θερμότητας λειτουργεί πιο αποδοτικά,

όσο η μέση τιμή των θερμοκρασιών $T_f = (T_{p,in} + T_{p,out}) / 2$ στο παραπάνω σχήμα διατηρείται όσο το δυνατό χαμηλότερα στην ψύξη και υψηλότερα στη θέρμανση (Μποζής, 2011).

Οι τιμές του συντελεστή απόδοσης των γ.α.θ. κυμαίνονται από 3 - 6 και η τιμή του εξαρτάται από το πρωτεύον δίκτυο, το μέγεθος του συστήματος, το βάθος εγκατάστασης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το κλίμα της περιοχής, κ.α. (Office of Energy Efficiency, 2009; Curtis et al., 2005, as cited in Self et al., 2013). Την επίδραση ενεργειακών πασσάλων στην απόδοση της γ.α.θ. εξέτασαν οι Wood et al. (2009). Ο Brandl (2006) εκτιμάει ότι για οικονομικούς λόγους, θα πρέπει η τιμή του συντελεστή απόδοσης να είναι $COP \geq 4$. Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία στο δευτερεύον κύκλωμα δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 35 - 45 °C και η θερμοκρασία στο πρωτεύον δεν πρέπει να πέσει κάτω από 0 - 5 °C, καθιστώντας τις γ.α.θ. ως συστήματα θέρμανσης - δροσισμού χαμηλής θερμοκρασίας (Brandl, 2006).

Οι de Moel et al. (2010) επισημαίνουν ότι ο σχεδιασμός του σ.α.γ. θα πρέπει να διασφαλίζει ότι η απόδοση της γ.α.θ. δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος συνολικά, ενώ ο Μποζής (2011) προσθέτει ότι σημαντικές μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα στο έτος θα μειώσουν την αποτελεσματικότητα της αντλίας θερμότητας, αλλά και των συστημάτων απορρόφησης - εκπομπής θερμότητας.



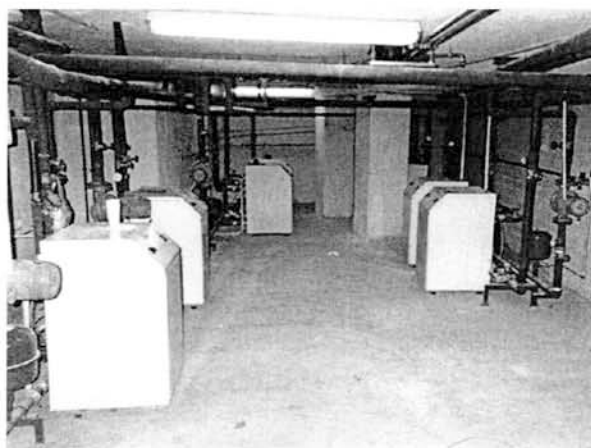
Σχήμα 2.40: Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας COP (coefficient of performance) σε θέρμανση και σε ψύξη (Μποζής, 2013)

Ιστορικό

Η αντλία θερμότητας εφευρέθηκε το 1855 από τον Αυστριακό μηχανικό μεταλλείων Peter Ritter von Rittinger (Boranyak, 2012), ενώ η πρώτη αντλία θερμότητας με πηγή θερμότητας το έδαφος εγκαταστάθηκε το 1945 στην Indianapolis, U.S.A., στο σπίτι του Robert C. Webber, υπάλληλου της εταιρείας “Indianapolis Power and Light Co.” (Αποστολίδου, 2010).

Οι πρώτες εφαρμογές γ.α.θ. στην Ευρώπη σημειώθηκαν τις δεκαετίες 1970 - 1980, ενώ μεγάλη ανάπτυξη σημειώθηκε σε Ελβετία και Σουηδία τις δεκαετίες 1980 - 1990 και κατακόρυφη αύξηση στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη μετά το 2000 (Μποζής, 2013).

Στην Ελλάδα, τα συστήματα γ.α.θ. δεν είναι τόσο διαδεδομένα σε σύγκριση με τις χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης (Andritsos et al., 2013, οπ. αναφ. στον Καρύτσα, 2015). Η χρήση τους άρχισε στα μέσα της περασμένης δεκαετίας και κορυφώθηκε περίπου στα τέλη της, όταν η οικονομική κρίση και ο ανταγωνισμός με το φυσικό αέριο και τις αερόψυκτες αντλίες θερμότητας (κλιματιστικά) οδήγησε στη μείωση της (Andritsos et al., 2013, οπ. αναφ. στον Καρύτσα, 2015). Αν και δεν είναι γνωστός ο ακριβής αριθμός συστημάτων γ.α.θ., ωστόσο έχουν καταγραφεί 800 εφαρμογές ισχύος 63 MW (Andritsos et al., 2013, οπ. αναφ. στον Καρύτσα, 2015). Η πιο γνωστή και τεκμηριωμένη εφαρμογή γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, οι οποίες είναι συζευγμένες με κατακόρυφη γεωτρήση, είναι αυτή του Δημαρχείου Πυλαίας (Μιχόπουλος 2011; Μιχόπουλος κ.α., 2011; Μποζής 2013).



Σχήμα 2.41: Αντλίες θερμότητας Δημαρχείου Πυλαίας νομού Θεσσαλονίκης (Μποζής, 2013)

Ψυκτικό μέσο

Η επιλογή του ψυκτικού μέσου που ανακυκλοφορεί στο κύκλωμα της γ.α.θ. γίνεται με βάση το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας της συσκευής, ενώ θα πρέπει να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό, εύφλεκτο, να είναι σταθερό στις θερμοκρασίες εφαρμογής, να έχει χαμηλό κόστος (Οικονόμου, 2012), να μην προκαλεί μείωση του όζοντος και να έχει ελάχιστη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Brandl, 2006). Η χρήση χλωροφθορανθράκων, οι οποίοι πληρούσαν ιδανικά αυτά τα

κριτήρια, έχει απαγορευτεί για περιβαλλοντικούς λόγους από το πρωτόκολλο του Μοντρεάλ και σήμερα χρησιμοποιούνται τα R17a, R134a, R407c, R410 κ.α. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004, όπ. αναφ. στην Οικονόμου, 2012).

Πλεονεκτήματα

Το πιο βασικό πλεονέκτημα των γ.α.θ. σε σχέση με τις αερόψυκτες αντλίες θερμότητας για θέρμανση - δροσισμό (κλιματιστικά) είναι η σταθερή θερμοκρασία του εδάφους όλο το χρόνο, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες (Καρύτσας & Μενδρινός, 2005). Έτσι, σε αντίθεση με τα κλιματιστικά των οποίων η απόδοση μειώνεται σημαντικά σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 5 °C, οι γ.α.θ. δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω χαμηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος (Οικονόμου, 2012). Λόγω του γεγονότος αυτού και της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του εδάφους και των εσωτερικών χώρων, η χρήση των γ.α.θ. για θέρμανση - δροσισμό έχει κόστος λειτουργίας 30% μικρότερο σε σύγκριση με τα αερόψυκτα συστήματα, κόστος συντήρησης 1/3 εκείνου των συμβατικών συστημάτων, καθώς και σημαντικά αυξημένη διάρκεια ζωής, η οποία εκτιμάται σε 25 - 30 χρόνια (Καρύτσας & Μενδρινός, 2005).

Οι γ.α.θ. καταναλώνουν μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, 1/3 - 1/5 της θερμικής ενέργειας που παρέχουν και 30 % - 50 % λιγότερη από συστήματα αερόψυκτων αντλιών θερμότητας (Καρύτσας & Μενδρινός, 2005). Επιπλέον οι γ.α.θ. έχουν υψηλές αποδόσεις σε σχέση με άλλα συστήματα θέρμανσης (Self et al., 2013).

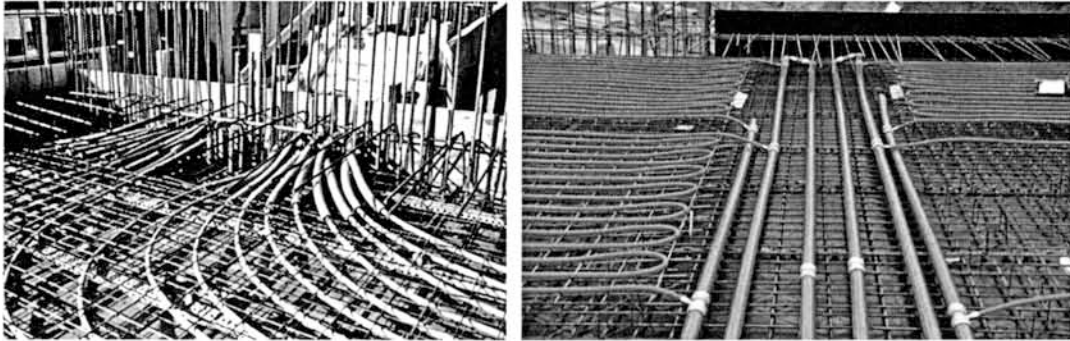
Η Αποστολίδου (2010) αναφέρει επίσης τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Το 70 - 80 % της ενέργειας λαμβάνεται δωρεάν από το περιβάλλον.
- Δεν υπάρχουν εκπομπές CO₂ από τη λειτουργία τους.
- Εξοικονομείται χώρος γιατί δεν απαιτείται δεξαμενή καυσίμων ή καμινάδα.
- Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη.
- Δεν απαιτείται πυροπροστασία.
- Συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας, όπως με ηλιακούς συλλέκτες.

2.2.3. Δευτερεύον δίκτυο

Συνδεδεμένο στο πρωτεύον δίκτυο είναι το δευτερεύον δίκτυο σωλήνων και συσκευών στο εσωτερικό του κτιρίου ή στο σώμα καταστροφμάτων γεφυρών, οδικών κατασκευών, πλατφορμών κτλ. (Brandl, 2006). Η λειτουργία του δευτερεύοντος

δικτύου είναι να αξιοποιεί την εξαγόμενη από το έδαφος θερμότητα για θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα και να λαμβάνει την περιττή από το εσωτερικό του κτιρίου θερμότητα το καλοκαίρι για την απόρριψή της στο έδαφος (de Moel et al., 2010).



Σχήμα 2.42: Δευτερεύοντα δίκτυα σωλήνων σε κλωβούς σπλισμού πλακών ορόφων (Brandl, 2006, 2008)

Οι αντλίες θερμότητας συνδυάζονται με συστήματα εκπομπής και απορρόφησης θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών και δε μπορούν να συζευχθούν με τα κοινά σώματα των καλοριφέρ, καθώς αυτά λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες νερού (Αποστολίδου, 2010).

Σύμφωνα με το Μιχόπουλο (2011), τα τερματικά αυτά συστήματα εκπομπής και απορρόφησης θερμότητας κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το φορέα μετάδοσης θερμότητας ως εξής:

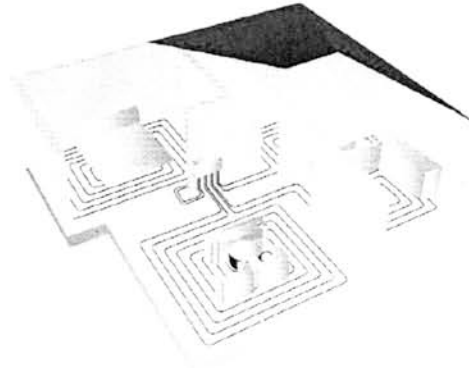
1. Συστήματα νερού, με φορέα θερμότητας το νερό, τα οποία εγκαθίστανται σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας νερού.
2. Συστήματα ψυκτικού ρευστού, με φορέα θερμότητας ψυκτικό ρευστό, σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας ψυκτικού μέσου.
3. Συστήματα αέρα, με φορέα θερμότητας τον αέρα, σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας αέρα.

Υπάρχουν επίσης και υβριδικά συστήματα, που συνδυάζουν τους παραπάνω τύπους διανομής, ώστε να παρέχουν ευελιξία του συστήματος και ενισχυμένο έλεγχο της θερμοκρασίας του χώρου (Self et al., 2013).

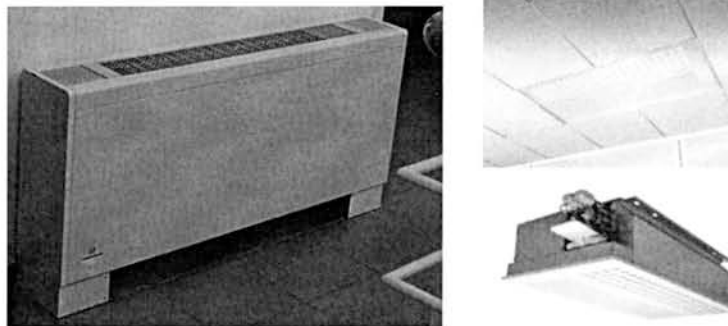
Τα τερματικά συστήματα νερού διακρίνονται σε (Μιχοπουλος, 2011):

1. Θερμαντικά σώματα διαστασιολογημένα για θερμό νερό χαμηλής θερμοκρασίας.

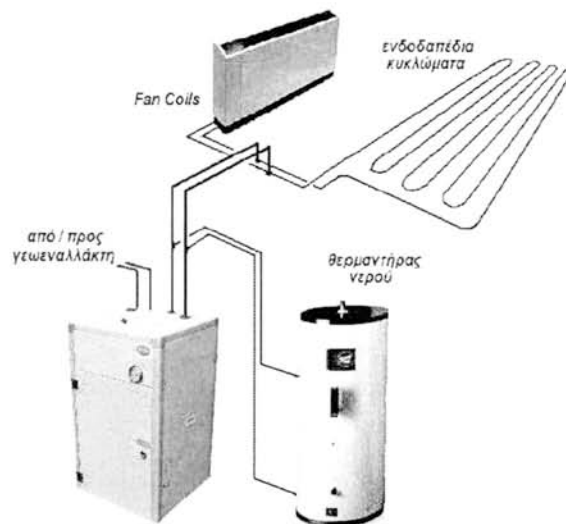
2. Συστήματα ανεμιστήρα-στοιχείου (fan-coil).
3. Συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης-δροσισμού.
4. Συστήματα ενδοτοιχίας θέρμανσης-δροσισμού.
5. Συστήματα κεντρικών κλιματιστικών μονάδων (ΚΚΜ).



Σχήμα 2.43: Ενδοδαπέδιο σύστημα (Μιχοπουλος, 2011)



Σχήμα 2.44: Αερόθερμο (fan-coil) δαπέδου στα γραφεία του ΚΑΠΕ (Μενδρινός & Καρύτσας, 2005) και οροφής (Μενδρινός & Καρύτσας, 2015)



Σχήμα 2.45: Αντλία θερμότητας με πρωτεύον κύκλωμα γεωεναλλάκτη και δευτερεύον fan coils, ενδοδαπέδια κυκλώματα και θερμαντήρα νερού (Μποζής, 2013)

Τα ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης - δροσισμού, δηλαδή κλειστά κυκλώματα σωλήνων εγκιβωτισμένα στο δάπεδο, είναι κατά την Αποστολίδου (2010) και τα πιο ενδεδειγμένα για τους παρακάτω λόγους :

α) Εξασφαλίζουν τις βέλτιστες συνθήκες θερμικής άνεσης, καθώς η θέρμανση του χώρου πραγματοποιείται με ακτινοβολία από το δάπεδο και διαχέεται ομοιόμορφα προς τα πάνω προσφέροντας μία αίσθηση θερμικής θαλπωρής.

Αντίστοιχα στο δροσισμό, το δάπεδο μετατρέπεται σε μια τεράστια ψυχρή επιφάνεια, απορροφώντας ομοιόμορφα θερμότητα από όλες τις κατευθύνσεις.

β) Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, απαλλάσσουν τον αέρα από ξηρότητα και τη δημιουργία ρευμάτων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν και φαινόμενα όπως μαυρίσματα στους τοίχους ή μεταφορά σωματιδίων και μικροβίων, διαμορφώνοντας έτσι ένα υγιεινό περιβάλλον.

γ) Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος λόγω χαμηλής κατανάλωση καυσίμου.

δ) Το μειωμένο κόστος κτιριακής συντήρησης, το μηδενικό κόστος συντήρησης και αντικατάστασης θερμαντικών σωμάτων, η αύξηση του χρόνου ζωής του καυστήρα ο οποίος λειτουργεί λιγότερες ώρες και η χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, συμβάλλουν στην απόσβεση του κόστους εγκατάστασης του ενδοδαπέδιου συστήματος.

ε) Η αντικατάσταση της επιφάνειας των θερμαντικών σωμάτων με την επιφάνεια όλου του δαπέδου, έχει ως συνέπεια την μεγάλη αύξηση της θερμαντικής ισχύς, καθιστώντας το σύστημα πιο αποδοτικό.

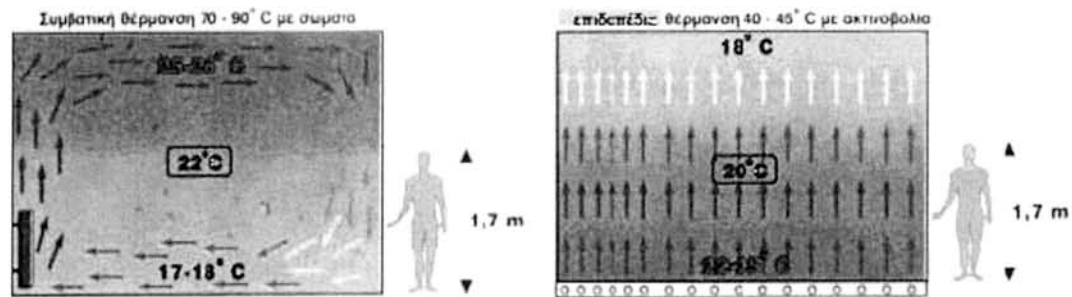
ς) Απαλλάσσοντας το εσωτερικό των κτιρίων από τα θερμαντικά σώματα, επιτρέπουν την αξιοποίηση όλων των χώρων με λειτουργικό τρόπο, ενώ προσφέρουν συγχρόνως ένα καλαίσθητο αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα.

η) Επιτρέπουν τη χρήση του δικτύου σωληνώσεων για δροσισμό.

θ) Επιτρέπουν την εκμετάλλευση άλλων ήπιων συστημάτων όπως οι ηλιακοί συλλέκτες.

ι) Λόγω της ομοιόμορφης κατανομής θερμότητας από το δάπεδο προς την οροφή, επιτρέπουν την θέρμανση χώρων με μεγάλο ύψος οροφής.

Κεφάλαιο 2^ο : Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας



Σχήμα 2.46: Συμβατική θέρμανση με σώματα και ενδοδαπέδια με ακτινοβολία (Αποστολίδου, 2010)

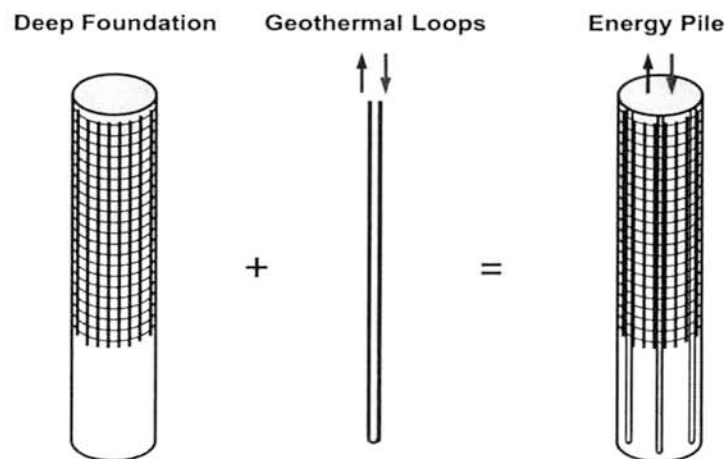
	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΑΝΟΙΚΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ		ΚΛΕΙΣΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	
			ΘΕΡΜΑΝΣΗ	ΨΥΞΗ	ΘΕΡΜΑΝΣΗ	ΨΥΞΗ
FAN COIL UNITS	Ισχύς αντλίας	KW	13,5	12,0	12,4	12,0
	COP		4,5	6,1	4,2	6,1
	Ηλεκτρική κατανάλωση	KW	3,0	2,0	3,0	2,0
	Θερμοκρασίες ανακυκλοφορίας	°C	50-45	7-12	50-45	7-12
ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ - ΔΡΟΣΙΣΜΟΣ	θερμική Ισχύς αντλίας	KW	13,9	14,0	13,0	14,0
	COP		5,8	7,2	5,3	7,2
	Ηλεκτρική κατανάλωση	KW	2,4	2,0	2,4	2,0
	Θερμοκρασίες ανακυκλοφορίας	°C	37-32	22-17	37-32	22-17
ΣΩΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ	Ισχύς αντλίας	KW	13,2		12,2	
	COP		3,9		3,7	
	Ηλεκτρική κατανάλωση	KW	3,3	ΜΗ ΕΦΙΚΤΟ	3,3	ΜΗ ΕΦΙΚΤΟ
	Θερμοκρασίες ανακυκλοφορίας	°C	55-50		55-50	

Σχήμα 2.47: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλιών θερμότητας σε σχέση με συστήματα διανομής στο εσωτερικό του κτιρίου (Αποστολίδου, 2010)

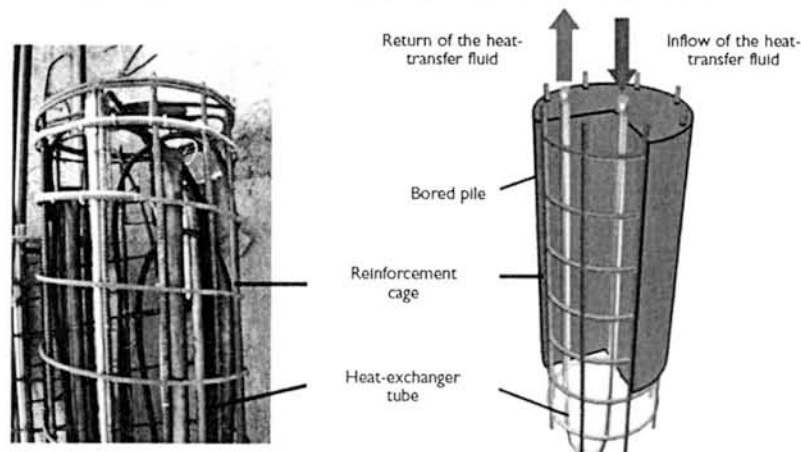
Κεφάλαιο 3^ο : Ενεργειακοί πάσσαλοι

3.1. Ορισμός, τύποι και χρήσεις

Οι ενεργειακοί πάσσαλοι (ε.π.) είναι πάσσαλοι θεμελίωσης στους οποίους έχει ενσωματωθεί κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων (γεωεναλλάκτης), μέσω των οποίων γίνεται ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος, για τη θέρμανση και το δροσισμό της ανωδομής. Το χειμώνα το ρευστό - φορέας θερμότητας (heat carrier fluid) που κυκλοφορεί στους σωλήνες, απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον έδαφος για τη θέρμανση της ανωδομής, ενώ το καλοκαίρι απορρίπτει την περιττή από το εσωτερικό της ανωδομής θερμότητα στο έδαφος για το δροσισμό της. Το ρευστό αυτό είναι είτε νερό, είτε νερό με αντιψυκτικό (κυρίως γλυκόλη), ή αλατούχο διάλυμα (Brandl, 2006). Για τη θέρμανση απαιτείται η σύζευξη των ε.π. με γ.α.θ., ενώ στην περίπτωση του δροσισμού μπορεί και να παραληφθεί (free cooling) (Brandl, 2006).



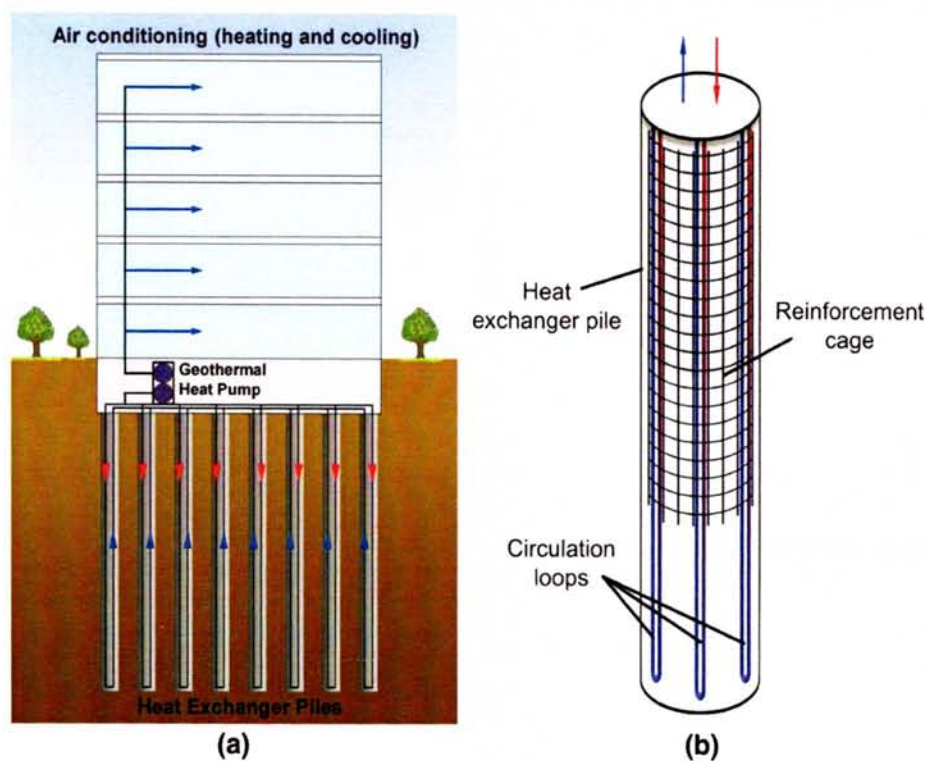
Σχήμα 3.1: Διάταξη ενεργειακού πασσάλου (Olgun & McCartney, 2014)



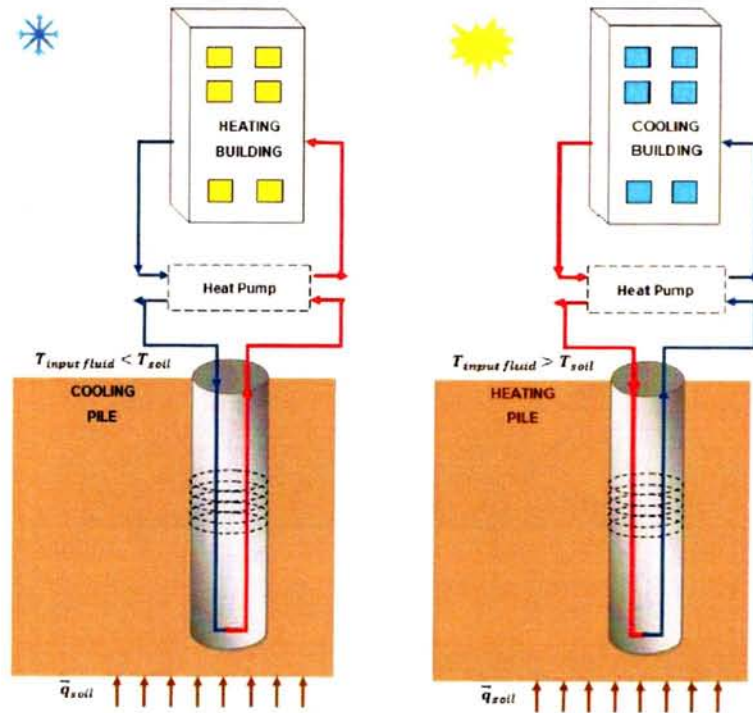
Σχήμα 3.2: Διάταξη ενεργειακού πασσάλου (Laloui & DiDonna, 2011)



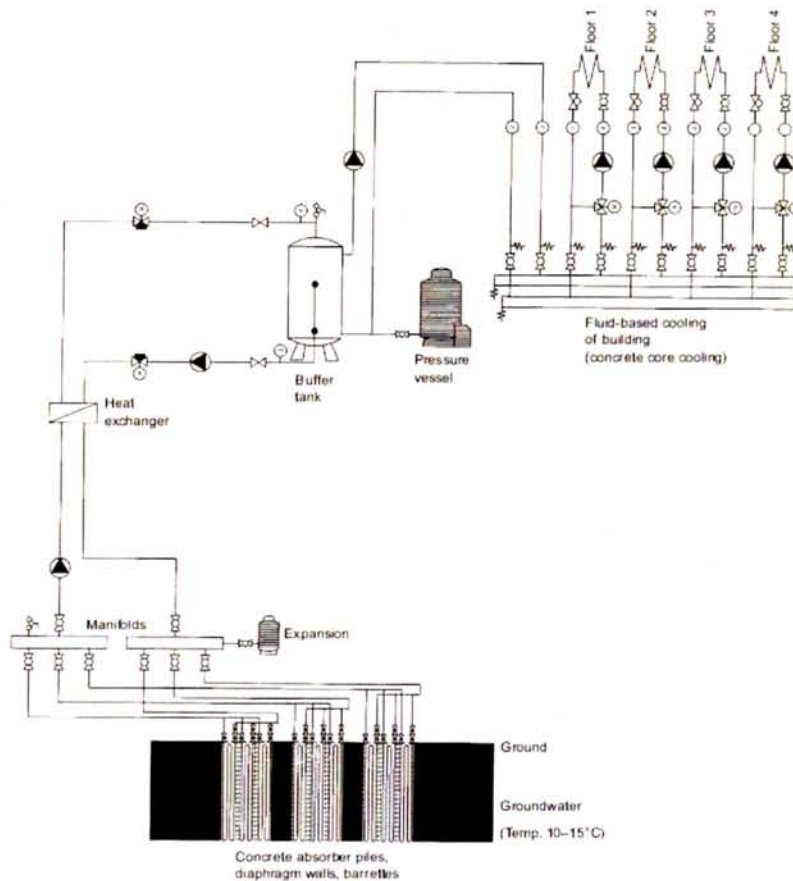
Σχήμα 3.3: Φωτογραφία βρόχων σωλήνων συνδεδεμένων στον κλωβού οπλισμού ενεργειακού πασσάλου (Brandl, 2008)



Σχήμα 3.4: (a) κλιματισμός κτιρίου με τη χρήση ενεργειακών πασσάλων (b) διάταξη ενεργειακού πασσάλου (Olgun et al., 2014b)



Σχήμα 3.5: Χειμερινή και θερινή λειτουργία των ενεργειακών πασσάλων (Laloui & DiDonna, 2011)



Σχήμα 3.6: Λειτουργία δροσίσιμου με τη χρήση ενεργειακών πασσάλων, χωρίς τη μεσολάβηση αντλίας θερμότητας (free cooling) (Brandl, 2006)

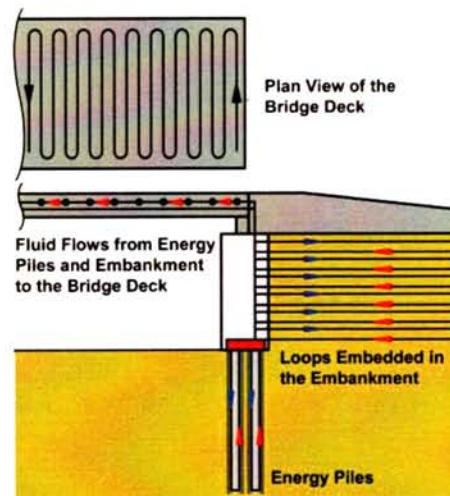
Η συνηθέστερη ορολογία που χρησιμοποιείται για την τεχνολογία αυτή στη διεθνή βιβλιογραφία είναι “energy piles”, η ακριβής ελληνική μετάφραση της οποίας είναι «ενεργειακοί πάσσαλοι», η οποία χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία. Συναντάται όμως και με πολλούς άλλους όρους στη βιβλιογραφία όπως geothermal piles (Kramer, 2013; Mimouni & Laloui, 2013), geothermal energy piles (de Moel et al., 2010; Wang et al., 2013), thermal piles (GSHPA, 2012), absorber piles (Brandl, 2006), pile heat exchangers (Loveridge et al., 2012), heat exchanger piles (Dupray et al., 2014; Kalantidou et al., 2012; Laloui, 2006; Olgun et al., 2014b; Peron et al., 2011; Yavari et al., 2014), energy foundations (Brandl, 2006; Bodas Freitas et al. 2013; Laloui & DiDonna, 2011; McCartney & Murphy, 2012; Wang et al., 2015), geothermal foundations (McCartney et al., 2010), thermo-active foundations (McCartney et al., 2010).

Τύποι

Βρόχοι σωλήνων για την κατασκευή ε.π. έχουν ενσωματωθεί σε χαλύβδινους πασσάλους (steel piles) και πασσάλους από κονιάματα (grout), εκτός από πασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος (Brandl, 1998; Gao, 2008; Morino & Oka, 1994; Nagano, 2007, as cited in de Moel et al., 2010). Οι πάσσαλοι οπλισμένου σκυροδέματος πλεονεκτούν λόγω των ευνοϊκών θερμικών ιδιοτήτων υψηλής θερμοχωρητικότητας και θερμικής αγωγιμότητας του υλικού (Brandl, 1998; Gao, 2008, as cited in de Moel et al., 2010) και αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των εγκατεστημένων ε.π. παγκοσμίως (Brandl, 2006, as cited in de Moel et al., 2010). Επίσης, οι επι τόπου έγχυτοι πάσσαλοι (cast in situ piles) πλεονεκτούν σε σχέση με τους προκατασκευασμένους ή εμπηγνυόμενους (precast or driven piles), καθώς ενέχουν χαμηλότερο κίνδυνο ζημιάς για τον ενσωματωμένο γεωεναλλάκτη (de Moel et al., 2010). Όπως παρατηρεί ο Brandl (2006), μέχρι το 2000 οι προκατασκευασμένοι ενεργειακοί εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα αντιπροσώπευαν την πλειονότητα των ε.π., ενώ από το 2000 και μετά το ποσοστό των μεγάλης διαμέτρου έγχυτων πασσάλων (bored piles) αυξήθηκε σταθερά. Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα στάδια της έρευνας πάνω στους ε.π., ειδικά στην Ιαπωνία, αλλά το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει πλέον στραφεί κυρίως στους πασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος (de Moel et al., 2010; Μποζής, 2011).

Χρήσεις

Οι ενεργειακοί πάσσαλοι εκτός από τη θέρμανση - δροσισμό των κτιρίων και την παραγωγή ζεστού νερού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για τη θέρμανση και το δροσισμό καταστρωμάτων γεφυρών (Brandl, 2006; Dupray et al., 2014; Olgun & McCartney, 2014), οδοστρωμάτων (road pavements), διαδρόμων αεροδρομίων, χώρων στάθμευσης, πλατφορμών, σηράγγων και σιδηροδρομικών σταθμών (Brandl, 2006). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά και για την παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά αυτή η χρήση δεν είναι αποδοτική (Brandl, 2006). Μη αποδοτική και ακριβή είναι και η θέρμανση χλοοτάπητα σε χώρες με μακρείς και ψυχρούς χειμώνες (Brandl, 2006).



Σχήμα 3.7: Χρήση ενεργειακών πασσάλων σε γέφυρα (Olgun & McCartney, 2014)



Σχήμα 3.8: Σωλήνες εκπομπής - απορρόφησης θερμότητας σε οδόστρωμα (Olgun, 2013)

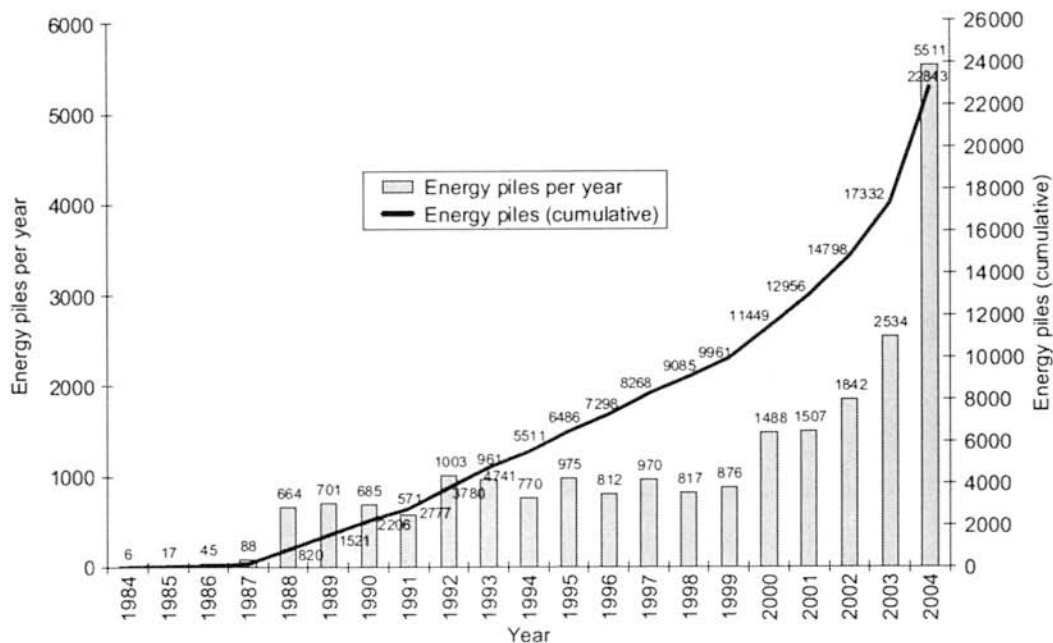
3.2. Ιστορικό

Ο Mīmouni (2014) παρατηρεί ότι οι ενεργειακοί πάσσαλοι είναι η πιο συχνά χρησιμοποιημένη ενεργειακή γεωκατασκευή παγκοσμίως.

Η πρώτη εφαρμογή ενεργειακών πασσάλων οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευάστηκε το 1984 στην Αυστρία από την εταιρεία Enercret, θυγατρική της Αυστριακής εργοληπτικής κατασκευαστικής εταιρείας Nagelebau, η οποία παρήγαγε προκατασκευασμένους πασσάλους έμπηξης από οπλισμένο σκυρόδεμα (Boranyak, 2012). Ωστόσο ερευνητές αναφέρουν ότι η ιδέα για την αξιοποίηση των πασσάλων θεμελίωσης για τη θέρμανση και το δροσισμό των κτιρίων διατυπώθηκε ήδη από το 1962 στην Ιαπωνία (Nagano et al., 2005, οπ. αναφ. στο Μποζή, 2011), όπου δόθηκε βαρύτητα στην έρευνα και κατασκευή χαλύβδινων ε.π., με την πρώτη εφαρμογή να κατασκευάζεται το 1994 (Morino & Oka, 1994, οπ. αναφ. στο Μποζή, 2011).

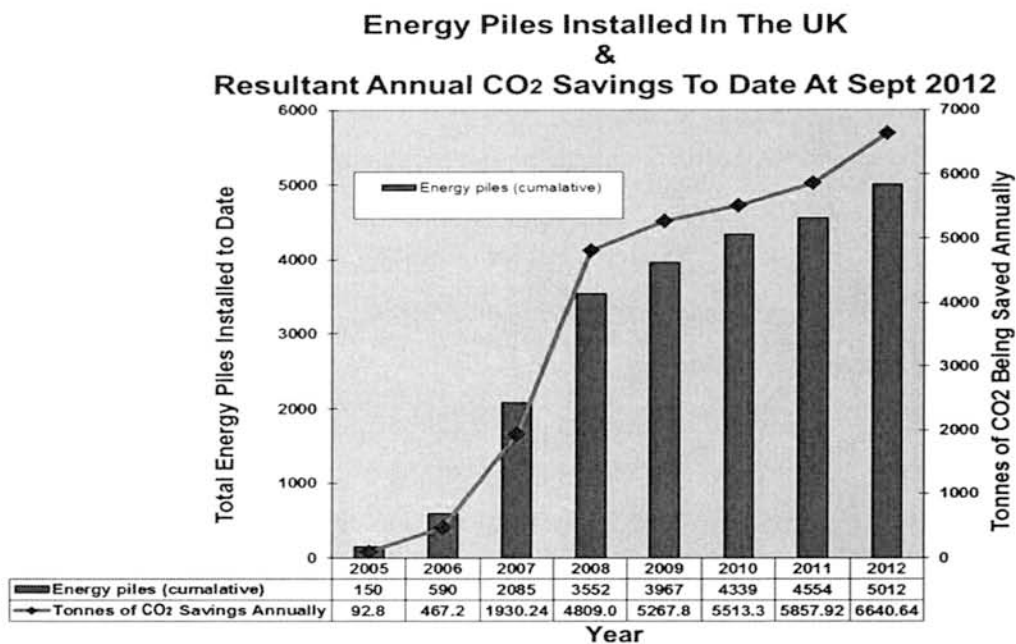
Οι πρωτοπόρες χώρες στην κατασκευή και την έρευνα ε.π. οπλισμένου σκυροδέματος ήταν η Αυστρία, η Ελβετία και η Γερμανία, ενώ στην πορεία η υιοθέτηση της τεχνολογίας εξαπλώθηκε στις περισσότερες χώρες της δυτικής, κεντρικής και βόρειας Ευρώπης (Βέλγιο, Γαλλία, Ισπανία, Ιταλία, Λιχτενστάϊν, Ολλανδία, Σλοβακία, Φινλανδία), στις Η.Π.Α., τον Καναδά, την Αυστραλία, την Ιαπωνία, την Κίνα, τη Νότια Κορέα, το Ντουμπάϊ (Boranyak, 2012, 2013; Brandl, 2006; de Moel et al., 2010; Di Donna & Laloui, 2011; Μποζής, 2011). Στην Αυστρία, την Ελβετία, τη Γερμανία και στη συνέχεια το Ηνωμένο Βασίλειο έχει εγκατασταθεί μεγάλος αριθμός ε.π., όπου μεγάλες εταιρίες κατασκευών θεμελιώσεων τους έχουν εντάξει στις δραστηριότητές τους, ενώ σημαντική άνοδος στους ρυθμούς εγκατάστασης ε.π. παρατηρείται μετά το 2000 (Μποζής, 2011).

Οι περισσότερες εφαρμογές ε.π. έχουν κατασκευαστεί στην Αυστρία (Di Donna & Laloui, 2011). Συγκεκριμένα μέχρι το 2004 είχαν κατασκευαστεί περισσότεροι από 23000 συνολικά ε.π., με ρυθμούς που το 2004 έφθασαν τους 5500 και πλέον ανά έτος (Μποζής, 2011). Από το 2005 και μετά, περισσότεροι από 7000 ε.π. ανά έτος εγκαταστάθηκαν, φτάνοντας το 2013 συνολικά τους 100.000, συμπεριλαμβάνοντας από μικρής διαμέτρου πασσάλους έμπηξης έως μεγάλης διαμέτρου έγχυτους (Brandl, 2013).



Σχήμα 3.9: Αριθμός εγκατεστημένων ενεργειακών πασσάλων στην Αυστρία, ανά έτος και αθροιστικά, για την 20ετία 1984-2004 (Brandl, 2006)

Στο Η.Β., όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, κατασκευάστηκαν περισσότεροι από 5000 ε.π., μια δεκαετία μετά την πρώτη εφαρμογή στο Keble College, Oxford (Brandl, 2006).



Σχήμα 3.10: Αριθμός εγκατεστημένων ενεργειακών πασσάλων στο Ηνωμένο Βασίλειο, αθροιστικά και αντίστοιχες ετήσιες εξοικονομήσεις τόνων CO₂, για την δετία 2005-2012 (Amis & Loveridge, 2014)

Στην Ελβετία, από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 έως το 2013 κατασκευάστηκαν περίπου 50 εφαρμογές θεμελιωμένες σε ε.π., όπως κατοικίες, βιομηχανικά κτίρια, σχολεία και αεροδρόμια (Boranyak, 2013; Di Donna & Laloui, 2011), ενώ το 2004 η συνολική θερμική ισχύ τους ήταν 7 MW και απέδιδαν συνολικά 15,2 GWh θερμικής ενέργειας ανά έτος (Rybach & Gorhan, 2005, όπ. αναφ. στο Μποζή, 2011).

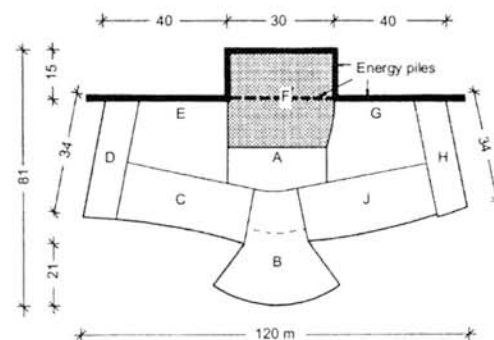
Η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή με ε.π. στη Βόρεια Αμερική ολοκληρώθηκε το 1998, ενώ λιγότερες από 10 εφαρμογές καταγράφηκαν έως το 2012 (Boranyak, 2012).

Έως το 2013, στην Ιαπωνία είχαν κατασκευαστεί περίπου 50 εφαρμογές με ε.π., ενώ στην Κίνα η αυστριακή εταιρεία Enercret είχε κατασκευάσει 10 εφαρμογές, οι περισσότερες από τις οποίες είναι μεγαλύτερες από κάθε εφαρμογή στην Ευρώπη (Boranyak, 2013).

3.3. Παραδείγματα εφαρμογών ενεργειακών πασσάλων

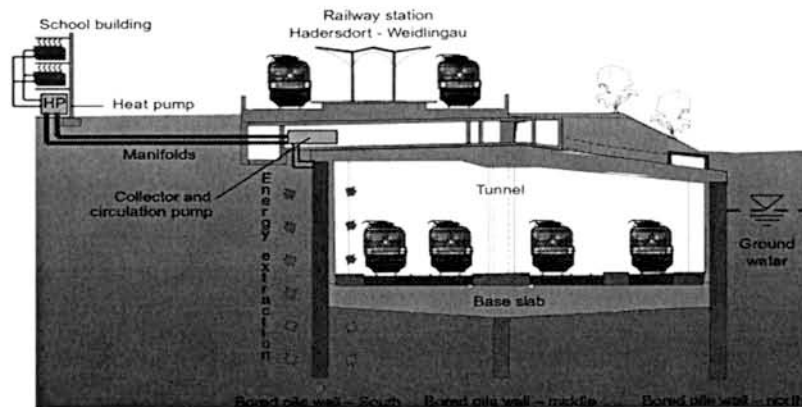
Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά γνωστά παραδείγματα κτιρίων θεμελιωμένων σε ενεργειακούς πασσάλους, για το οποία δίνονται στοιχεία στη σχετική βιβλιογραφία.

Η κατασκευή του κτιρίου κέντρου αποκατάστασης στο Bad Schallerbach της Αυστρίας ολοκληρώθηκε το 1997 και από τους 175 πασσάλους αντιστήριξης και θεμελίωσης του κτιρίου, διαμέτρου 120 cm και συνολικού μήκους 2040m, οι 143 διαθέτουν βρόχους σωλήνων για τη θέρμανση και το δροσισμό του κτιρίου (Brandl, 2006; Μποζής, 2011).



Σχήμα 3.11: Φωτογραφία (Μποζής, 2011) και κάτοψη (Brandl, 2006) Rehabilitation Centre, Bad Schallerbach, Austria

Ο τομέας LT24 του Lainzer Tunnel του σιδηροδρομικού σταθμού Hadersdorf-Weidlingau στη Vienna διαθέτει 59 έγχυτους ε.π. διαμέτρου 1,2 m και μέσου μήκους 17,1 m (Brandl, 2006).



Σχήμα 3.12: Τομή LT24, Lainzer Tunnel, Hadersdorf-Weidlingau railway station, Vienna, Austria (Brandl, 2006)

Ο (Brandl, 2006) εκθέτει επίσης δεδομένα από διάφορα κτίρια γραφείων στη Vienna, Austria, θεμελιωμένα σε ε.π..

Το κτίριο της πτέρυγας E του Αεροσταθμού Dock Midfield, Zurich, Switzerland διαθέτει 306 ε.π. από τους 350 έγχυτους πασσάλους της θεμελίωσης του, με διαμέτρους 90 - 150 cm και μέσο βάθος 26,8 m (Μποζής, 2011). Από τη λειτουργία του συστήματος γ.α.θ. καλύπτεται το 85% των ετησίων απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση, ενώ ο δροσισμός του κτιρίου από τους ε.π. γίνεται μόνον απευθείας (direct cooling), χωρίς τη μεσολάβηση της αντλίας θερμότητας (Μποζής, 2011). Οι Di Donna & Laloui (2011) εκτιμάνε ότι είναι η πιο γνωστή εφαρμογή ε.π., ενώ ο Μποζής (2011) σημειώνει ότι είναι η πληρέστερη από άποψη τεκμηρίωσης στη σχετική βιβλιογραφία.



Σχήμα 3.13: Φωτογραφία του Dock Midfield terminal, Zurich airport, Switzerland (Laloui et al., 2006)

Ο Μποζής (2011) εκτός από τα Rehabilitation Centre, Dock Midfield terminal και Main Tower, παραθέτει δεδομένα και για το κτίριο γραφείων Energieforum στο Berlin, το οποίο είναι θεμελιωμένο σε 198 ε.π. για τη θέρμανση και το δροσισμό του. Άλλα κτίρια στη Γερμανία θεμελιωμένα σε ε.π., τα οποία αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία, είναι τα International Solar Center, Berlin (deMoel et al., 2010), Norddeutsche Landesbank, Hannover, School Centre, Berlin, Galileo Towers, Frankfurt, Centre of Research and Development, Zahnradfabrik Friedrichshafen (Riederer et al., 2007, as cited in Laloui & DiDonna, 2011).

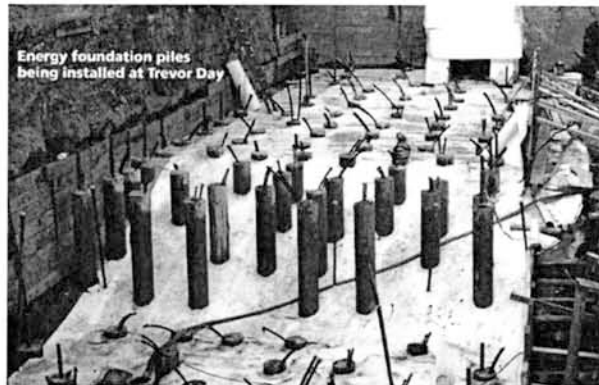
Στο Ηνωμένο Βασίλειο, το πρώτο έργο ε.π. είναι το κτίριο του Keble College, Oxford, το οποίο ξεκίνησε το 2001, χρησιμοποιώντας αυστριακή τεχνολογία για την κατασκευή των ε.π. (Brandl, 2006). Οι απαιτήσεις σε θέρμανση και δροσισμό του κτιρίου καλύπτονται πλήρως από το σύστημα των ε.π. (Brandl, 2006). Μια γνωστή εφαρμογή, η οργανομέτρηση ενός πασσάλου της οποίας αποτέλεσε τη βάση για πολλές ερευνητικές δημοσιεύσεις, είναι το θεμελιωμένο σε 143 ε.π. κτίριο του Lambeth College, London, UK (Bourne-Webb et al., 2009). Άλλα κτίρια στο Η.Β., τα οποία αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία, είναι τα Paddington building 3, London, Westminster Academy, London, (Laloui & DiDonna, 2011), Bulgari Hotel, London (Amis & Loveridge, 2014) και One New Change building, London (Amis & Loveridge, 2014; Boranyak, 2013; Laloui & DiDonna, 2011).



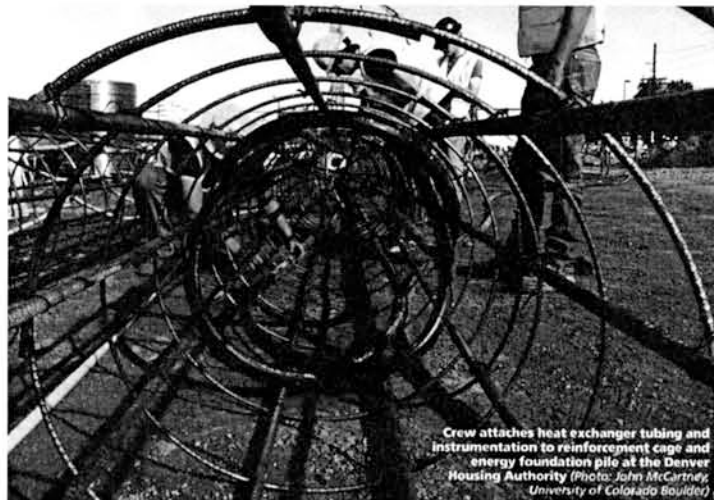
Σχήμα 3.16: One New Change building, London, UK (Laloui & DiDonna, 2011)

Η Boranyak (2012, 2013) δίνει στοιχεία για αρκετά κτίρια με ε.π. σε Η.Π.Α. και Καναδά, όπως τα Lake-Front Hotel, Geneva, New York, Trevor Day School, New

York, Art Stable, Washington, Seattle, U.S. Air Force Academy, Colorado Springs, Denver Housing Authority, Denver, Colorado, Canada Marine Discovery Center. Αναφέρει επίσης για την Ιαπωνία το κτίριο του αεροσταθμού του διεθνούς αεροδρομίου του Tokyo και το κτίριο Tokyo Sky Tree, ενώ για την Κίνα το Wuxi Goulian Financial Tower και κτίρια νοσοκομείων στις περιοχές Yanzhou και Wuhan.



Σχήμα 3.17: Ενεργειακοί πάσσαλοι στο Trevor Day School, New York, US (Boranyak, 2012)



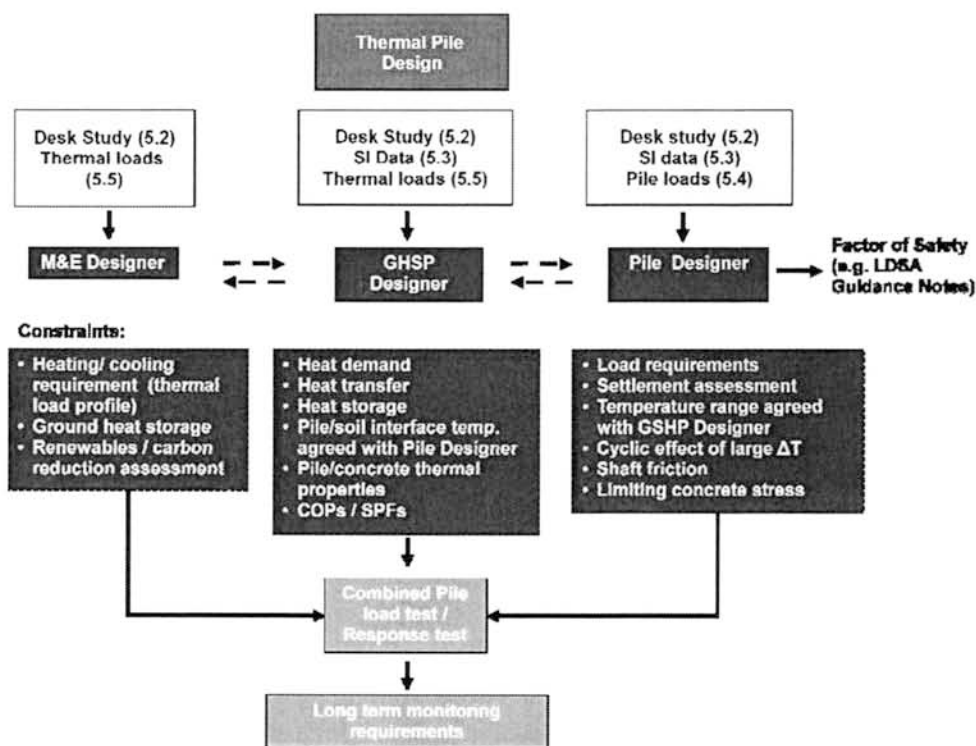
Σχήμα 3.18: Οπλισμός και βρόχοι σωλήνων ενεργειακού πασσάλου κατά την κατασκευή της θεμελίωσης στο Denver Housing Authority, Denver, Colorado, US (Boranyak, 2012)

3.4. Κατασκευαστικά ζητήματα

Οργάνωση και συντονισμός

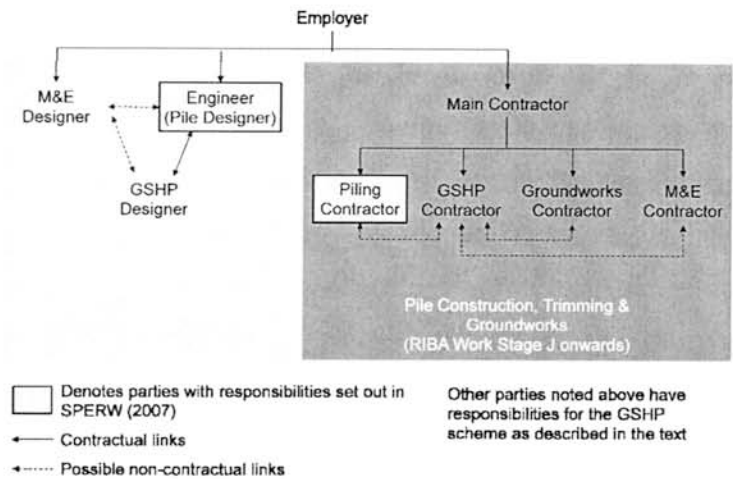
Εκτός από την επιφερόμενη πολυπλοκότητα στα τεχνικά ζητήματα, πολυπλοκότερος σε σχέση με την κατασκευή των απλών πασσάλων γίνεται και ο προγραμματισμός των εργασιών, καθώς απαιτείται συντονισμός και συνεργασία πολλών διαφορετικών

συνεργείων και ακόμα και διαφορετικών εργολάβων μεταξύ τους (Μποζής, 2011). Ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας απαιτεί ένα διεπιστημονικό σχεδιασμό, όπου ο γεωτεχνικός μηχανικός, ο μηχανολόγος μηχανικός, ο αρχιτέκτονας, ο σχεδιαστής του κτιριακού εξοπλισμού και ο εξειδικευμένος υδραυλικός πρέπει να συνεργάζονται όσο το δυνατόν νωρίτερα, ώστε να λύσουν πριν από την έναρξη της κατασκευής όλα τα τεχνικά προβλήματα σχετικά με την κατασκευή των πασσάλων και τη διάταξη των δικτύων και να δημιουργήσουν το πιο οικονομικό ενεργειακό σύστημα (Brandl, 2006; Μποζής, 2011). Ο υπεύθυνος για την κατασκευή θα πρέπει να διασαφηνίσει το ρόλο του καθενός ξεχωριστά στο εργοτάξιο και έχει αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλη η ανάθεση στον έμπειρο σε εφαρμογές αβαθούς γεωθερμίας υδραυλικό όλων των λεπτομερειών των πρωτογενών και δευτερογενών κυκλωμάτων, ξεκινώντας με την εγκατάσταση των σωλήνων στους πασσάλους (Brandl, 2006). Οι εργασίες κατασκευής των δικτύων και της θεμελίωσης θα πρέπει να εξελίσσονται παράλληλα (Μποζής, 2011).

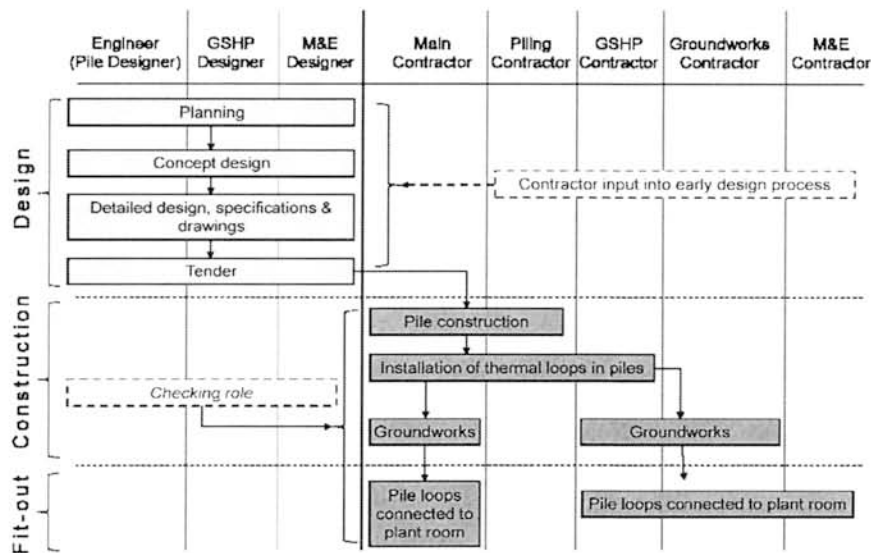


Σχήμα 3.19: Διάγραμμα εργασιών σχεδιασμού ενεργειακών πασσάλων (GSHPA, 2012)

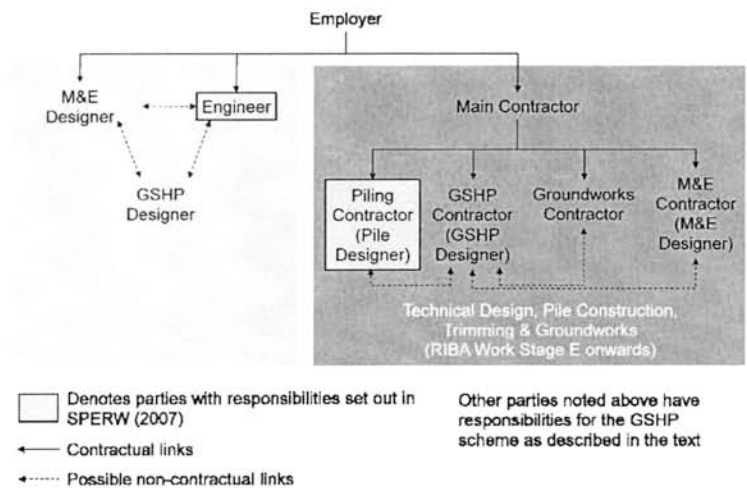
Κεφάλαιο 3^ο : Ενεργειακοί πάσσαλοι



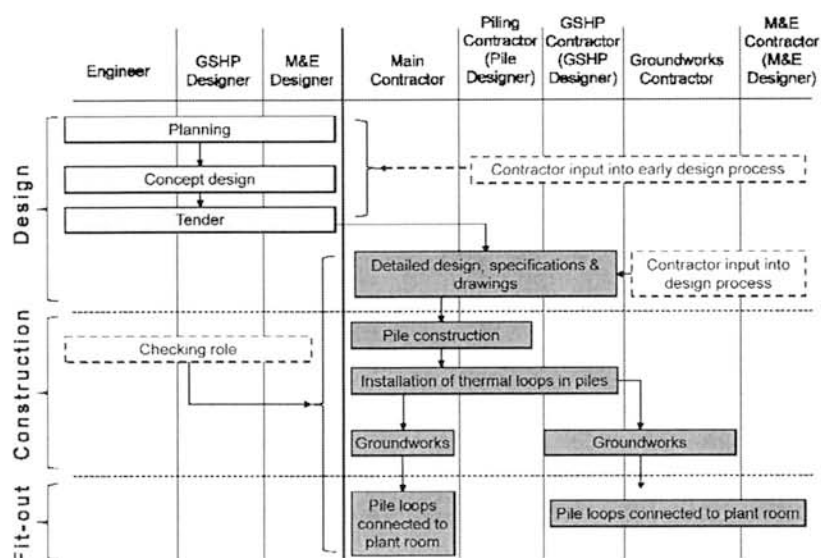
Σχήμα 3.20: Συντονισμός αρμοδιοτήτων για σχεδιασμό βάσει μηχανικού (GSHPA, 2012)



Σχήμα 3.21: Διάγραμμα αρμοδιοτήτων για σχεδιασμό βάσει μηχανικού (GSHPA, 2012)



Σχήμα 3.22: Συντονισμός αρμοδιοτήτων για σχεδιασμό βάσει εργολάβου (GSHPA, 2012)



Σχήμα 3.23: Διάγραμμα αρμοδιοτήτων για σχεδιασμό βάσει εργολάβου (GSHPA, 2012)

Κατασκευή

Αναφορικά με το υλικό των σωλήνων που ενσωματώνονται στους ενεργειακούς πασσάλους, συνήθως χρησιμοποιούνται σωλήνες πολυεθυλενίου υψηλής πυκνότητας (high-density polyethylene, HDPE) (de Moel, 2010).

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες διαφόρων ρευστών - φορέων θερμότητας στους σωλήνες ενεργειακών πασσάλων (Olgun & McCartney, 2014)

Property	Units	Water	Ethylene glycol	Propylene glycol	Methanol
Molecular weight		18.01	62.07	76.1	32.04
Specific gravity at 20°C		1	1.116	1.038	0.8
Density at 20°C	kg m ⁻³	10.0	11.1	10.4	7.9
Freezing point	F	0	-13	-59	-98
Normal boiling point	F	100	197	188	64
Specific heat at 20°C	J g ⁻¹ °C ⁻¹	4.19	2.19	2.50	2.47
Viscosity at 0°C	Centipoise	1.79	57.4	243	...
Viscosity at 20°C	Centipoise	1.01	20.9	60.5	0.6
Viscosity at 38°C	Centipoise	0.655	9.5	18	...
Thermal conductivity	W mK ⁻¹	0.609	0.258	0.147	0.202
Corrosiveness		None	Inhibitors required for steel, cast iron, aluminum and solder	Inhibitors required for cast iron, solder and aluminum	Biocide should be used to prevent fouling
Toxicity		None	Eye and skin irritation, long term exposure is hazardous	Non-hazardous	Highly toxic by inhalation, skin contact and ingestion
Environmental impact		None	Biodegrades when combined with water and carbon dioxide	Biodegrades when combined with water and carbon dioxide	Biodegrades into carbon dioxide and water

Σχετικά με τη σύσταση του ρευστού - φορέα θερμότητας που ανακυκλοφορεί στους σωλήνες των ε.π., η χρήση νερού μπορεί να είναι επαρκής για κτίρια σε θερμά κλίματα όπου οι απαιτήσεις σε δροσισμό είναι μεγαλύτερες από τις απαιτήσεις σε θέρμανση (Kavanaugh, 1998, as cited in de Moel, 2010). Αν και η χρήση του είναι συνήθης, ωστόσο δεν ενδείκνυται για ψυχρά κλίματα, όπου το πάγωμα του νερού

μπορεί να προκαλέσει ζημιά στους σωλήνες (de Moel, 2010), αλλά και να μειώσει την αποδοτικότητα του συστήματος. Για ψυχρότερα κλίματα συστήνονται αντιπηκτικά διαλύματα όπως μίγματα νερού-γλυκόλης, αλατούχα διαλύματα, οξικό άλας καλίου (brine potassium acetate) και μεθανόλη (Brandl, 1998, 2006; Tarnawski et al., 2009; Cane, Morrison and Ireland, 1998; Ozgener and Hepbasli, 2005, as cited in de Moel, 2010).

Ο Μποζής (2011) τονίζει ότι θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία των σωλήνων των βρόχων αρχικά και των σωλήνων των οριζόντιων συλλεκτήριων κυκλωμάτων στη συνέχεια, για το λόγο ότι μετά την έγχυση και πήξη του σκυροδέματος δεν είναι δυνατή η επισκευή τους. Το γεγονός ότι η προσοχή αυτή θα πρέπει να δοθεί κάτω από τις δυσμενείς συνθήκες ενός εργοταξίου θεμελιώσεων και σκυροδετήσεων, συνεπάγεται ελέγχους που επιβραδύνουν τους ρυθμούς αυξάνοντας έτσι το κόστος της κατασκευής της θεμελίωσης.

Η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί από την αυστριακή εταιρεία Enercret για την κατασκευή έγχυτων ε.π. με βρόχους σωλήνων (U-tubes) ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (Enercret, 2009, οπ. αναφ. στο Μποζή, 2011):

1. Οι σωλήνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας με ονομαστική πίεση λειτουργίας 10 ή 16 atm συνδέονται στον οπλισμό του πασσάλου, είτε στη μονάδα κατασκευής του μετά την κατασκευή του, είτε επί τόπου στο εργοτάξιο. Οι βρόχοι σωλήνων ισοκατανέμονται σε μια περίμετρο στην εσωτερική πλευρά του οπλισμού ώστε να προστατεύονται από αυτόν και προσαρμόζονται κυρίως επάνω στο ελικοειδές τσέρκι, ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα διατηρήσουν τις θέσεις τους. Μπορεί μάλιστα να μειωθεί το βήμα περιέλιξης στο τσέρκι, ώστε η σύνδεση των σωλήνων να είναι σταθερότερη και επομένως η προστασία τους αποτελεσματικότερη.

2. Τοποθετούνται δικλίδες και μανόμετρο σε τουλάχιστον 2 απολήξεις του σωλήνα στο άνω άκρο, οι οποίες εκτείνονται 60 cm το ελάχιστο πάνω από τη στέψη του πασσάλου. Το πρωτεύον δίκτυο των σωλήνων του πασσάλου πληρώνεται με αέρα πίεσης 7 - 8 bar, σφραγίζεται και γύρω από τις απολήξεις, τις δικλίδες και το μανόμετρο τοποθετείται προσωρινά προστατευτικός πλαστικός σωλήνας από PVC. Η πίεση στους σωλήνες εφαρμόζεται για την προστασία τους κατά την έγχυση και πήξη του σκυροδέματος, ενώ επιτρέπει την εποπτεία της ακεραιότητας των σωλήνων κατά την κατασκευή του πασσάλου.

3. Ο οπλισμός με το ενσωματωμένο δίκτυο των βρόχων σωλήνων βυθίζεται στο διάτρημα με προσοχή προκειμένου να μην υποστούν φθορά οι σωλήνες. Οι τεχνικές της προστασίας του διατρήματος είτε με χαλυβδοσωλήνες είτε με μπεντονίτη, είναι καταλληλότερες για την εγκατάσταση βρόχων σωλήνων, επειδή οι σωλήνες καταπονούνται λιγότερο σε σχέση με εκείνες όπου ο οπλισμός βυθίζεται στην ήδη πληρωμένη με σκυρόδεμα οπή.

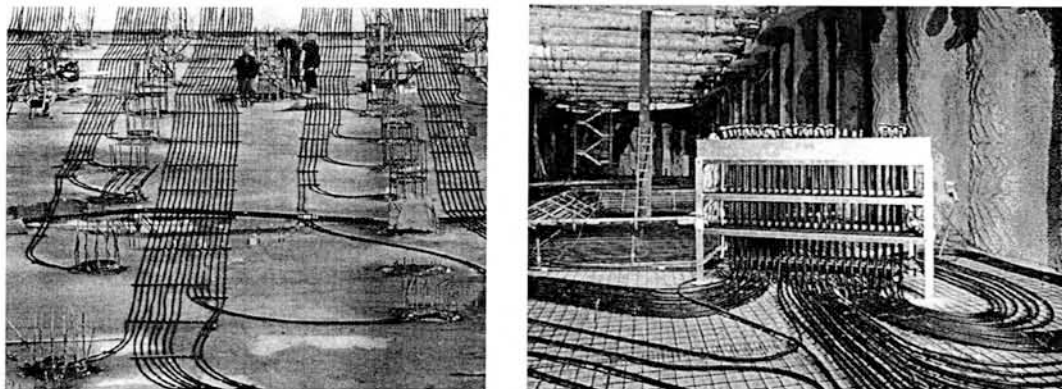
4. Τόσο η βύθιση του σωλήνα έγχυσης του σκυροδέματος, όσο και η διαδικασία της έγχυσης, θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην υποστούν ζημιά οι σωλήνες, ειδικά στους πασσάλους μικρής διαμέτρου όπου και απαιτούνται μικροί σωλήνες έγχυσης. Κατά τη φάση αυτή οι σωλήνες δέχονται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις, μηχανικές κατά την έγχυση του σκυροδέματος και θερμικές κατά την πήξη του.

5. Μετά την πήξη του σκυροδέματος αφαιρείται η κορυφή του πασσάλου μέχρι το επιθυμητό ύψος και συνδέεται ο οπλισμός του με αυτόν της πλάκας του κτιρίου που εδράζει. Η κοπή της κορυφή του πασσάλου πρέπει να γίνεται με προσοχή ώστε να μην υποστούν βλάβη τα άκρα των σωλήνων. Κατόπιν αφαιρείται ο προστατευτικός σωλήνας των άκρων και διενεργούνται έλεγχοι της κατάστασης των σωλήνων.

6. Αφού αφαιρεθεί ο αέρας από τους σωλήνες, κατόπιν τα άκρα τους συνδέονται με θερμική σύντηξη στο οριζόντιο συλλεκτήριο δίκτυο, του οποίου η κατασκευή πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και να εξελίσσεται παράλληλα με τη σκυροδέτηση της πλάκας. Το οριζόντιο δίκτυο συνήθως αναπτύσσεται είτε κάτω από την πλάκα είτε στο κάτω μέρος της. Για κάθε πάσσαλο συστήνεται η κατασκευή ενός ζεύγους οριζοντίων σωλήνων και η συγκέντρωση των ζευγών αυτών ανά ομάδες σε συλλέκτες - διανομείς. Αυτό γίνεται προκειμένου να είναι δυνατή η απομόνωση, ο έλεγχος και η τυχόν αποκοπή κάθε δικτύου πασσάλου, εφόσον παρουσιαστεί πρόβλημα με αυτό. Το οριζόντιο δίκτυο, μαζί με τους συλλέκτες - διανομείς και το γεωαναλλάκτη συναποτελούν το πρωτεύον δίκτυο.

7. Μετά το πέρας των οικοδομικών εργασιών, οι σωλήνες συνδέονται στο οριζόντιο δίκτυο και στους συλλέκτες, το οριζόντιο δίκτυο πληρώνεται με νερό ή υγρό αντιψυκτικό διάλυμα και διενεργούνται σχολαστικοί έλεγχοι πίεσης σε κάθε κύκλωμα. Κατόπιν οι συλλέκτες - διανομείς συνδέονται με την αντλία θερμότητας και εν τέλει πραγματοποιούνται οι τελικοί έλεγχοι και ρυθμίσεις.

Οι τεχνικές αυτές έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε μεγάλο αριθμό εγκαταστάσεων, και πλέον θεωρούνται δοκιμασμένες (Μποζής, 2011).



Σχήμα 3.24: Οριζόντιο δίκτυο και συλλέκτες - διανομείς σωλήνων πρωτεύοντος δικτύου ενεργειακών πασσάλων (Suckling, 2008; von der Hude and Sauerwein, 2007, οπ. αναφ. στο Μποζή, 2011)



Σχήμα 3.25: Οριζόντιο δίκτυο ενεργειακών πασσάλων στο Wuxi Goulian Financial Tower, China (Boranyak, 2013)

Ο (Brandl, 2006) αναφέρει τα παρακάτω μέτρα προστασίας των σωλήνων, που απαιτούνται κατά την εγκατάσταση κλωβών οπλισμού πασσάλου με ενσωματωμένους σωλήνες απορρόφησης θερμότητας (absorber pipes):

- α) Προστασία από μηχανική βλάβη, ειδικά στην περίπτωση κοπής από μηχανή και ράβδων οπλισμού χωρίς νευρώσεις (deburred reinforcement bars).
- β) Προστασία από θερμική βλάβη, κατά τη συγκόλληση του οπλισμού.
- γ) Ακριβής τοποθέτηση των κλωβών οπλισμού
- δ) Κατασκευή δύσκαμπτων κλωβών οπλισμού



ε) Ανύψωση μακρών κλωβών οπλισμού και από τα δύο άκρα, για την πρόληψη βλαβών στους υπό πίεση βρόχους σωλήνων.

ζ) Προσεκτική εισαγωγή, χρήση και εξαγωγή κωνικών σωλήνων (full tremie pipes) για τη ρίψη του σκυροδέματος στις οπές όπου θα κατασκευαστούν οι πάσσαλοι.

η) Οπτικός έλεγχος για την τελική θέση των σωλήνων, μετά την ολοκλήρωση του στερεώματος τους στον κλωβό οπλισμού

θ) Οι πολύ μεγάλοι εφοδιασμένοι κλωβοί οπλισμού θα πρέπει να εγκαθίστανται σε τμήματα, τα οποία πρέπει να ενωθούν με βίδωμα και όχι με συγκόλληση.

ι) Προστασία από στρέψη και ανύψωση του κλωβού οπλισμού κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης και της απόσυρσης του χαλύβδινου σωλήνα.

κ) Επαρκής απόσταση των σωλήνων απορρόφησης από τον οπλισμό στα άκρα των πασσάλων.

λ) Ειδικές προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν για ε.π. που χρησιμοποιούνται σε σήραγγες εκσκαφής και επανεπίχωσης (cut and cover), εφόσον καλύπτονται από μια δευτερεύουσα επένδυση (lining). Συγκεκριμένα προκειμένου να αποφευχθεί η βλάβη των σωλήνων απορρόφησης κατά την εγκατάσταση των συνδετικών καρφιών ή πείρων (dowels), οι σωλήνες πρέπει να προστατεύονται με δίπλες ράβδους.

3.5. Οφέλη και πλεονεκτήματα

Η χρήση των ενεργειακών πασσάλων έχει πληθώρα οφελών οικονομικών, περιβαλλοντικών, τεχνολογικών, κοινωνικών, πολιτικών, αλλά και σε θέματα ευφορίας και άνεσης των χρηστών των θεμελιωμένων σε ε.π. κτιρίων, τα οποία τους καθιστούν συνήθως μια ενδεδειγμένη και συμφέρουσα λύση για την αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον θέρμανση και δροσισμό κτιρίων και άλλων κατασκευών. Επιπλέον, τα οφέλη αυτά γίνονται ακόμα πιο σημαντικά με την ευρεία αξιοποίησή τους, την πρόοδο στην έρευνα για το σχεδιασμό τους και την εμπειρία από την κατασκευή και τη λειτουργία τους (de Moel et al., 2010). Οι ε.π. έχουν όλα τα οφέλη των σ.α.γ. και τα πλεονεκτήματά τους σε σύγκριση με άλλα συμβατικά συστήματα θέρμανσης - δροσισμού, καθώς και τα πλεονεκτήματα των κατακόρυφων συστημάτων κλειστού κύκλου σε σύγκριση με τα συστήματα ανοικτού κύκλου και με τους οριζόντιους γεωεναλλάκτες.

Ο Brandl (2006) συνοψίζει τα οφέλη των συστημάτων ε.π. και αβαθούς γεωθερμίας εν γένει, ως εξής:

α) Είναι φιλικά προς το περιβάλλον, δηλαδή μη ρυπογόνα και ενεργειακά βιώσιμα. Προσφέρουν μείωση της εξάρτησης από ορυκτές πηγές ενέργειας και συνεπώς μείωση εκπομπών CO₂ . Προωθούν τη συμμόρφωση σε διεθνείς περιβαλλοντικές δεσμεύσεις, όπως οι στόχοι του Κιότο και του Τορόντο.

β) Συμφέρουν οικονομικά σε μακροπρόθεσμα πλαίσια. Αν και οι ενεργειακές γεωκατασκευές συνήθως απαιτούν επενδυτικά κόστη παρόμοια ή ελαφρώς υψηλότερα από αυτά των συμβατικών συστημάτων, ωστόσο έχουν χαμηλότερα κόστη λειτουργίας και άρα μικρότερα κόστη διάρκειας ζωής. Είναι συστήματα μακράς διάρκειας ζωής με χαμηλά έξοδα συντήρησης.

γ) Τα σ.α.γ. μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς ρίσκο, χάρη στη χαμηλή θερμοκρασία και πίεση στα δίκτυα μετάδοσης θερμότητας, ενώ η ενσωμάτωση του γεωεναλλάκτη στο σκυρόδεμα του πασσάλου, αποτρέπει την καταστροφή των σωληνώσεων ή τη ρύπανση του υπογείου νερού.

δ) Η λειτουργία των σ.α.γ. είναι πλήρως αυτοματοποιημένη.

ε) Καθιστούν δυνατή τη βέλτιστη υδροθερμική συμπεριφορά κτιρίων, όπως μουσείων και κέντρων τέχνης.

ζ) Προσφέρουν περισσότερη άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων. Η αισθητή θερμοκρασία της ατμόσφαιρας του περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου, διαμορφώνεται από τη θερμοκρασία του αέρα και τη θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας, οι οποίες επηρεάζονται από τις θερμοκρασίες του τοίχου και του δαπέδου. Η άνεση επαυξάνεται από τη χαμηλής θερμοκρασίας θέρμανση των τοίχων και των δαπέδων, τα οποία αποτελούν μια μεγάλη θερμαντική λόγω ακτινοβολίας επιφάνεια.

η) Ο δροσισμός με τη χρήση σ.α.γ. μπορεί να αντικαταστήσει το συχνά θορυβώδη και ανθυγιεινό συμβατικό κλιματισμό, ενώ συνδυάζονται εύκολα με άλλα ενεργειακά συστήματα.

θ) Σε αντίθεση με την υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι ευάλωτη στην ανομβρία και το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας δεν επηρεάζεται από απρόβλεπτες διακυμάνσεις τιμών.

ι) Σε αντίθεση με συμβατικά συστήματα θέρμανσης - δροσισμού, δεν απαιτούν αποθηκευτικό χώρο για ορυκτά καύσιμα, σόμπα ή καμινάδα και δε χρειάζονται μη ενσωματωμένα στο δάπεδο ή τους τοίχους σώματα θερμοπομπών.

κ) Η γεωθερμική ενέργεια έχει θετική δημόσια εικόνα και σε αρκετές περιοχές η χρήση της υποστηρίζεται από κυβερνητικές επιχορηγήσεις. Επιπλέον, η συνεπαγόμενη μείωση της εισαγόμενης ενέργειας προσφέρει μείωση της εξάρτησης από εξωτερικές οικονομικές και πολιτικές καταστάσεις.

Πίνακας 3.2: Κίνητρα για την εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας (ground energy systems) στο UK (Preene & Powrie, 2009)

Driver	Detail	Notes
Energy conservation	Modern building design focuses on reducing the energy demand of buildings by a variety of active and passive measures (Boyle, 2005; Thorne, 2006). Ground energy systems offer the chance to reduce significantly the energy consumed to heat and cool a building.	Ground energy systems do require external power in order to operate (unlike, for example, wind turbines and some forms of renewable energy). However, they are very energy efficient. Systems using heat pumps typically can provide 3–5 units of heat energy for every unit of electrical energy consumed (this is expressed as a coefficient of performance (COP) of 3–5). At present buildings are responsible for around half of the UK's carbon emissions (DTI, 2006).
Environment	Ground energy systems are classified as low or zero carbon (LZC) systems, and can offer significant reduction in carbon emissions compared with traditional systems.	
Economics	Ground energy systems can offer significantly lower annual operating costs than traditional heating and cooling systems.	The economic advantage stems mainly from the reduced energy consumption.
Regulation	In the UK and the rest of Europe, regulations applicable to significant new and refurbished buildings require that designers consider ways in which at least 10% of the building energy demand can be met from LZC sources.	The requirement to consider potential use of LZC systems for buildings is detailed in UK regional and national policy
Change in building needs	There is an increasing expectation by many users of commercial buildings that some form of cooling will be provided to control building temperatures. Ground energy systems can be an effective way of providing comfort cooling.	The combination of change in office working practices (with increased density of heat-generating office equipment) and predicted increases in summer temperatures, means that, without cooling, thermal discomfort in buildings will be a significant problem in the future.
Space and practicality	Traditional cooling systems typically require some plant space at roof level, for cooling towers or other plant that rejects building heat to air. Ground energy systems used for cooling can be entirely located in basement plant rooms, freeing up additional space that can be sold or let.	Space on the upper floors of a building may often be the most expensive or desirable. The value released by avoiding the need for roof-level plant rooms can potentially be a significant factor in the financial assessment of cooling systems based on the ground energy concept.

Όπως αναφέρεται στο άρθρο των de Moel et al. (2010), τα συστήματα γ.α.θ. επιπλέον δεν αλοιώνουν την αισθητική εμφάνιση του κτιρίου, δεν απαιτούν εξωτερικούς ανεμιστήρες, δεν είναι εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες, δεν απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία τους και δεν περιλαμβάνουν εκρηκτικά αέρια στο εσωτερικό του κτιρίου. Επίσης έχουν χαρακτήρα αποκεντρωτικό και αυτάρκη, πλεονέκτημα από το οποίο μπορούν να ωφεληθούν περιοχές απομονωμένες, μακριά από αστικά κέντρα (de Moel et al., 2010).

Σχετικά με τα πλεονεκτήματα των κατακόρυφων γεωεναλλακτών σε σχέση με τους οριζοντίους, οι de Moel et al. (2010) σημειώνουν ότι συνήθως προτιμώνται για τους παρακάτω λόγους:

- α) έχουν χαμηλότερη απαίτηση σε επιφάνεια,
- β) έχουν μικρότερα μήκη σωλήνων,
- γ) έχουν χαμηλότερα κόστη ηλεκτρισμού για ανακυκλοφορία του ρευστού στους σωλήνες,
- δ) έχουν υψηλότερη και με λιγότερες διακυμάνσεις αποδοτικότητα,
- ε) οι οριζόντιοι βρόχοι επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Sanaye & Niroomand, 2009, as cited in de Moel et al., 2010).

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα των συστημάτων κλειστού κύκλου (γεωεναλλακτών) σε σχέση με τα ανοικτού, οι de Moel et al. (2010) αναφέρουν ότι αν και τα ανοικτά χρησιμοποιούνται ευρέως και έχουν χαμηλότερα αρχικά κόστη, ωστόσο έχει σημειωθεί ροπή προς την προτίμηση των κλειστών συστημάτων για τους παρακάτω λόγους:

α) το μεγαλύτερο αρχικό κόστος τα κλειστά συστήματα το αντισταθμίζουν με μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη, ενώ τα ανοικτά συστήματα έχουν μακροπρόθεσμα μεγαλύτερα οικονομικά, τεχνολογικά και περιβαλλοντικά ρίσκα (Boennec, 2008; Rawlings & Sykulski, 1999, as cited in de Moel et al., 2010),

β) η εγκατάστασή των κλειστών συστημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολλούς τύπους εδαφών,

γ) τα ανοικτά συστήματα αφενός υπόκεινται σε περιορισμούς και κανονισμούς αναφορικά με τη χρήση του υπογείου νερού και την ποιότητά του, όπως η απαίτηση χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο και αφετέρου υπάρχει χαμηλή διαθεσιμότητα περιοχών για την εγκατάστασή τους και απαιτούμενου μέγεθους υδροφόρου ορίζοντα (Rawlings & Sykulski, 1999; Sanner, 2001, as cited in de Moel et al., 2010).

Όσον αφορά τη χρήση των ε.π. για τη θέρμανση και το δροσισμό καταστρωμάτων γεφυρών, σε χώρες με κρύους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια, ο Brandl (2006) αναφέρει τα εξής περιβαλλοντικά, οικονομικά και τεχνικά οφέλη:

α) διατηρεί το οδόστρωμα καθαρό από πάγο και χιόνι, μειώνοντας έτσι σημαντικά τους κινδύνους της κυκλοφοριακής συμφόρησης,

β) μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, υποκαθιστώντας με καθαρή, ανανεώσιμη ενέργεια την αμμοχαλίκωση και τη χρήση αλατιού αποπάγωσης,

γ) μειώνει τα έξοδα συντήρησης λόγω φθορών όπως η θερμικά επιφερόμενη αυλάκωση των οδοστρωμάτων που προκαλείται από την έντονη κυκλοφοριακή




συμφόρηση και οι θερμικοί καταναγκασμοί στα καταστρώματα γεφυρών, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της κατασκευής και του οδοστρώματος.

Πίνακας 3.3: Σύγκριση απόδοσης, κόστους εγκατάστασης και εδαφικών συνθηκών συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας ανοικτού και κλειστού κύκλου (Lee, 2009, as cited in Cervera, 2013)

Type	Subtype	Efficiency	Installation cost	Ground Conditions
Open Loop	Vertical Wells	High	High	Difficult
	Pond Loop		Medium	Difficult
Closed Loop	Horizontal Loop	Low	Low	Simple
	Boreholes	High	High	Simple
	Energy Piles		Medium	

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα των ε.π. σε σύγκριση με τις κατακόρυφες γεωτρήσεις (vertical boreholes) και άλλα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, το πιο ουσιαστικό κατά το Brandl (2006) πλεονέκτημα είναι το ότι οι ε.π. απαιτούνται ήδη για στατικούς λόγους και έτσι δε χρειάζεται να κατασκευαστούν ξεχωριστά. Όταν δηλαδή είναι επιβεβλημένη η θεμελίωση ενός κτιρίου σε πασσάλους, τότε οι ε.π. έχουν συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλα σ.α.γ.. Το ίδιο πλεονέκτημα εντοπίζουν ο Boennec (2008), που επισημαίνει ότι απαιτείται μόνο μία γεώτρηση για την εγκατάσταση 2 αντικείμενων (πασσάλου και γεωεναλλάκτη), εξοικονομώντας έτσι σημαντικό μέρος του κόστους εγκατάστασης και ο Μποζής (2011), ο οποίος τονίζει ότι το σημαντικότερο κόστος στην κατασκευή πεδίων κατακόρυφων γεωτρήσεων είναι το κόστος ανόρυξης γεωτρήσεων (drilling) και πλήρωσής τους (grouting) και συμπεραίνει ότι κατά συνέπεια η λειτουργία ενός συστήματος γ.α.θ. συζευγμένου με ε.π. αντιπροσωπεύει ένα είδος αποπληρωμής μέρους του υψηλού κόστους της θεμελίωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί το αρχικό κόστος εγκατάστασης αντισταθμίζεται από τα χαμηλά κόστη λειτουργίας του συστήματος (de Moel et al., 2010). Οι Amis & Loveridge (2014) προσθέτουν επίσης ένα άλλο συγκριτικό πλεονέκτημα, το οποίο έχει να κάνει με τον προγραμματισμό της κατασκευής της θεμελίωσης, όπου με έγκαιρο και σωστό συντονισμό εργασιών, η εγκατάσταση των σωλήνων θα διαρκέσει ελάχιστο ή και καθόλου επιπλέον χρόνο. Ένα ακόμα συγκριτικό πλεονέκτημα, είναι ότι το πεδίο των ε.π. βρίσκεται κάτω ακριβώς από την ανωδομή και κατά συνέπεια δεν καταλαμβάνει επιπρόσθετη επιφάνεια εδάφους εκτός των ορίων της περιμέτρου του κτίριου, όπως συμβαίνει με την πλειονότητα των πεδίων κατακόρυφων γεωτρήσεων (Μποζής, 2011). Επιπλέον, η απόδοση των ε.π.

είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των κατακόρυφων γεωτρήσεων (Μποζής, 2011).

	Vertical	Horizontal	Energy Pile
			
Poor ground quality	8 W/ft	1 W/ft ²	8 W/ft
Average ground quality	15 W/ft	2.5 W/ft ²	15 W/ft
Excellent ground quality	25 W/ft	4 W/ft ²	25 W/ft

Σχήμα 3.26: Σύγκριση της ενεργειακής παροχής (energy delivery) γεωεναλλακτών κατακόρυφων, οριζοντίων και ενεργειακών πασσάλων, σε σχέση με την ποιότητα του περιβάλλοντος εδάφους (Olgun & McCartney, 2014)

Σχετικά με τις αναλύσεις κόστους - οφέλους, ο Brandl (2006) σημειώνει ότι η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης για τέτοια συστήματα θέρμανσης - δροσισμού συνήθως κυμαίνεται από 2 έως 10 χρόνια, αναλόγως τις κλιματικές συνθήκες, τις ιδιότητες του εδάφους, τις τιμές της ενέργειας, τη θεμελίωση και τα χαρακτηριστικά του κτιρίου. Η αρχική επενδυτική δαπάνη μάλιστα, μπορεί σε ειδικές περιπτώσεις να είναι μικρότερη σε σχέση με συμβατικά συστήματα θέρμανσης - δροσισμού ενώ τα έξοδα θέρμανσης και δροσισμού μπορεί να μειωθούν έως και 2/3 καθ' όλη την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Εκτιμά επίσης ότι το οικονομικά ελάχιστο μήκος των ε.π. και διαφραγματικών τοίχων είναι περίπου 6m. Η πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία, είναι η εποχιακή λειτουργία του συστήματος, δηλαδή θέρμανση το χειμώνα με εξαγωγή θερμότητας από το έδαφος και δροσισμός το καλοκαίρι με αποθήκευση θερμότητας στο έδαφος, πετυχαίνοντας έτσι ενεργειακή ισορροπία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας για ισορροπημένη εποχιακή λειτουργία θέρμανσης και δροσισμού, μπορεί να είναι έως και 75%, σε σύγκριση με συμβατικά συστήματα κλιματισμού (Brandl, 2006). Οι Sanner et al. (1996, as cited in de Moel et al., 2010) συστήνουν μάλιστα ότι προκειμένου να είναι οικονομικά βιώσιμη η αξιοποίηση ενός συστήματος ε.π., θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει αμφοτέρως τις λειτουργίες θέρμανσης και δροσισμού. Επιπλέον, συνδυασμοί αβαθούς γεωθερμικής και ηλιακής θέρμανσης και δροσισμού έχουν αποδειχθεί κατάλληλοι για να συνεισφέρουν αποδοτικά στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά η οικονομικά βέλτιστη λύση εξαρτάται από πολυάριθμες

τοπικές συνθήκες (Brandl, 2006). Ο Brandl (2006) παρουσιάζει επιπλέον τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από 5 κτίρια θεμελιωμένα σε ε.π.: ενός εργοστασίου επεξεργασίας χαρτιού, μιας αίθουσας πολλαπλών χρήσεων, ενός spa hotel, ενός κτιρίου κέντρου τέχνης στο Bregenz, Austria και ενός κτιρίου στο Keble College, Oxford University, το οποίο ήταν η πρώτη εφαρμογή ε.π. στο Ηνωμένο Βασίλειο. Σημειώνει επίσης ότι όλα τα συστήματα λειτουργούν χωρίς προβλήματα από την έναρξή τους.

3.6. Περιορισμοί, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μειονεκτήματα

Όπως όλα τα συστήματα, έτσι και οι ε.π., ειδικά ως σχετικά νέα τεχνολογία που είναι, έχουν, εκτός από οφέλη, και ενδεχόμενους περιορισμούς και μειονεκτήματα, που προκαλούν κατά συνέπεια αβεβαιότητα εκ μέρους των καταναλωτών και των κατασκευαστών (de Moel et al., 2010).

Το πιο προφανές μειονέκτημα των ε.π. σε σχέση με άλλα σ.α.γ. όπως οι κατακόρυφες γεωτρήσεις, έγκειται στη φύση των πασσάλων ως απαραίτητα και αναπόσπαστα δομικά στοιχεία για τη σταθερότητα και ακεραιότητα της ανωδομής και είναι ο κίνδυνος πρόκλησης προβλημάτων στη γεωτεχνική λειτουργία των πασσάλων και του εδάφους που τους περιβάλλει, από την ενδεχόμενη έντονη ανταλλαγή θερμότητας λόγω ακατάλληλου σχεδιασμού ή λειτουργίας του συστήματος, ζήτημα το οποίο αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Αυτός είναι μάλιστα ο κύριος λόγος για τη συστολή και αβεβαιότητα από την κατασκευαστική βιομηχανία, ως προς την υιοθέτηση της τεχνολογίας αυτής (Amatya et al., 2012).

Ο Brandl (2006) συνοψίζει τις εξής πιθανές θερμικά επαγόμενες αλλαγές στις υδραυλικές, φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους, από τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων:

Όσον αφορά τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, η μείωση της θερμοκρασίας του υπογείου νερού προκαλεί αύξηση του ιξώδους και κατά συνέπεια μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, γεγονός το οποίο οδηγεί σε χαμηλότερες ταχύτητες ροής καθώς και σε μικρότερες κλίσεις ροής του υπογείου νερού. Ωστόσο, σύμφωνα με αναλυτικές παραμετρικές μελέτες, στην πράξη τα φαινόμενα αυτά είναι αμελητέα.

Σχετικά με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, η πολύ έντονη ψύξη του υπογείου νερού λόγω της υπερβολικής εξαγωγής ενέργειας για τη θέρμανση κτιρίων, αυξάνει την τιμή του pH και συγχρόνως μειώνει τη διαλυτότητα του ασβεστίου,

πράγμα το οποίο ευνοεί το φράξιμο των πόρων. Επιπλέον, η διαλυτότητα των αερίων ουσιών όπως το CO₂ αυξάνεται και κατά συνέπεια αυξάνεται και η σκληρότητα (hardness) του υπογείου νερού. Η πολύ έντονη θέρμανση από την άλλη, έχει ως αποτέλεσμα μια σχετικά μεγάλη μείωση στη διαλυτότητα του οξυγόνου, πράγμα το οποίο μπορεί να καταστήσει το υπόγειο νερό μη πόσιμο. Μέχρι τώρα, έρευνες έχουν δείξει ότι η επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών μικρότερων από $\Delta T = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, είναι αμελητέες μέσα σε ένα εύρος θερμοκρασιών 0 - 20 °C.

Αναφορικά με τις βιολογικές ιδιότητες του εδάφους, η θερμοκρασία είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες για τους μικροοργανισμούς στο υπόγειο νερό, καθώς πολλοί από αυτούς μπορούν να επιβιώσουν μόνο μέσα σε ένα πολύ περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος. Συγκεκριμένα, η δραστηριότητα των μικροοργανισμών που καταναλώνουν βακτήρια μειώνεται αισθητά σε θερμοκρασίες κάτω από 10 °C και αν για παράδειγμα η θερμοκρασία πέσει από τους 7 °C στους 2 °C, το ποσοστό θνησιμότητας των παθογόνων μειώνεται περίπου κατά το ήμισυ.

Ο Brandl (2006) αναφέρει επίσης ότι οι πιθανές επιδράσεις στις ιδιότητες γειτονικών εδαφών και στο υπόγειο νερό από τη μακράς διάρκειας λειτουργία των ε.π. έχουν οδηγήσει τις τοπικές αρχές να απαιτούν ολοένα και περισσότερο, για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας στο έδαφος, λόγω της λειτουργίας τους.

Ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι αυτός της μακροπρόθεσμης ενεργειακής ισορροπίας στη σχέση εξαγωγής και εισαγωγής θερμότητας από και προς το έδαφος, το οποίο αποτελεί προϋπόθεση προκειμένου ένα σύστημα αβαθούς γεωθερμίας να είναι αποδοτικό (Rawlings & Sykulski, 1999; Dickinson et al. 2009, as cited in de Moel et al., 2010). Συγκεκριμένα, αν η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος, τότε αυτό έχει ως αποτελέσματα:

α) τη μείωση της απόδοσης της αντλίας θερμότητας, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του υγρού στους σωλήνες του γεωεναλλάκτη (Wang & Qi, 2008, as cited in de Moel et al., 2010),

β) τη θερμική αστοχία του εδάφους, που εκτός από τη θερμική απόδοση του συστήματος επηρεάζει και τη στατική του λειτουργία (Hueckel et al., 2009, as cited in de Moel et al., 2010) και

γ) πιθανόν τη διατάραξη της φυσικής ισορροπίας και της οργανικής ζωής στο εσωτερικό του εδάφους (Tarnawski et al., 2009, as cited in de Moel et al., 2010).

Θεωρείται επίσης ως μορφή ρύπανσης από περιβαλλοντικούς οργανισμούς (Boennec, 2008, as cited in de Moel et al., 2010).

Οι Rawlings and Sykulski (1999, as cited in de Moel et al., 2010) συμπεραίνουν ότι η μακροπρόθεσμη σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του εδάφους θα πρέπει επίσης ν' αποφεύγεται. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει ο Brandl (2006, as cited in de Moel et al., 2010), ο οποίος συμπεραίνει ότι αν και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις λόγω της λειτουργίας των ενεργειακών πασσάλων δεν έχουν επιπτώσεις στο έδαφος, εφόσον η θερμοκρασία του διατηρείται άνω των +2 °C, εντούτοις αν η θερμοκρασία πέσει κάτω από το όριο αυτό, τότε προκαλούνται φαινόμενα ψύξης - απόψυξης (freeze-thaw) στο έδαφος, καθώς και μειώνεται η θερμική απόδοση του συστήματος.

Ο Brandl (1998, as cited in de Moel et al., 2010) σημειώνει ότι οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στη διάρκεια του έτους μπορούν να οδηγήσουν σε μειωμένη απόδοση της αντλίας θερμότητας και των γεωεναλλακτών. Επίσης, αν το έδαφος αποτελείται κυρίως από ξηρή άμμο και χαλίκι, τότε απαιτείται μεγαλύτερο μήκος πασσάλων και σωληνώσεων, γεγονός το οποίο μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος και να μειώσει έτσι τα οικονομικά οφέλη του συστήματος. Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι η αύξηση του κόστους εγκατάστασης σε αναλογία με το μήκος του πασσάλου, το οποίο όμως μπορεί να αποσβεστεί με την αύξηση της εξαγόμενης θερμότητας λόγω του μεγαλύτερου μήκους του γεωεναλλάκτη.

Οι Dickinson et al. (2009, as cited in de Moel et al., 2010) επισημαίνουν ότι σε συστήματα εγκατεστημένα σε ψυχρά κλίματα, η χρήση αντιψυκτικού που απαιτείται προκειμένου να αποφευχθεί το πάγωμα του εδάφους και του υγρού στους σωλήνες του γεωεναλλάκτη, ενέχει κινδύνους για διαρροές. Ωστόσο, αυτό μπορεί ν' αποφευχθεί κάνοντας σωστή χρήση του υγρού στο σύστημα.

Οι Cane et al. (1998, as cited in de Moel et al., 2010) αναφέρουν ότι λόγω του γεγονότος ότι οι ε.π. είναι σχετικά νέα τεχνολογία, έρευνες έχουν δείξει ότι αν το σύστημα δε σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και λειτουργήσει με το σωστό τρόπο, τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή παροχή του υγρού στους σωλήνες, ανεπαρκή ανταλλαγή θερμότητας στο έδαφος, διαρροές του υγρού στο σύστημα και παρεμβολές μεταξύ των τμημάτων του. Εντούτοις, τα ζητήματα αυτά επιλύονται με την εμπειρία και τον καλύτερο σχεδιασμό.

Οι Nam et al. (1998, as cited in de Moel et al., 2010) σημειώνουν ότι όσον αφορά το σχεδιασμό του συστήματος, ο βασικός περιορισμός που υπάρχει είναι ότι κανένα

θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης της συμπεριφοράς του δε μπορεί να προσδιορίσει όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν το σύστημα, λόγω της αδυναμίας τους να αναπαραστήσουν σύνθετα γεωλογικά στρώματα.

Οι de Moel et al. (2010) παρατηρούν επίσης ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες της εξαγόμενης θερμότητας, καθιστούν τη χρήση των ε.π. περιορισμένη σε εφαρμογές θέρμανσης.

Ο Μποζής (2011) εντοπίζει τους παρακάτω περιορισμούς των πεδίων ε.π., σε σύγκριση με τα πεδία των κατακόρυφων γεωτρήσεων:

α) Κατά τη λειτουργία των συστημάτων ε.π. δημιουργείται ένα κάτω όριο θερμοκρασιών (διαφορετικό από το όριο που θέτει η λειτουργία της αντλίας θερμότητας), πέραν του οποίου θα αναπτυχθεί πάγος στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους. Αυτή η κατάσταση θα πρέπει να αποφευχθεί με κάθε τρόπο, καθώς μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας του πάσσαλου. Αντίθετα, κατά τη λειτουργία συστημάτων κατακόρυφων γεωτρήσεων δε δημιουργούνται ανάλογοι περιορισμοί.

β) Η λογική στο σχεδιασμό των συστημάτων που θα συζευχθούν με πεδία ε.π. είναι αντίστροφη από αυτή των κατακόρυφων γεωτρήσεων. Στα πεδία των κατακόρυφων γεωτρήσεων, με δεδομένες τις ανάγκες (ή τμήματός αυτών) ενός κτιρίου σε φορτία και καταναλώσεις, αναζητούνται οι διαστάσεις του πεδίου των γεωεναλλακτών που μπορούν να τις καλύπτουν με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αντίθετα, στα πεδία ε.π., έχοντας ως δεδομένα από τη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης του κτιρίου, το μέγιστο μήκος ανάπτυξης τους και τον όγκο του ενεργοποιούμενου εδάφους, αναζητείται εν γένει ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση ενός συστήματος που θα αξιοποιεί με τον αποδοτικότερο οικονομικά τρόπο το δεδομένης έκτασης πεδίο γεωεναλλακτών. Συγκεκριμένα αναζητούνται η ισχύς του συστήματος που θα εγκατασταθεί και τα ετήσια ποσά ενέργειας που μπορούν να εξαχθούν από το δεδομένο πεδίο.

γ) Στις περιπτώσεις όπου η θερμική διαχυτότητα του εδάφους είναι μεγάλη και άρα η θερμότητα διαχέεται γρήγορα στην ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους και έξω απ' αυτήν, κρίσιμο ζήτημα είναι αυτό της θερμικής «ρύπανσης» που μπορεί να αναπτυχθεί στην περιοχή έξω από το πεδίο. Αυτή αφορά είτε στην περιοχή του εδάφους εκτός των ορίων του οικοπέδου του κτιρίου, είτε στον υδροφόρο ορίζοντα. Η εγκατάσταση των συστημάτων υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να μην επιτραπεί

από πιθανές απαγορευτικές σχετικές διατάξεις. Στις περιπτώσεις όπου η θερμική διαχυτότητα του εδάφους είναι μικρή, και άρα η θερμότητα δεν απομακρύνεται εύκολα έξω από την ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους, κρίσιμο ζήτημα είναι η σχέση μεταξύ των απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση και σε ψύξη. Όταν η διαφορά των απαιτήσεων αυτών είναι μεγάλη, τότε υπάρχει μια σταδιακή άνοδος ή πτώση της θερμοκρασίας με το πέρασμα των χρόνων, η οποία δύναται να καταστήσει αντιοικονομική τη λειτουργία του συστήματος.

3.7. Νομοθεσία, οδηγίες και προώθηση

Νομοθεσία

Στην Ελλάδα, για την αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας θερμοκρασίας μικρότερης από 25 °C, με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, δεν απαιτείται εκμίσθωση από την Πολιτεία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του γεωθερμικού δυναμικού θερμοκρασίας άνω των 25 °C, αλλά έκδοση σχετικής άδειας από τις Νομαρχίες, σύμφωνα με την υπουργική απόφαση ΥΑ Δ9Ν,Δ/Φ166/οικ18508/5552/207//19.10.2004 (ΦΕΚ 1595 Β) (Μενδρινός & Καρύτσας, 2005).

Οδηγίες

Προς το παρόν υπάρχουν μόνο 2 κείμενα με κατευθυντήριες οδηγίες για το σχεδιασμό ενεργειακών πασσάλων και άλλων ενεργειακών γεωκατασκευών, (GSHPA, 2012; SIA, 2005, as cited in Olgun et al., 2014a), ενώ παράγραφοι για το σχεδιασμό αυτού του τύπου των συστημάτων έχουν ενσωματωθεί και στις οδηγίες για γεωθερμικά συστήματα που εκδίδει η Ένωση Γερμανών Μηχανικών (VDI, 2010, όπ. αναφ. στο Μποζή, 2011). Το πρώτο κείμενο συντάχθηκε από τον οργανισμό Ground Source Heat Pump Associations (GSHPA), όπου δίνονται οδηγίες για το θερμικό και γεωτεχνικό σχεδιασμό των ε.π., την κατασκευή τους, καθώς και τις αρμοδιότητες και το συντονισμό των εργασιών των κατασκευαστών, ενώ το δεύτερο από την Κοινότητα Ελβετών Μηχανικών και Αρχιτεκτόνων (SIA, Swiss Society of Engineers and Architects), όπου δίνονται πιο λεπτομερείς οδηγίες για το θερμικό σχεδιασμό των ε.π. (Olgun et al., 2014a).

Πίνακας 3.4: Αμερικανικοί και Ευρωπαϊκοί κώδικες και οδηγίες για το σχεδιασμό πασσάλων, συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας και ενεργειακών πασσάλων (Olgun et al., 2014a)

Region	Topic	Document	Document type
USA	Pile design	Federal Highway Administration 'Design and Construction of Driven Pile Foundations' (Hannigan et al. 1996)	Design guidance
	Geothermal System design	U.S. Army Corps of Engineers 'Design of Pile Foundations' (USACE 1993)	Design guidance
		ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE 2013)	Design guidance
Europe	Thermal pile design	International Ground Source Heat Pump Association 'Design and Installation Standards' (Skouby and Meline 2013)	Design guidance
		None	
	Pile design	Eurocode 7 (Simpson 2011)	Code
	Geothermal system design	EN 15459 heating systems – Design of heat pump heating systems	Code
	Geothermal system design	SIA 384/6 (SN 565) (2009) 'Borehole heat exchangers for heating and cooling' (Switzerland)	Design guidance
	Geothermal system design	VDI 4640 Blatt 1–4 (2010) 'Thermal use of the underground, part 1–4' (Germany)	Design guidance
	Geothermal system design	Ground Source Heat Pump Association 'Vertical Borehole Standard' (GSHPA 2011)	Design guidance
	Thermal pile design	Ground Source Heat Pump Association 'Thermal Pile Design Guidelines' (see section 2.2 of GSHPA 2012)	Design guidance
Thermal pile design	SIA D 0190 (2005). 'Use of earth heat through foundation piles, etc.' (Switzerland)	Design guidance	

Πρώθηση

Ο Brandl (2006) εκτιμά ότι προκειμένου να προωθηθεί η εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης - δροσισμού βασισμένων σε ανανεώσιμη ενέργεια και να επιτευχθούν οι στόχοι για ανανεώσιμη ενέργεια και ενεργειακά κτίρια, αυτό μπορεί να γίνει μόνο με πολιτικά μέτρα:

α) Η υψηλή φορολογία στα ορυκτά καύσιμα είναι το πιο σημαντικό μέτρο για εξοικονόμηση ενέργειας και προώθηση των α.π.ε..

β) Οικονομικά κίνητρα από το κράτος για ιδιώτες επενδυτές, ιδιοκτήτες κατοικιών, εταιρείες, διαχειριστές του δημοσίου, για να επενδύσουν σε συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς επίσης και ισχυρή στήριξη από την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

γ) Νομοθεσία.

δ) Επιχορηγήσεις από το δημόσιο.

Στην Αυστρία (Brandl, 2006), τη Γερμανία (de Moel et al., 2010), το Ηνωμένο Βασίλειο (Amis & Loveridge, 2014; Olgun et al., 2014a) και την Καλιφόρνια (Olgun et al., 2014a) δίνονται οικονομικά κίνητρα και επιχορηγήσεις από το κράτος για την προώθηση της εγκατάστασης σ.α.γ., ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γαλλία (Olgun et al., 2014a) και την Αυστραλία (de Moel et al., 2010) έχουν ενσωματωθεί στη νομοθεσία διατάξεις για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των ρύπων και για την υιοθέτηση τεχνολογιών α.π.ε..

Κεφάλαιο 4^ο : Συμπεριφορά και σχεδιασμός των ενεργειακών πασσάλων

Οι έρευνες για την κατανόηση της συμπεριφοράς, καθώς και ο σχεδιασμός των ενεργειακών πασσάλων χωρίζεται σε 2 κατηγορίες σε αντιστοιχία με τα 2 συνθετικά του στοιχεία, το γεωεναλλάκτη και τον πάσσαλο θεμελίωσης. Οι κατηγορίες αυτές είναι αντίστοιχα:

- α) η θερμική (thermal) τους συμπεριφορά και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος και
- β) η θερμομηχανική (thermomechanical) τους συμπεριφορά και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος.

4.1. Θερμική συμπεριφορά ενεργειακών πασσάλων

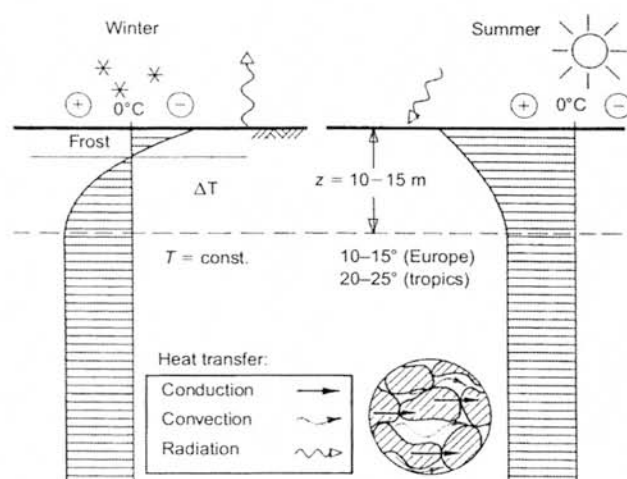
Η θερμική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους είναι ένα ενεργειακό ζήτημα κατά βάση μηχανολογικής φύσεως με πλούσια βιβλιογραφία, που σχετίζεται αφενός με τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες του γεωεναλλάκτη, του σώματος του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους και τον προσδιορισμό των θερμικών τους ιδιοτήτων και αφετέρου με τη θερμική απόδοση του ενεργειακού πασσάλου, τις παραμέτρους σχεδιασμού του και άλλους παράγοντες που την επηρεάζουν. Ωστόσο, η ανάπτυξη του ζητήματος αυτού και η εμβάθυνση στη σχετική βιβλιογραφία είναι εκτός των ορίων και των στόχων της εργασίας αυτής και για το λόγο αυτό η εργασία περιορίζεται σε μια ενδεικτική αναφορά.

4.1.1. Μετάδοση θερμότητας

Η μετάδοση της θερμότητας στο έδαφος πραγματοποιείται με τους παρακάτω μηχανισμούς (Brandl, 2006):

- α) αγωγή (conduction)
- β) συναγωγή (convection)
- γ) ακτινοβολία (radiation)
- δ) εξάτμιση και συμπύκνωση (vaporisation and condensation)
- ε) ανταλλαγή ιόντων (ion exchange)

ζ) ψύξη - απόψυξη (freezing - thawing processes)



Σχήμα 4.1: Μετάδοση θερμότητας στο έδαφος (Brandl, 2006)

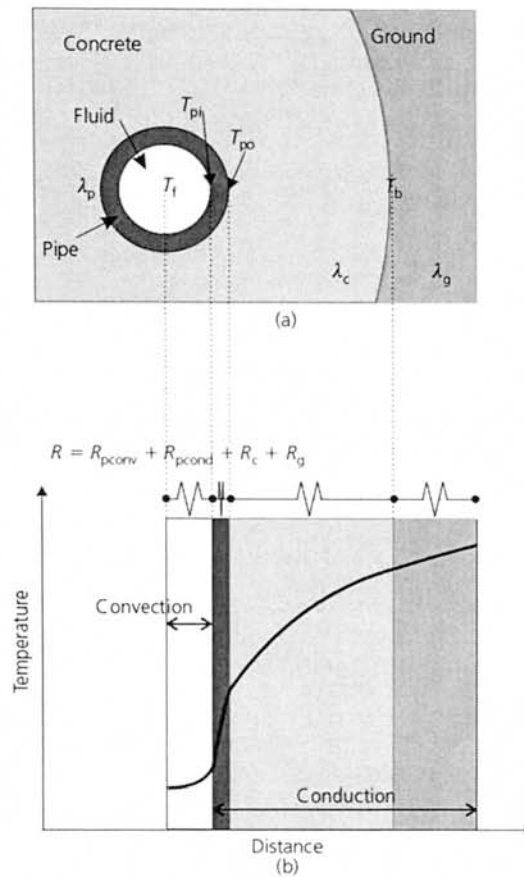
Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται μεταξύ μορίων διαφορετικής θερμοκρασίας, χωρίς μετακίνηση της ύλης (Αποστολίδου, 2010).

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή πραγματοποιείται από τη μια περιοχή στην άλλη των ρευστών, με μετακίνηση της ύλης και είναι ανεξάρτητη από τη μικρή αγωγιμότητα των ρευστών (Αποστολίδου, 2010). Η Loveridge (2012) διακρίνει τη συναγωγή των ρευστών σε ελεύθερη (free convection) και σε εξαναγκασμένη (forced convection ή advection). Η ελεύθερη συναγωγή πραγματοποιείται όταν ένα ρευστό εκτεθεί σε μια επιφάνεια διαφορετικής θερμοκρασίας, ενώ η εξαναγκασμένη όταν το ρέον ρευστό περάσει πάνω από μια επιφάνεια διαφορετικής θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει μεταξύ του ρευστού που ανακυκλοφορεί στους σωλήνες των γεωεναλλακτών και τα τοιχώματα των σωλήνων ή με την κίνηση του ρέοντος υπόγειου νερού (Loveridge, 2012).

Η μετάδοση της θερμότητας σε μη παγωμένα εδάφη πραγματοποιείται κυρίως με αγωγή και δευτερευόντως με συναγωγή, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί και με την αλλαγή φάσης (εξάτμιση και συμπύκνωση) του νερού, ενώ το ποσοστό συμμετοχής της ακτινοβολίας είναι αμελητέο (Brandl, 2006). Τα φαινόμενα ψύξης - απόψυξης μπορούν επίσης να μεταδώσουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας, αλλά θα πρέπει να αποφεύγονται σε εφαρμογές ενεργειακών γεωκατασκευών (Brandl, 2006).

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η μετάδοση θερμότητας μεταξύ πασσάλου - εδάφους, στο σώμα του πασσάλου και μεταξύ σκυροδέματος - τοιχωμάτων σωλήνων

πραγματοποιείται με αγωγή, ενώ μεταξύ τοιχωμάτων σωλήνων - ρευστού πραγματοποιείται με συναγωγή.



Σχήμα 4.2: Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό του πασσάλου και μεταξύ πασσάλου - εδάφους (Loveridge & Powrie, 2013)

Υπό συνθήκες θερμικά σταθερής κατάστασης (steady state) ισχύει για τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή ο νόμος του Fourier (Loveridge, 2012):

$$Q/A = -\lambda dT/dx$$

όπου dT/dx (K/m) είναι η θερμοκρασιακή βαθμίδα στην κατεύθυνση της μετάδοσης θερμότητας, Q (W) είναι η ένταση μετάδοσης θερμότητας (heat transfer rate), A (m^2) είναι το εμβαδό της επιφάνειας διαμέσου της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας, ενώ η σταθερά αναλογίας λ (W/mK) ονομάζεται θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity).

Για μη σταθερή μετάδοση θερμότητας με αγωγή, όπου η θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταβάλλεται με το χρόνο, ισχύει η παρακάτω εξίσωση «θερμικής διάχυσης» (Loveridge, 2012):

$$d^2T / dx^2 = (\rho S_c / \lambda) (dT/dt) = (1/\alpha) (dT/dt)$$

όπου η παράμετρος α (m^2/s) ονομάζεται θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity), η S_c (J/kgK) ειδική θερμοχωρητικότητα (specific heat capacity) και ρ (kg/m^3) είναι η πυκνότητα.

Η θερμική αγωγιμότητα λ (W/mK), η θερμοχωρητικότητα S_c (J/kgK) και η πυκνότητα ρ (kg/m^3) είναι παράμετροι εξαρτημένες από τη θερμοκρασία και συνδέονται με τη θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity) α (m^2/s) στην παρακάτω βασική εξίσωση της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή (Brandl, 2006):

$$\alpha = \lambda / \rho S_c$$

Η θερμική αγωγιμότητα είναι κατά το Brandl (2006) η πιο σημαντική θερμική ιδιότητα του εδάφους, επηρεάζεται έντονα από το ποσοστό υγρασίας και την πυκνότητα του εδάφους και κατ' επέκτασιν από τα ορυκτολογικά συστατικά και τις χημικές ιδιότητες του νερού των πόρων. Επιπλέον η ψύξη (freezing) αυξάνει σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα (Brandl, 2006). Συνεπώς η θερμική αγωγιμότητα των εδαφών μπορεί να προσδιοριστεί μόνο κατά προσέγγιση (Rees et al., 2000, as cited in Brandl, 2006).

Η θερμική διαχυτότητα εκφράζει το βάθος και την ταχύτητα διάχυσης στο έδαφος ενός θερμοκρασιακού κύματος, ενώ η θερμοχωρητικότητα εκφράζει την αποθηκευμένη ποσότητα ενέργειας σε ένα υλικό μέσο ανά μονάδα μάζας ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς (Brandl, 2006).

Πίνακας 4.1: Αντιπαραβολή εξισώσεων ροής θερμότητας με εξισώσεις ροής υπογείου νερού (Loveridge & Powrie, 2013)

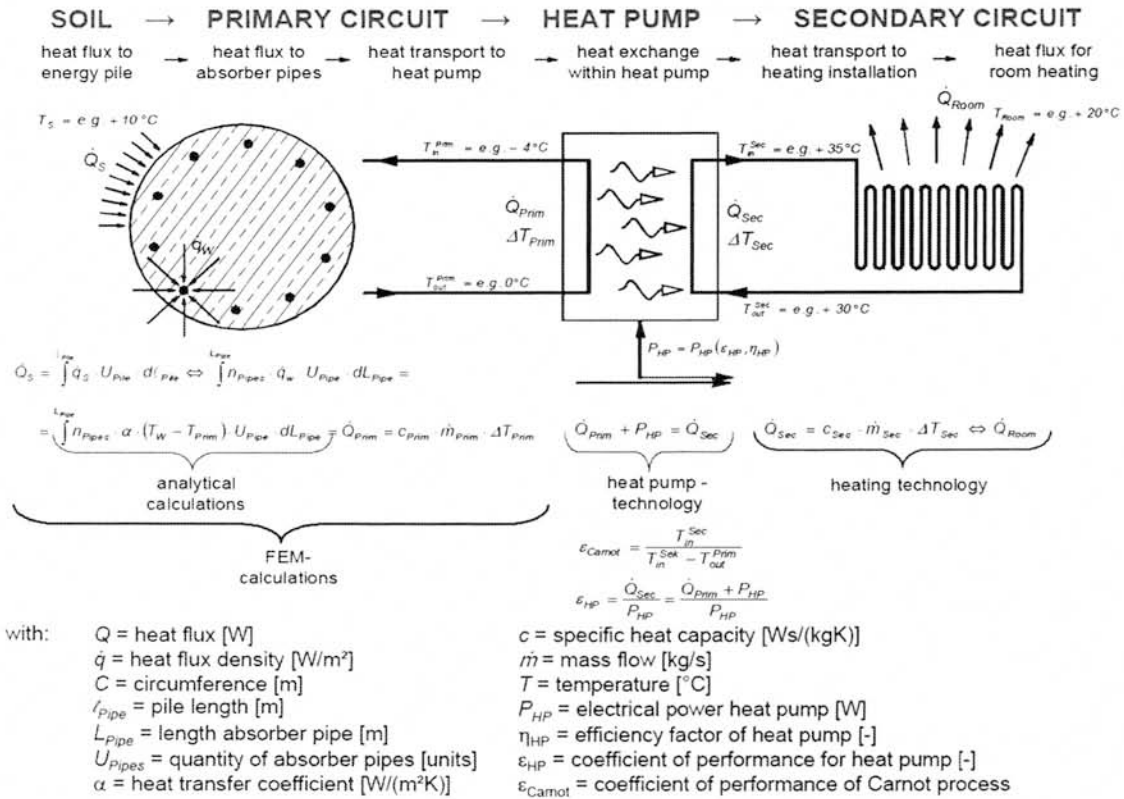
	Heat flow		Groundwater flow		
	Temperature, T		Excess (total) head, h		Excess pore water pressure, u_e
Steady-state flow	$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\Delta T}{L}$ Q	Fourier's law Rate of heat energy transfer: W Thermal conductivity: W/mK	$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta h}{L}$ Q	Darcy's law Rate of groundwater flow: m^3/s Hydraulic conductivity: $\frac{k}{\gamma_w}$ m/s	$v = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{dU_e}{dz}$ u Darcy (superficial) flow velocity: m/s
Transient flow	$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2 T}{dx^2}$ $\alpha = \frac{\lambda}{\rho S_c}$ μS_c	Thermal diffusivity equation Thermal diffusivity: $\frac{m^2}{s}$ Volumetric specific heat capacity: J/m^3K	$\frac{dh}{dt} = \frac{Tg^2 h}{S dx^2}$ $\frac{T}{S} = \frac{kb}{S_1 b} \frac{k}{S_1} = D$ $S_1 = m_v \gamma_w = k / C_v$	Groundwater diffusivity equation: Hydraulic diffusivity: $\frac{m^2}{s}$ Specific storage: This equation	$\frac{dU_e}{dt} = C_v \frac{d^2 U_e}{dx^2}$ $C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$ m_v Note: q is rate of heat transfer per length of heat exchanger
Radial transient flow	$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r_0/4\pi t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$ $\Delta T = \frac{q}{\lambda} \times \frac{1}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{4\pi t}{r^2} \right) - \gamma \right]$	Infinite line source Infinite line source (simplified)	$\Delta h = \frac{Q}{4\pi T} \int_{r_0/4\pi t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$ $\Delta h = \frac{Q}{T} \times \frac{1}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{4Tt}{r^2 S} \right) - \gamma \right]$	Cooper-Jacob approximation	

Note: T = transmissivity; S = storativity; b = aquifer thickness

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή περιγράφεται από το νόμο του Newton για ψύξη (cooling) (Loveridge, 2012):

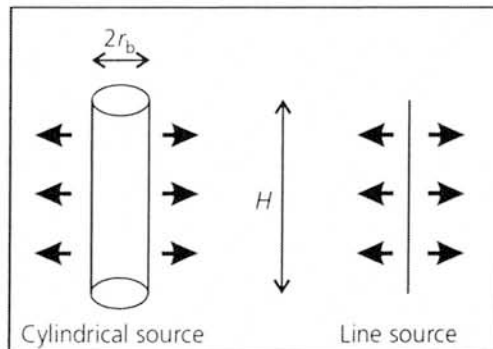
$$Q/A = h(T-T_f)$$

όπου T_f και T είναι οι θερμοκρασίες του ρευστού και της επιφάνειας επί της οποίας ρέει αντίστοιχα και h (W/m^2K) είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, ο οποίος εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού αλλά και της επιφάνειας.



Σχήμα 4.3: Εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας για θέρμανση από το πρωτεύον στο δευτερεύον κύκλωμα διαμέσου της αντλίας θερμότητας (Brandl, 2008)

Για την προσομοίωση της εκπομπής θερμότητας από κατακόρυφους γεωεναλλάκτες, έχουν χρησιμοποιηθεί το μοντέλο γραμμικής εκπομπής (line source) και το μοντέλο κυλινδρικής εκπομπής (cylindrical source) (Μποζής, 2011).



Σχήμα 4.4: Μοντέλα κυλινδρικής και γραμμικής εκπομπής (Loveridge & Powrie, 2012)

Ο συνηθέστερος τρόπος προσδιορισμού των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους και των ενεργειακών πασσάλων είναι οι δοκιμές θερμικής απόκρισης (TRT: thermal response tests) (Brandl, 2006, as cited in Olgun & McCartney, 2014).

Πίνακας 4.2: Δεδομένα και αποτελέσματα δοκιμών θερμικής απόκρισης ενεργειακών πασσάλων (Olgun & McCartney, 2014)

Case	Foundation type	Foundation length/m	Foundation diameter/mm	No. of heat exchanger loops	TRT analysis method	Thermal conductivity/ W mK ⁻¹	Heat exchange rate/W m ⁻¹
Hamada <i>et al.</i> (2007)	26 × D.P.	9	300 (square)	1, 2, indirect/ direct pipe	N/A	N/A	54–69 (ext.)
Ooka <i>et al.</i> (2007)	2 × D.S.	20	1500	8	N/A	N/A	100–120 (rej.) 44–52 (ext.)
Gao <i>et al.</i> (2008)	1 × D.S.	25	600	1–3	Num. method	5.8–6.0	57–108 (rej.)
Lennon <i>et al.</i> (2009)	4 × D.P.	12–17	244 (round), 270 (square)	1	Line source	2.4–2.6	N/A
Brettmann and Amis (2011); Ozudogru <i>et al.</i> (2012)	3 × A.C.I.P.	18.3	300–450	2	Line source	2.5–2.6	73–80 (rej.)
Murphy <i>et al.</i> (2014)	8 × D.S.	15.2	610	1–3	Line source	2.0–2.3	90–139 (rej.)
Loveridge <i>et al.</i> (2014)	3 × A.C.I.P.	18.3	305–457	1–2	Line source G-functions	2.37–3.77	73–80 (rej.)

*D.S.: drilled shaft, D.P.: driven pile; A.C.I.P.: Auger cast in place pile; Rej.: heat rejection into foundation; Ext.: heat extraction from foundation.

4.1.2. Θερμική απόδοση και σχεδιασμός

Αναφορικά με τη θερμική απόδοση των ε.π., ο Μποζής (2011) χρησιμοποιώντας τον όρο «πάσσαλος - γεωεναλλάκτης» (π-γ), αναφέρει ως ακολούθως:

Στη σχετική βιβλιογραφία, η κύρια κατεύθυνση στις διερευνήσεις θερμικής απόδοσης των π-γ βασίζεται στις αντίστοιχες αναλύσεις για τις κατακόρυφες γεωτρήσεις (vertical boreholes). Ωστόσο, υπάρχουν αντιρρήσεις ως προς την ακρίβεια και εγκυρότητα των διερευνήσεων αυτών, καθώς ενώ υποθέτουν συνθήκες θερμικά σταθερής κατάστασης στο εσωτερικό του πασσάλου, εντούτοις στους π-γ θερμικά σταθερή κατάσταση πρακτικά δεν υπάρχει ποτέ. Αυτό συμβαίνει επειδή το φαινόμενο της διάχυσης της θερμότητας στο εσωτερικό των πασσάλων είναι σημαντικό, λόγω των σημαντικά μεγαλύτερων διαμέτρων των π-γ από αυτές των κατακόρυφων γεωτρήσεων. Σύμφωνα με τη θεωρία των κατακόρυφων βρόχων γεωτρήσεων (Eskilson, 1987; Hellström, 1991, οπ. αναφ. στο Μποζή, 2011), η θερμοκρασία του ρευστού στους σωλήνες του πρωτεύοντος δικτύου καθορίζεται από 2 ομάδες παραγόντων. Η 1^η ομάδα η οποία καθορίζει το επίπεδο θερμοκρασιών γύρω από κάθε γεώτρηση, αμέσως έξω από την περίμετρό της, σχετίζεται αφενός με τη

θερμότητα του θερμικά αδιατάρακτου εδάφους, τις θερμικές του ιδιότητες, το ιστορικό της φόρτισης και αποφόρτισης του και αφετέρου με τη γεωμετρία του πεδίου γεωτρήσεων, με τις αποστάσεις δηλαδή μεταξύ των γειτονικών γεωτρήσεων. Η 2^η ομάδα η οποία καθορίζει το επίπεδο θερμοκρασιών μέσα από την περίμετρό της, σχετίζεται με τις παραμέτρους σχεδιασμού της γεώτρησης, οι οποίες είναι η διάμετρος της, ο αριθμός, η διάμετρος, το πάχος των τοιχωμάτων και η διάταξη των σωλήνων, οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας του υλικού των σωλήνων και του υλικού πλήρωσης της γεώτρησης και οι συνθήκες ροής του ρευστού στις σωληνώσεις. Οι έρευνες για τη βελτίωση της απόδοσης των κατακόρυφων γεωτρήσεων σχετίζονται με τη 2^η ομάδα των παραμέτρων σχεδιασμού της, ενώ το μέγεθος που συγκρίνεται για την εκτίμηση της αποδοτικότητας κάθε διαφορετικής σχεδίασης είναι η θερμική αντίσταση (borehole thermal resistance R_b) μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες και της περιμέτρου της γεώτρησης υπό θερμοροή σταθερής έντασης, η οποία είναι ο λόγος της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες και της περιμέτρου της γεώτρησης, προς τη ένταση της θερμοροής. Αντίστοιχα, η θερμική αντίσταση π-γ (heat exchanger pile thermal resistance R_b) (Brandl, 2006; Fromentin & Pahud, 1997; Nagano et al., 2006; οπ. αναφ. στο Μποζή, 2011) έχει προταθεί ως χαρακτηριστικό μέγεθος για τη σύγκριση της αποδοτικότητας διαφορετικών σχεδιάσεων, και εκφράζει το βαθμό ευκολίας με τον οποίο η θερμότητα μεταφέρεται από το ρευστό στους σωλήνες στην επιφάνεια επαφής του πασσάλου με το έδαφος.

Πίνακας 4.3: Τιμές θερμικών αντιστάσεων για διαφορετικές σχεδιάσεις π-γ (Μποζής, 2011):

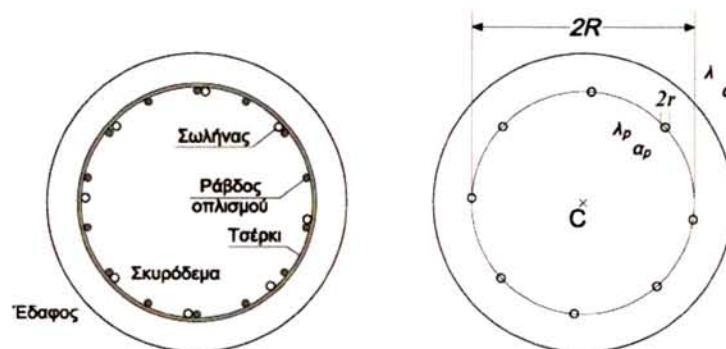
Θερμικές Αντιστάσεις Πασσάλων – Γεωεναλλακτών	
0,15 K/(Wm)	κοίλος προκατασκευασμένος πάσσαλος με 2 U Tubes. Διάμετρος πασσάλου 30 έως 50 cm.
0,10 – 0,11 K/(Wm)	προκατασκευασμένος ή έγχυτος επί τόπου πάσσαλος με 2 U Tubes δεμένα στον κλωβό οπλισμού. Διάμετρος πασσάλου 30 έως 150 cm.
0,07 – 0,08 K/(Wm)	προκατασκευασμένος ή έγχυτος επί τόπου πάσσαλος με 3 U Tubes δεμένα στον κλωβό οπλισμού. Διάμετρος πασσάλου 30 έως 150 cm.
0,06 K/(Wm)	προκατασκευασμένος ή έγχυτος επί τόπου πάσσαλος με 4 U Tubes δεμένα στον κλωβό οπλισμού. Διάμετρος πασσάλου 30 έως 150 cm.

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται σχετικά πολύπλοκες ημιαναλυτικές ή αριθμητικές μέθοδοι και συνεπώς οι συγκρίσεις εναλλακτικών σχεδιάσεων π-γ με βάση τη θερμική τους αντίσταση απαιτούν την εφαρμογή ειδικού

λογισμικού ή τη χρήση πινάκων με τιμές της αντίστασης, υπολογισμένων με την εφαρμογή του λογισμικού αυτού.

Οι παράμετροι θερμικού σχεδιασμού π-γ που διερευνάται η επίδρασή τους στη θερμική απόδοσή του είναι:

- η ακτίνα εκπομπής θερμότητας, η οποία είναι η ακτίνα της περιμέτρου των σωλήνων στη διατομή του πασσάλου και καθορίζεται από τη διάμετρο του, καθώς οι σωλήνες συνδέονται στον κλωβό οπλισμού του,

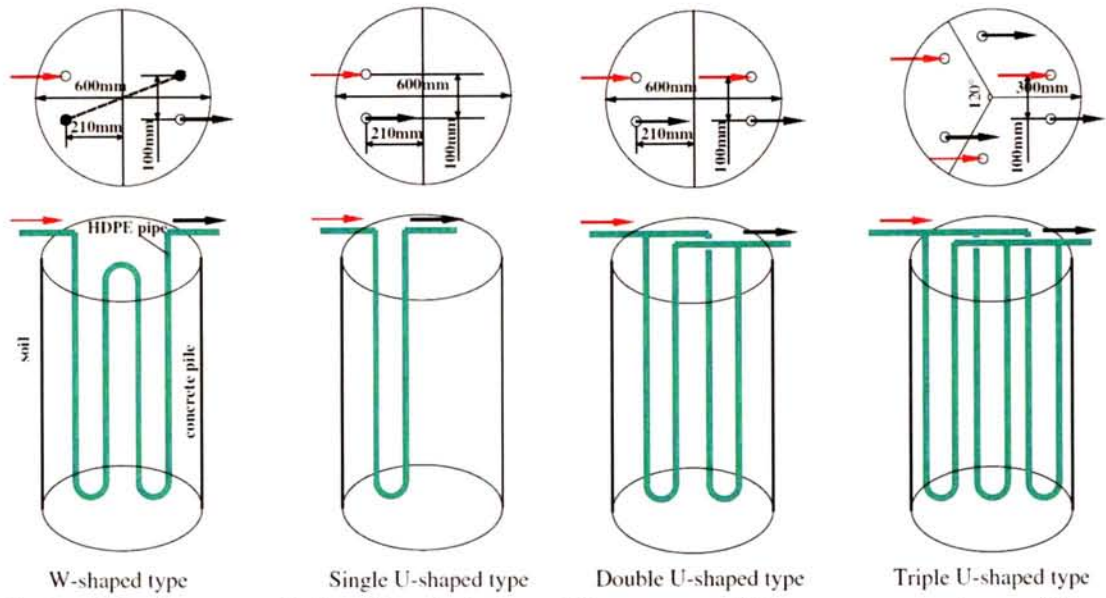


Εγκάρσια τομή

Σχήμα 4.5: Εγκάρσια τομή ενεργειακού πασσάλου και ακτίνα εκπομπής θερμότητας R (Μποζής, 2011)

- ο αριθμός των ζευγών σωλήνων (U-tubes),
- οι διαστάσεις των σωλήνων, δηλαδή η διάμετρος και το πάχος των τοιχωμάτων τους,
- ο τύπος των σωλήνων,
- η διάταξη των σωλήνων (σε σχήμα U, W ή σπείρας),
- η σύσταση (θερμοφυσικές ιδιότητες) και οι συνθήκες ροής (στρωτή, τυρβώδης) του ρευστού στους σωλήνες.

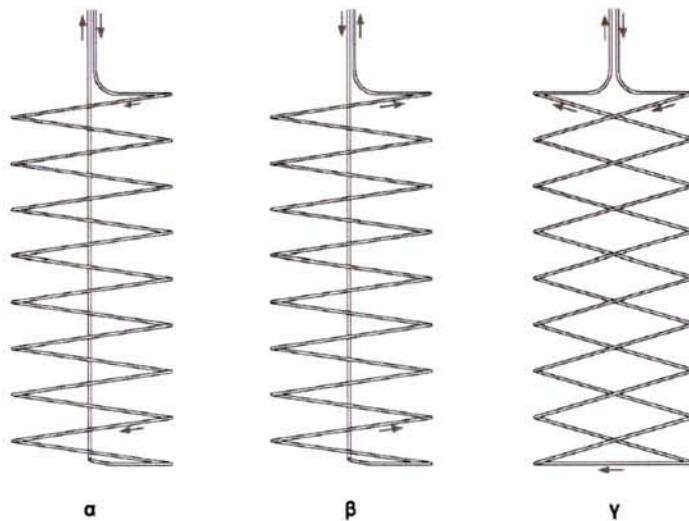
Πέρα από τις παραπάνω παραμέτρους σχεδιασμού του γεωεναλλάκτη, διερευνήθηκε η επίδραση που έχει στη θερμική απόδοση του π-γ το μήκος του, καθώς και το περιβάλλον έδαφος με τις αντίστοιχες θερμοφυσικές του ιδιότητες.



Σχήμα 4.6: Διαφορετικές διατάξεις βρόχων σωλήνων γεωεναλλάκτη ενεργειακού πασσάλου (Gao et al., 2008)



Σχήμα 4.7: Φωτογραφία κλωβού οπλισμού ενεργειακού πασσάλου με ενσωματωμένους βρόχους σωλήνων (Zarrella et al., 2013)



Σχήμα 4.8: Εναλλακτικές διατάξεις σωλήνων σε σχήμα σπείρας (Μποζής, 2011)



Σχήμα 4.9: Φωτογραφία κλωβού οπλισμού ενεργειακού πασσάλου με ενσωματωμένους σωλήνες σε σχήμα σπείρας (Zarella et al., 2013)

Ο Μποζής (2011) ανέπτυξε μια μεθοδολογία για τη συγκριτική αποτίμηση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων π-γ ως προς τη θερμική τους απόδοση, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης γραμμικής εκπομπής απείρου μήκους για σταθερή θερμική εκπομπή και λόγω των απλών σχέσεων που αναπτύχθηκαν, είναι εύκολα εφαρμοσίμη στο αρχικό στάδιο λήψης αποφάσεων για τις βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους των π-γ, χωρίς να απαιτείται η χρήση πολύπλοκου λογισμικού και πριν από την αναλυτική προσομοίωση των συστημάτων. Η μεθοδολογία βασίζεται στη διαπίστωση ότι η τάξη μεγέθους τιμών των θερμικών ιδιοτήτων του σώματος πασσάλου οπλισμένου σκυροδέματος είναι ίδια με αυτή των εδαφών στα οποία αυτοί κατασκευάζονται.

Πίνακας 4.4: Εύρος θερμικών ιδιοτήτων σώματος πασσάλων και των εδαφών στα οποία κατασκευάζονται (Μποζής, 2011)

	Πυκνότητα (ρ - kg/m^3)	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ - W/mK)	Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας ($\alpha \times 10^{-6}$ m^2/s)
Έδαφος	1100 – 2000	1,2 – 2,5	0,50 – 1,10
Σώμα Πασσάλων	2000 – 2500	1,5 – 2,5	0,60 – 1,40

Θεωρώντας λοιπόν ότι το μέσο πάσσαλος - έδαφος είναι θερμικά ομογενές μέσο, προτείνεται να συγκρίνονται μεταξύ τους οι θερμοκρασίες ρευστού στους σωλήνες πασσάλων απείρου μήκους για διαφορετικές σχεδιαστικές λύσεις, υπό την ίδια

σταθερή και συνεχή στο χρόνο γραμμική ένταση εκπομπής θερμότητας στον πάσσαλο. Έχοντας ως δεδομένο ότι για σταθερή στο χρόνο ένταση εκπομπής θερμότητας, η θερμοκρασία στο κέντρο ενός πασσάλου δεδομένης διαμέτρου είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους σχεδιασμού του γεωεναλλάκτη, αναπτύχθηκαν σχέσεις για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες και του άξονα του πασσάλου για διαφορετικές σχεδιαστικές διατάξεις. Ο λόγος της θερμοκρασιακής αυτής διαφοράς προς τη θερμορροή, αποτελεί το μέγεθος που συγκρίνεται για την αποτίμηση των εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού για πασσάλους - γεωεναλλάκτες ίδιας διαμέτρου και η απόδοση για την ίδια τιμή θερμορροής αυξάνεται όσο αυτή η διαφορά μειώνεται. Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στην απόδοση του γεωεναλλάκτη:

1. Η ικανότητα των π-γ να εκπέμπουν ή να απορροφούν θερμότητα είναι μεγαλύτερη σε πασσάλους μεγαλύτερης διαμέτρου.

2. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες και του άξονα του πασσάλου, ύστερα από την παρέλευση σύντομου χρονικού διαστήματος παραμένει σταθερή και η τιμή της καθορίζεται από τις παραμέτρους σχεδιασμού του π-γ.

3. Η αύξηση των αριθμών των U-tubes είναι ο κύριος μοχλός για τη δραστική μείωση των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες και του άξονα του πασσάλου και άρα την αύξηση της απόδοσης.

4. Όταν δεν είναι δυνατή η αύξηση του αριθμού των U-tubes, τότε η αύξηση της διαμέτρου και η μείωση του πάχους των σωλήνων, καθώς και η ανάπτυξη τυρβώδους ροής στο εσωτερικό τους, αποτελούν εργαλεία για τη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ρευστού και άξονα πασσάλου.

Αναφορικά με την επίδραση του μήκους στην απόδοση του π-γ, σημειώνεται ότι η ανάλυση που έγινε βασίστηκε επίσης στην θεώρηση του θερμικά εννιαίου μέσου πάσσαλος - έδαφος και διαπιστώθηκε ότι μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος από την έναρξη της εκπομπής, η μετάδοση θερμότητας στους π-γ εξελίσσεται καθαρά στις 3 διαστάσεις. Από τη σύγκριση των αποδόσεων πασσάλων - γεωεναλλακτών με διαφορετικά μήκη, τα συμπεράσματα της ανάλυσης είναι τα εξής:

1. Οι κατά μήκος του π-γ αναπτυχθείσες διαφορές θερμοκρασίας είναι σημαντικές στα άκρα του, όπου η μετάδοση θερμότητας είναι εντονότερη, επειδή εξελίσσεται σε 3 διαστάσεις.

2. Οι μικρού μήκους π-γ μπορούν να δεχτούν σημαντικά μεγαλύτερες ανηγμένες στο μήκος φορτίσεις μεγάλης διάρκειας από τους μεγάλου μήκους και συνεπώς, στις περιπτώσεις που υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των απαιτήσεων σε θέρμανση και σε ψύξη, οι πάσσαλοι μικρού μήκους έχουν καλύτερη θερμική συμπεριφορά από τους μεγάλου μήκους.

Από τη διερεύνηση για τη θερμική συμπεριφορά π-γ όταν οι θερμικές ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος του σώματός τους και του περιβάλλοντος εδάφους διαφέρουν, συμπεράνθηκε ότι στις φορτίσεις μικρής διάρκειας η θερμική συμπεριφορά του π-γ καθορίζεται από τις θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος, ενώ στις φορτίσεις μεγάλης διάρκειας από τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

Όσον αφορά τη διάταξη των σωληνώσεων σε σπείρα, ενώ δε διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στις θερμοκρασίες του ρευστού στους σωλήνες σε σχέση με τη διάταξη των κατακόρυφων βρόγχων, το πλεονέκτημα που έχει σε σχέση με τη διάταξη των πολλαπλών βρόγχων, σχετίζεται με τη δυνατότητα ευκολότερης πύκνωσης ή αραίωσης των σωλήνων κατά μήκος του π-γ.

4.1.3. Πεδία μελλοντικής έρευνας θερμικής συμπεριφοράς ενεργειακών πασσάλων

Ο Μποζής (2011) αναφέρει τα εξής ζητήματα που απαιτούν διερεύνηση:

- Η επίδραση της κίνησης των υπόγειων νερών στη θερμική συμπεριφορά των π-γ.

- Η θερμική συμπεριφορά π-γ υπό σταθερή φόρτιση, όταν οι θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του εδάφους διαφέρουν.

- Η θερμική συμπεριφορά ομάδας π-γ, η αλληλεπίδραση δηλαδή των π-γ μεταξύ τους.

Όπως σημειώνουν οι Loveridge & Powrie (2014, as cited in Olgun & McCartney, 2014), περαιτέρω έρευνα απαιτείται για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων θερμικού σχεδιασμού των ε.π. προκειμένου να αυξηθεί η μεταφορά θερμότητας.

Οι Olgun & McCartney (2014) επισημαίνουν τα παρακάτω ζητήματα προς διερεύνηση:

- Αναφορικά με το θερμικό σχεδιασμό των ε.π., διερευνάται η ενσωμάτωση της θερμικής απόκρισης των ε.π. σε ήδη διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού γ.α.θ. (GSHP design tools), ενώ απαιτείται διερεύνηση για την ενσωμάτωση της θερμικής αγωγιμότητας, των χαρακτηριστικών θερμικής αποθήκευσης και της γεωμετρίας των ε.π. σε μοντέλα αλληλεπίδρασης ανωδομής - θεμελίωσης (building system - foundation interaction models), όπως το EnergyPlus.

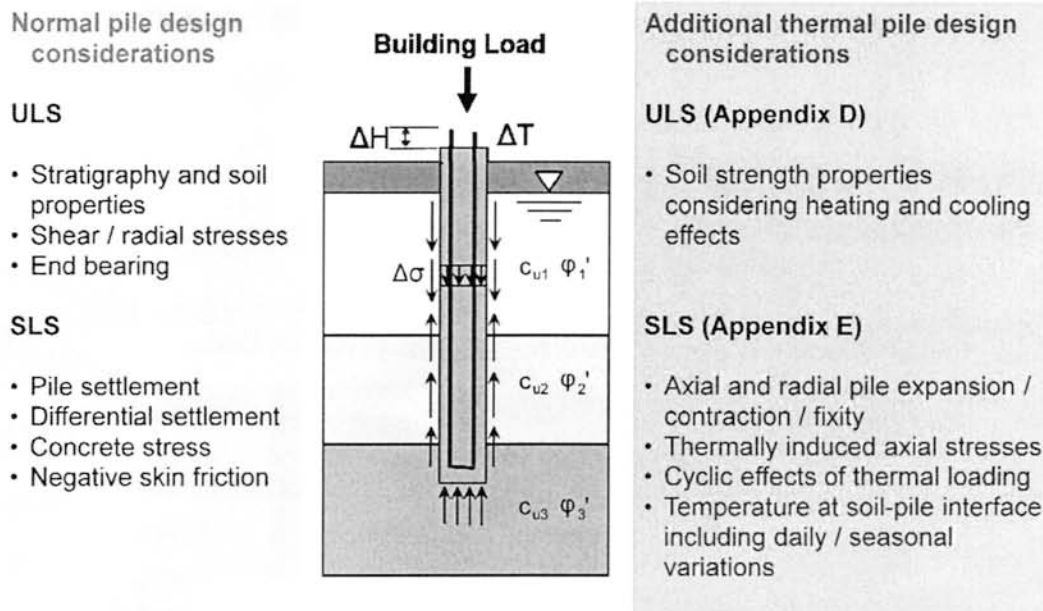
- Ζητήματα ανθεκτικότητας και κατασκευαστικότητας (constructability) των σωλήνων ανταλλαγής θερμότητας επιδέχονται βελτίωση, όπως οι συνδέσεις και η εγκατάστασή τους, η ακτίνα καμπυλότητας των βρόχων, το κόστος, η αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας καθώς και η ενσωμάτωση γραφίτη στο μίγμα πολυμερών κατά την κατασκευή τους.

- Πολλές περιοχές παγκοσμίως έχουν αυξημένες ανάγκες σε δροσισμό, οι οποίες μπορεί να έχουν επιπτώσεις στη μακροπρόθεσμη απόδοση και τη βιωσιμότητα των ε.π.. Η εποπτεία μέσω οργανομετρήσεων (monitoring) μπορεί να βοηθήσει στην αποτίμηση του προβλήματος αλλά και στον έλεγχο και βελτιστοποίηση των προσεγγίσεων του θερμικού σχεδιασμού των ε.π..

Πέρα από τις προτάσεις των ερευνητών προτείνεται επίσης η εκπόνηση βιβλιογραφικής επισκόπησης με εμβάθυνση στη θερμική συμπεριφορά των ε.π..

4.2. Θερμομηχανική συμπεριφορά ενεργειακών πασσάλων

Όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα, για τον κατάλληλο γεωτεχνικό σχεδιασμό των ενεργειακών πασσάλων απαιτείται η εκτίμηση των επιπτώσεων της θερμικής και θερμομηχανικής φόρτισης στη μηχανική απόκριση του πασσάλου και του εδάφους, καθώς και στη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας.



Σχήμα 4.10: Επιπλέον εκτιμήσεις για το γεωτεχνικό σχεδιασμό των ενεργειακών πασσάλων για οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας SLS (Serviceability Limit State) και αστοχίας ULS (Ultimate Limit State) (GSHPA, 2012)

4.2.1. Επίδραση θερμικής φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων και την αλληλεπίδρασή τους με το έδαφος

4.2.1.1. Πειράματικά δεδομένα

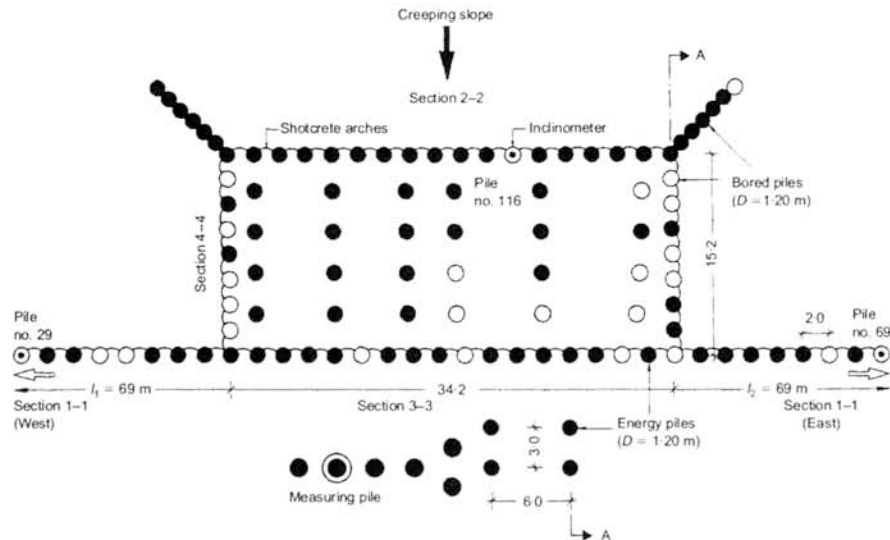
Στη σχετική βιβλιογραφία γίνεται χρήση δύο ειδών πειραμάτων:

1. δοκιμές πλήρους κλίμακας ή πεδίου (full scale ή field ή in situ tests)
2. εργαστηριακές δοκιμές ή δοκιμές φυγοκέντρωσης ή μικρής κλίμακας (laboratory ή centrifuge ή small-scale tests ή physical modeling)

Δοκιμές πεδίου

Αν και η κατασκευή ενεργειακών πασσάλων ξεκίνησε από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, τα πρώτα αποτελέσματα πειραμάτων με αντικείμενο την επίδραση της θερμικής φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά των ε.π. δημοσιεύθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990.

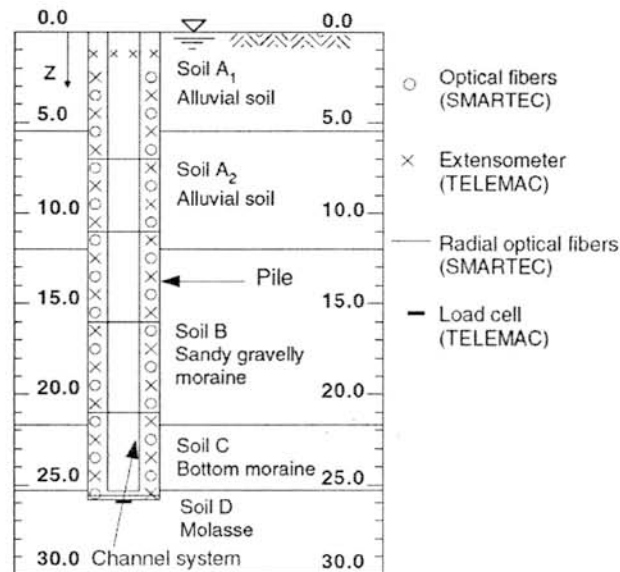
Ο Brandl (1998, 2006, 2013) δημοσίευσε τα αποτελέσματα της απόκρισης σε θέρμανση και ψύξη ενός ε.π. από τη θεμελίωση ενός κτιρίου κέντρου αποκαταστασης στο Bad Schallerbach, Austria.



Σχήμα 4.11: Κάτοψη και δοκιμαστικός πάσσαλος (measuring pile) στο Rehabilitation Centre, Bad Schallerbach, Austria (Brandl, 2006)

Η θεμελίωση του κτιρίου κατασκευάστηκε τα έτη 1994-1995 και από τους 175 πασσάλους της θεμελίωσης του κτιρίου οι 143 είναι ενεργειακοί και αξιοποιούνται για τη θέρμανση και το δροσισμό του κτιρίου. Σημειώνει ότι το σύστημα των ε.π. βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία από το 1997 και μέχρι το 2013 δεν είχε παρουσιάσει κανένα πρόβλημα. Ένας εξ αυτών εξοπλίστηκε με όργανα μέτρησης και καταγράφηκε η αποκρίσή του κατά την κατασκευή της θεμελίωσης και του κτιρίου, καθώς και κατά τη λειτουργία του συστήματος γ.α.θ. του κτιρίου. Η καταγραφή της απόκρισης του πασσάλου έγινε με σκοπό τη διερεύνηση των επιδράσεων των θερμοκρασιακών αλλαγών στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου και ειδικότερα στην αντίσταση πλευρικής τριβής (shaft resistance) του κατά την ενυδάτωση (concrete hydration) και την επακόλουθη εξαγωγή ενέργειας. Διαπιστώθηκε ότι η σωστή λειτουργία του συστήματος δεν επηρέασε την αντίσταση πλευρικής τριβής του πασσάλου. Συμπεραίνει επίσης, βασισμένος σε μετρήσεις από εφαρμογές ε.π. και διαφραγματικών τοίχων από το 1994 και ύστερα, ότι η αντίσταση τριβής και η αντίσταση αιχμής των κατασκευών αυτών δεν επηρεάζονται από την ανταλλαγή θερμότητας στατιστικά συνήθους εύρους τιμών και ότι συνεπώς η θερμικά επαγόμενη καθίζηση ή ανύψωση των κτιρίων είναι αμελητέα σε σχέση με τις μετακινήσεις που προκαλούνται από τα στατικά φορτία. Ωστόσο τονίζεται ότι η έκθεση της επιφάνειας των ε.π. σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός θα πρέπει να αποφεύγεται.

Οι Laloui et al. (1999, 2006) επέβαλλαν θερμικά φορτία σε έναν ε.π. κατά την κατασκευή ενός τετραόροφου κτιρίου στο EPFL (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne), Lausanne, Switzerland.

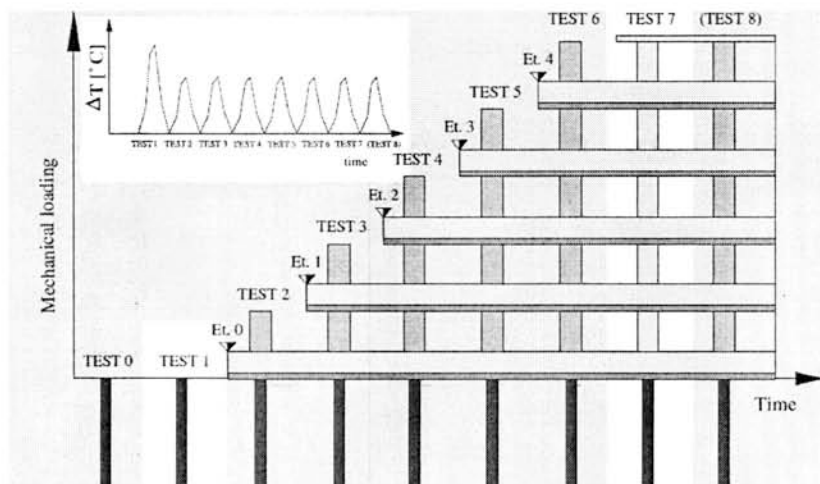


Σχήμα 4.12: Δοκιμαστικός πάσσαλος πειράματος EPFL, Lausanne, Switzerland (Laloui et al., 2006)

Στο πρώτο πείραμα, οι Laloui et al. (1999) υπέβαλλαν σε θέρμανση τον ε.π. πριν και μετά την κατασκευή του πρώτου ορόφου του κτιρίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του πασσάλου προκάλεσε αφενός την ανάπτυξη πλευρικής τριβής και αφετέρου επιπλέον θερμική θλιπτική τάση στον πάσσαλο μεγαλύτερη της θλιπτικής τάσης που προκλήθηκε από το στατικό μηχανικό φορτίο του κτιρίου, τα οποία αποτελέσματα, όπως σημειώνεται, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό ενός ε.π.. Επισημαίνεται επίσης, ότι τα θερμικά φορτία δεν αποτέλεσαν κίνδυνο για την ακεραιότητα του πασσάλου και του κτιρίου.

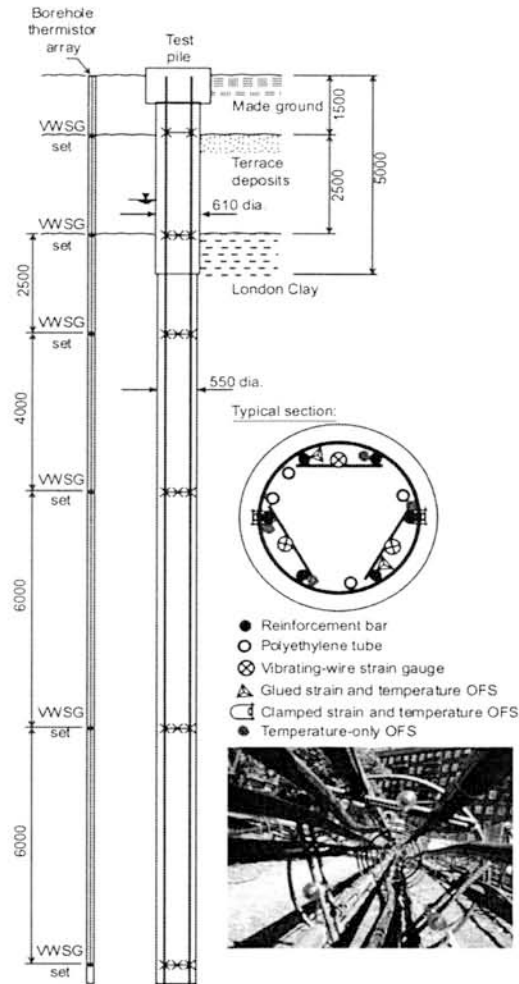
Εν συνεχεία, ο πάσσαλος υπεβλήθη σε θέρμανση κατά την κατασκευή των υπολοίπων ορόφων του τετραόροφου κτιρίου (Laloui et al., 2006; Laloui & Nuth, 2009). Οι τροπές που παρατηρήθηκαν ήταν θερμοελαστικής φύσεως και το μέγεθός τους εξαρτημένο από τον τύπο του εδάφους. Το μέγεθος του θερμικά επαγόμενου αξονικού φορτίου ήταν σχετικά μεγάλο και οι θερμικές αξονικές τάσεις στην αιχμή του πασσάλου ήταν μεγαλύτερες από τις σχεδόν μηδενικές τάσεις λόγω του ίδιου βάρους (dead weight) του κτιρίου, το οποίο επηρέασε κυρίως την κεφαλή του πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ομοιόμορφη κατανομή των θερμικών επιπτώσεων στον πάσσαλο. Παρατηρήθηκε επίσης ενίσχυση (relief) στην ανάπτυξη

πλευρικής τριβής κατά τη θέρμανση του πασσάλου και συμπεράνθηκε ότι οι αντίθετες κατευθύνσεις της ανοδικής θερμικά επαγόμενης μετακίνησης και της καθοδικής μετακίνησης λόγω μηχανικού φορτίου δρουν έτσι ώστε η αντίσταση τριβής να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Τονίζεται δε, ότι σε κάθε περίπτωση θα πρέπει μέσω συνεχούς επιτήρησης και συστημάτων ελέγχου να αποφεύγεται το πάγωμα των πασσάλων, ώστε να αποτραπούν βλάβες λόγω τήξης του πάγου.



Σχήμα 4.13: Ιστορικό θερμομηχανικής φόρτισης πασσάλου πειράματος EPFL, Lausanne, Switzerland (Laloui et al., 2006)

Οι Bourne-Webb et al. (2009) υπέβαλλαν σε ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση ψύξης - θέρμανσης καθώς και σε μηχανική φόρτιση ένα δοκιμαστικό πάσσαλο από τη θεμελίωση 143^{ov} ε.π. ενός κτιρίου προς κατασκευή στο Lambeth College, London, UK. Τα αποτελέσματα του πειράματος συγκρίθηκαν με αυτά του πειράματος των Laloui et al. (2006) και με βάση τα δεδομένα αυτά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμικά αποκρινόμενη κατανομή αξονικού φορτίου του ε.π. εξαρτάται από το βαθμό συγκράτησης της κίνησης των άκρων (end restraint) του πασσάλου καθώς και από τα υλικά της θεμελίωσης. Συγκεκριμένα στο πείραμα του Lambeth College, η συγκράτηση κίνησης των άκρων του πασσάλου ήταν έντονη και η αύξηση του αξονικού φορτίου ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος του πασσάλου, ενώ στο πείραμα της Lausanne ήταν μερικώς συγκρατημένη και η αύξηση του αξονικού φορτίου ανομοιόμορφη. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο βαθμός συγκράτησης της κεφαλής των πασσάλων μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικός των συνθηκών λειτουργίας ενός συστήματος γ.α.θ..

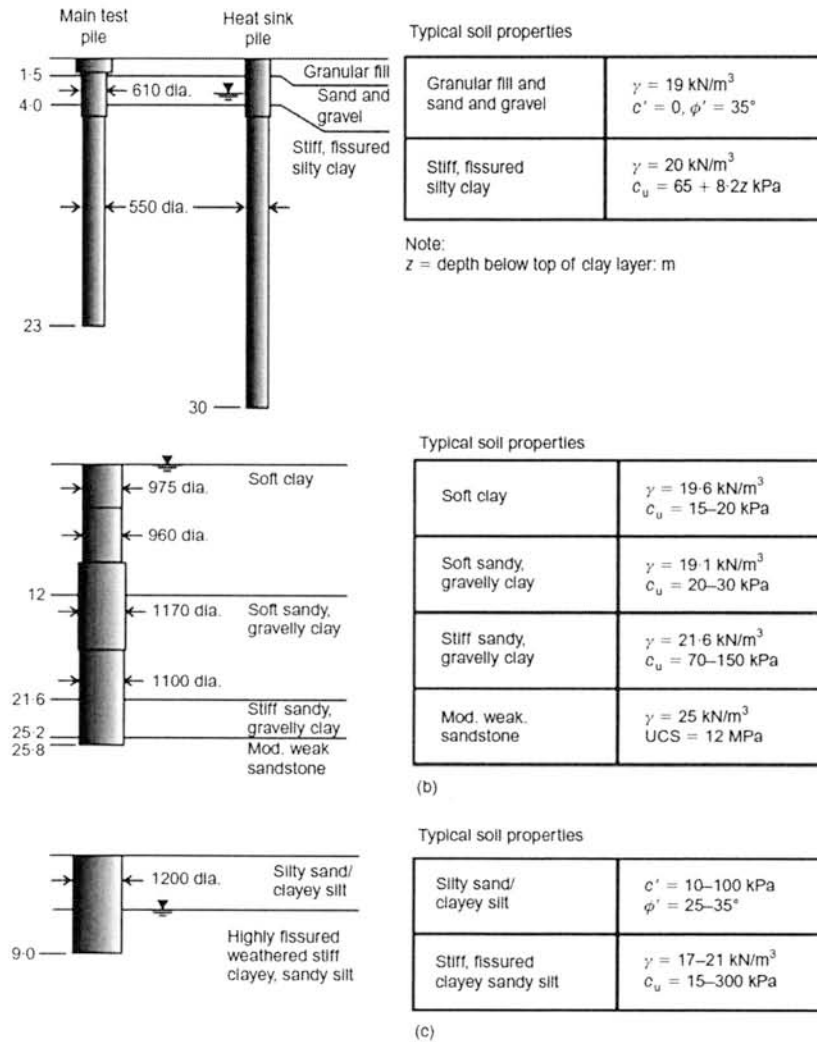


Σχήμα 4.14: Δοκιμαστικός πάσσαλος πειράματος Lambeth College, London, UK (Bourne-Webb et al., 2009)

Οι εφελκυστικές δυνάμεις στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου, που αναπτύχθηκαν λόγω συστολής του πασσάλου κατά την επιβολή έντονης ψύξης, εκτιμάται ότι δε θα οδηγούσαν σε θρυματισμό του σκυροδέματος αν δεν ήταν οπλισμένος και συστήνεται ότι δεν είναι απαραίτητος ο οπλισμός του πασσάλου σε όλο του το μήκος. Σημειώνεται ότι δεν ήταν δυνατόν να αποφανθούν για το αν η ολική (ultimate) αντίσταση του πασσάλου επηρεάστηκε από τους θερμικούς κύκλους φόρτισης. Τονίζεται εντούτοις, ότι τα επίπεδα των θερμοκρασιακών μεταβολών κάτω από τα οποία διεξήχθη το πείραμα είναι εκτός του εύρους των θερμοκρασιακών μεταβολών λειτουργίας ενός συστήματος γ.α.θ. και έτσι ο κίνδυνος για τη γεωτεχνική επάρκεια του πασσάλου στη δεύτερη περίπτωση είναι μικρότερος.

Οι Amatya et al. (2012) παραθέτουν δεδομένα από τα 3 προαναφερθέντα πειράματα ως ακολούθως:

Κεφάλαιο 4^ο : Συμπεριφορά και σχεδιασμός των ενεργειακών πασσάλων



Σχήμα 4.15: Προφίλ εδαφών και γεωμετρία πασσάλων για τα πειράματα σε: (a) Lambeth College, London, UK, (b) EPFL, Lausanne, Switzerland, (c) Bad Schallerbach, Austria (Amatya et al., 2012)

Πίνακας 4.5: Σύνοψη των δεδομένων από τα πειράματα σε Lambeth College, London, UK, EPFL, Lausanne, Switzerland και Bad Schallerbach, Austria (Amatya et al., 2012)

Parameters	London, UK		Lausanne, Switzerland	Bad Schallerbach, Austria
	Main test pile	Heat sink pile		
Pile length: m	23	30	25.8	9.0
Pile diameter: m	0.55-0.61		0.96-1.17	1.2
Concrete stiffness: GPa	40		29.2	30-40
Coefficient of thermal expansion: $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	8.5		10	10
Foundation type	Single pile		Piled raft	Piled raft
Source of imposed load	Load frame	None	Building	Building
Imposed mechanical load: kN	1200	Zero	T-1: zero T-6: 1183 T-7: 1088	500-900
Adjacent piles	None		Load only	Load and energy
Soil on shaft	Sand and gravel/stiff clay		Soft clay/stiff till	Clayey-sandy silt
Soil/rock at toe	Stiff clay		Sandstone	Clayey-sandy silt

Πίνακας 4.6: Σύνοψη των αποτελεσμάτων από τα πειράματα σε Lambeth College, London, UK, EPFL, Lausanne, Switzerland και Bad Schallerbach, Austria (Amatya et al., 2012)

	Location					Bad Schallerbach	
	London	Lausanne	London		Lausanne		
Test ID	Heat sink pile	T-1	Main test pile		T-6	T-7	–
Thermal phase ΔT : °C	Heating 29.4	Heating 20.9	Cooling –20	Heating 10	Heating 18		Mixed +7 to –14
Max. thermal axial load: kN	–1550	–2150	670	–675	–3060	–2830	–300
Depth to point of max. thermal load: m	17	About 20	15	6	12.5	12.5	4.5
Max. thermally induced stress change: kPa/°C	–192	–104	177	–329	–153		*
Induced thermal stress at head: kPa/°C	~0	–50	~0	~0	–150		–27*
Induced thermal stress at toe: kPa/°C	~0	–87	~0	~0	–79		*
Thermally induced shaft resistance: kPa/°C	–2.1 (upper 17 m) 2.5 (lower 13 m)	–1.5 (soft clay) –0.5 (soft till) 0.9 (stiff till)	2.1 (6–15 m) –4.0 (20–22.5 m)	–5.9 (0–6 m) 1.5 (6–15 m) 5.4 (15–22.5 m)	–2.5 (soft clay) 0.5 (soft till) 5 (stiff till)		2.7* (4.5–6.5 m section)

Note: Compression negative; bgl = below ground level

* Indicative, or not possible to assess owing to non-uniform temperature profile

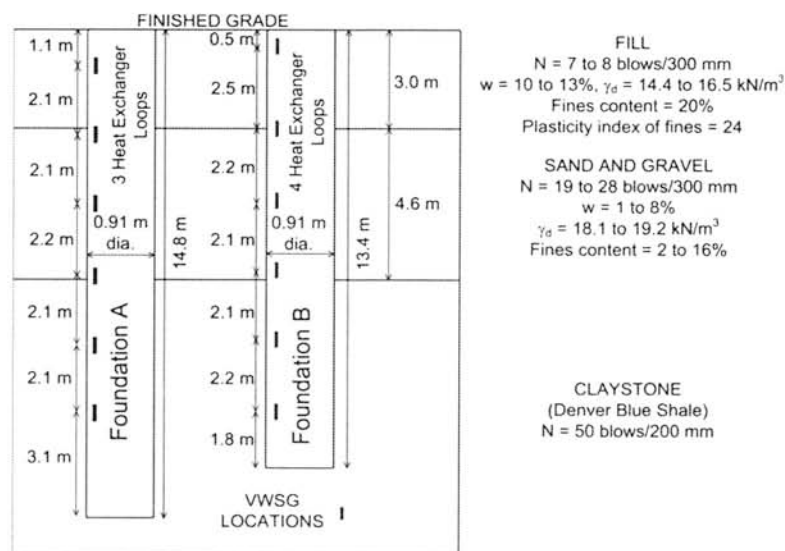
Παρατηρούν ότι οι διαφορές στο αποτελέσματα των πειραμάτων αποδίδονται κυρίως στις διαφορές στις εδαφικές συνθήκες, το βαθμό συγκράτησης των άκρων των πασσάλων και το μέγεθος των θερμικών φορτίων. Ενώ αναγνωρίζεται ότι τα πειραματικά αυτά δεδομένα παρέχουν καλή επίγνωση της συμπεριφοράς των ε.π., ωστόσο επισημαίνονται ελλείψεις και περιορισμοί στα δεδομένα των 3^{ων} αυτών πειραμάτων. Συγκεκριμένα, αναφορικά με τη δοκιμή του Lambeth College (Bourne-Webb et al., 2009) αναφέρεται ότι διεξήχθη σε περιορισμένο χρονικό πλαίσιο σε έναν εν εξελίξει τόπο κατασκευής και χρησιμοποιήθηκαν ακραίοι θερμοκρασιακοί κύκλοι φόρτισης. Όσον αφορά τη δοκιμή της Lausanne (Laloui et al., 2006), παρατηρείται ότι συμπεριέλαβε μονάχα θέρμανση (και όχι ψύξη) και ότι ο δοκιμαστικός ε.π. βρισκόταν ανάμεσα σε άλλους απλούς πασσάλους θεμελίωσης. Σχετικά με τη δοκιμή στο Bad Schallerbach, σχολιάζεται ότι αν και κράτησε περισσότερο από ένα χρόνο ως τμήμα ενός συστήματος γ.α.θ. σε λειτουργία, τα δεδομένα που έχουν δημοσιευθεί γι' αυτήν είναι περιορισμένα.

Οι Wang et al. (2013) διερεύνησαν το αντίκτυπο συνδυασμένης θερμομηχανικής φόρτισης στη φέρουσα ικανότητα ενός ε.π. στο Monash University, Melbourne, Victoria, Australia. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι η αντίσταση πλευρικής τριβής αυξήθηκε κατά τη θέρμανση του πασσάλου, ενώ επέστρεψε στα

αρχικά της επίπεδα μετά την ψύξη του πασσάλου που ακολούθησε, χωρίς να μειωθεί από την αρχική της τιμή μετά από το πέρας των θερμικών φορτίσεων.

Οι Singh et al. (2015) υπέβαλλαν τον ίδιο πάσσαλο σε θέρμανση, μηχανική φόρτιση και ψύξη (λόγω διακοπής της θέρμανσης). Διαπίστωθηκε ότι η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου αυξήθηκε μετά τη θέρμανση, γεγονός που αποδίδεται στην αύξηση της αντίστασης τριβής λόγω της διαστολής του πασσάλου και πιθανόν λόγω της ξήρανσης του εδάφους. Ωστόσο αναφέρεται ότι η αντίσταση πλευρικής τριβής του πασσάλου δεν επηρεάστηκε από τους κύκλους θέρμανσης και ψύξης.

Οι McCartney & Murphy (2012) στο University of Colorado Boulder διερεύνησαν τη θερμομηχανική απόκριση 2 ε.π. κατά την κατασκευή ενός κτιρίου (Denver Housing Authority Senior Living Facility) στο Denver, Colorado, USA και κατά τη λειτουργία του συστήματος γ.α.θ. του κτιρίου. Οι θερμικές αξονικές τροπές που μετρήθηκαν όπως και οι συνολικές τροπές λόγω θερμικής και μηχανικής φόρτισης ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι οι ε.π. μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποκτήσουν τα νεόδμητα κτίρια βελτιωμένες δυνατότητες ανταλλαγής θερμότητας, με μικρό επιπλέον κόστος εγκατάστασης, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις στη γεωτεχνική λειτουργία της θεμελίωσης.

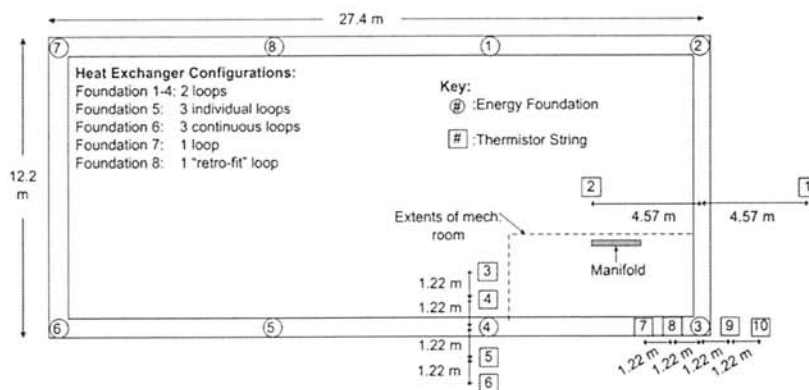


Σχήμα 4.16: Δοκιμαστικοί πάσσαλοι πειράματος Denver, Colorado, USA (Murphy & McCartney, 2014)

Δεδομένα 2 χρόνων λειτουργίας του συστήματος αυτού καθώς και εκτίμηση της θερμομηχανικής απόκρισης των 2 ε.π. παρουσίασαν οι Murphy & McCartney (2014). Τα αποτελέσματα εκτιμάται ότι επιβεβαιώνουν το ότι η χρήση των ε.π. μπορεί να

παράσχει επαρκή ενέργεια χωρίς ιδιαίτερες επιπτώσεις στη στατική λειτουργία του κτιρίου. Οι θερμικές αξονικές τροπές κατά το πρώτο έτος θέρμανσης και ψύξης των πασσάλων ήταν ελαστικές και αναστρέψιμες, όμως κατά το δεύτερο έτος συνέβη μια αλλαγή στο συντελεστή θερμικής διαστολής, πιθανόν λόγω αλλαγών στις διατμητικές τάσεις της διεπιφάνειας πασσάλου - εδάφους. Οι μικρότερες θερμικές αξονικές τροπές παρατηρήθηκαν στην κεφαλή και την αιχμή των πασσάλων, λόγω της συγκράτησής τους από την ανωδομή και το βραχώδες υπόστρωμα αντίστοιχα. Οι μέγιστες θερμομηχανικές αξονικές τάσεις παρατηρήθηκαν κοντά στην αιχμή των πασσάλων κατά τη θέρμανση. Οι μέγιστες θερμομηχανικές αξονικές τάσεις και οι θερμικές αξονικές μετακινήσεις των πασσάλων ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων και εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένεται να προκαλέσουν στατική ή αισθητική ζημιά στο κτίριο. Το προφίλ των πλευρικών διατμητικών τάσεων ήταν μη-γραμμικό με το βάθος, πιθανόν λόγω του συνδυασμού θερμικής διαστολής και δυνάμεων αρνητικής τριβής (downdrag) από το έδαφος στον πάσσαλο. Επισημαίνεται επίσης ότι τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ε.π. σε σύνθετη εδαφική στρωματογραφία δε συμπεριφέρονται πάντα θερμοελαστικά και σε αυτές τις περιπτώσεις χρειάζεται πιο σύνθετη ανάλυση μεταφοράς θερμότητας και ένα θερμοπλαστικό μοντέλο του εδάφους.

Οι Murphy et al. (2014) διεξήγαγαν δοκιμές θερμικής απόκρισης (TRT) σε 8 ε.π. με διαφορετικούς σχεδιασμούς γεωαναλλάκτη, από τους οποίους οι 3 ήταν εξοπλισμένοι με όργανα μέτρησης τροπών και θερμοκρασιών, ώστε να παρατηρήσουν τη θερμομηχανική τους απόκριση.

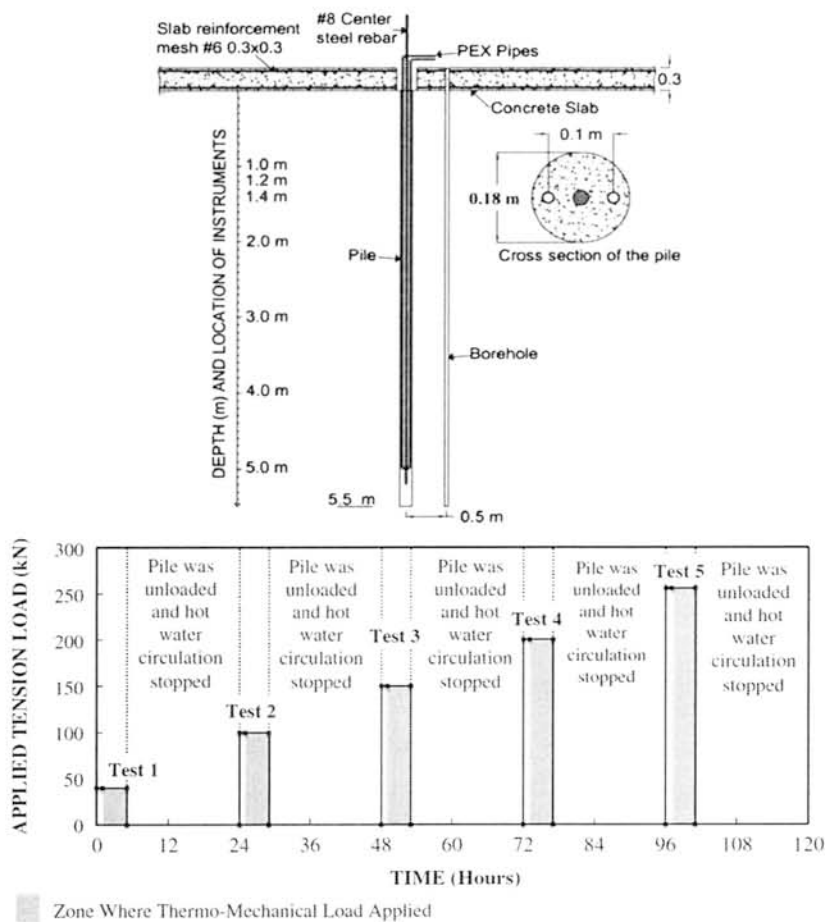


Σχήμα 4.17: Ενεργειακοί πάσσαλοι σε κάτοψη του Field Engineering and Readiness Laboratory, US Air Force Academy, Colorado Springs (Murphy et al., 2014)

Οι πάσσαλοι κατασκευάστηκαν για να θεμελιώσουν ένα κτίριο (Field Engineering and Readiness Laboratory) της US Air Force Academy, Colorado Springs, Colorado, USA, προκειμένου να γίνει επίδειξη της τεχνολογίας στο United States Department of Defense. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης των πασσάλων, παρατηρήθηκε ομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος αυτών. Η θερμοκρασιακή αύξηση οδήγησε σε διασταλτικές θερμικές αξονικές τροπές, οι οποίες ήταν μικρότερες από την υπολογισθείσα τροπή ελεύθερης διαστολής (free-expansion strain). Οι μέγιστες τροπές παρατηρήθηκαν κοντά στα άκρα πασσάλου. Οι θλιπτικές θερμικές αξονικές τάσεις, οι οποίες ήταν 25 % της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (21 MPa), παρατηρήθηκαν σε κανονικοποιημένο βάθος 0.72 - 0.78 του μήκους των πασσάλων. Η σχετική μετακίνηση μεταξύ κεφαλής και αιχμής του πασσάλου αυξήθηκε μη-γραμμικά με ανοδική κατεύθυνση. Οι μετρηθείσες θερμικές αξονικές μετακινήσεις δεν ήταν επαρκείς για να προκαλέσουν στατική ή αισθητική ζημιά στο κτίριο. Οι συνοριακές συνθήκες συγκράτησης των άκρων των πασσάλων διαπιστώθηκε ότι παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των προφίλ αξονικών τάσεων και μετακινήσεων τους, ενώ ο βαθμός συγκράτησης της κεφαλής του πασσάλου από το κτίριο, παρατηρήθηκε ότι εξαρτάται από τη θέση του πασσάλου. Συγκεκριμένα ο πάσσαλος στη γωνία του κτιρίου είχε τη μικρότερη συγκράτηση της κεφαλής σε σχέση με τους άλλους δύο που βρίσκονταν στα μέσα των πλευρών της περιμέτρου του κτιρίου. Η μικρότερη δυσκαμψία της κεφαλής του γωνιακού πασσάλου βρέθηκε ότι οδηγεί σε μικρότερη θερμική αξονική τάση μαζί με ελαφρώς μεγαλύτερη μετακίνηση. Κατά τη διάρκεια της ψύξης των πασσάλων, οι θερμικές αξονικές τροπές, τάσεις και μετακινήσεις ήταν παρόμοιες με αυτές κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, γεγονός που υποδεικνύει γραμμική θερμο-ελαστική συμπεριφορά, ενώ η μικρή υστέρηση που παρατηρήθηκε δείχνει ότι δεν υπήρξαν μόνιμες θερμο-πλαστικές παραμορφώσεις στη διεπιφάνεια εδάφους - θεμελίωσης.

Οι Akrouch et al. (2014) στο Texas A&M University, College Station, Texas, USA, παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας δοκιμής εφελκυσμού ενός ε.π. υπό θερμομηχανική φόρτιση σε δύσκαμπτο αργιλικό έδαφος υψηλής πλαστιμότητας και σε θερμό κλίμα, όπου κυριαρχεί η λειτουργία δροσισμού του κτιρίου και συνεπώς η θέρμανση των πασσάλων (cooling dominated climate). Όλες οι δοκιμές θερμομηχανικής φόρτισης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν θλιπτικές μηχανικές φορτίσεις και πέρα από την αντίσταση πλευρικής τριβής

υπολογίζεται και η αντίσταση αιχμής. Η μελέτη αυτή απεναντίας εξετάζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση πλευρικής τριβής μόνο. Κατά τη διάρκεια του πειράματος μετρήθηκαν σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος του άξονα του πασσάλου οι κατανομές αξονικών τροπών και θερμοκρασιών και στην κεφαλή του πασσάλου η κατανομή φορτίου - μετακίνησης, καθώς και οι κλιματικές συνθήκες. Ένα πεδίο έρευνας που δεν έχει εξεταστεί σε άλλα πειράματα και διερευνάται στη συγκεκριμένη μελέτη, είναι η επίδραση της θερμοκρασίας στο βαθμό ερπυσμού των ε.π..

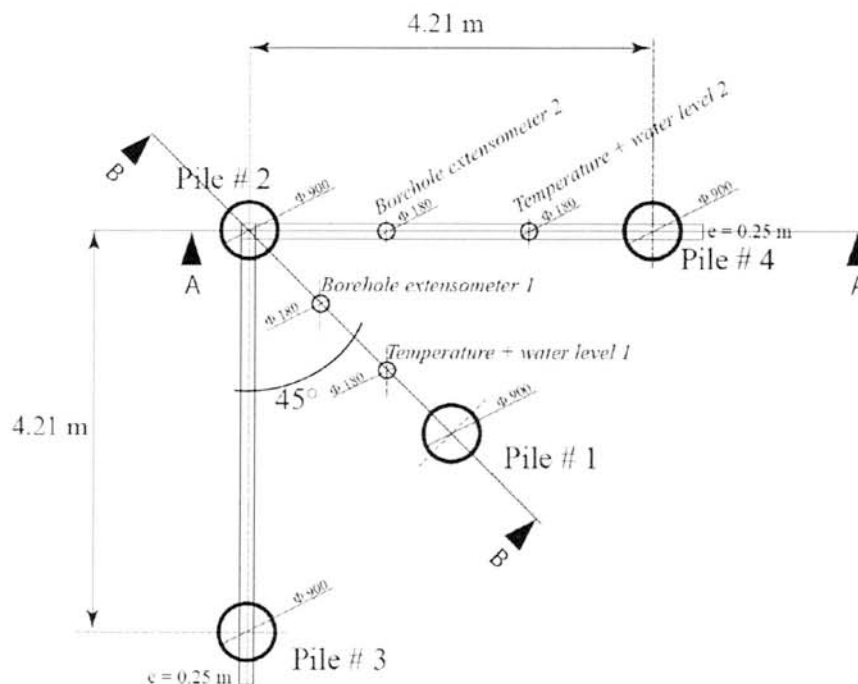


Σχήμα 4.18: Δοκιμαστικός πάσσαλος και σειρά φορτίσεων πειράματος Texas A&M University (Akrouch et al., 2014)

Τα αποτελέσματα, τα οποία είχαν καλή σύγκλιση με τιμές από τη βιβλιογραφία, έδειξαν ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και ο βαθμός ερπυσμού του ε.π. στο αργιλικό έδαφος υψηλής πλαστιμότητας, γεγονός που οδηγεί σε πρόσθετη χρονικά εξαρτημένη μετακίνηση του πασσάλου κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Η μακροπρόθεσμη (50 χρόνια) μετακίνηση για έναν ε.π. υπό τις

συνθήκες του πειράματος, εκτιμήθηκε ότι ήταν 2,53 φορές η μετακίνηση ενός απλού πασσάλου. Συμπεράνθηκε από τα παραπάνω ότι η χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά των ε.π. σε αργιλικά εδάφη υψηλής πλαστιμότητας και σε θερμά κλίματα είναι ένας σημαντικός παράγοντας προς εξέταση. Συστήνεται ότι ο σχεδιασμός ενεργειακών πασσάλων σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές του πειράματος, θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τις μακροπρόθεσμες μετακινήσεις των πασσάλων σε ανεκτά όρια, μέσω της ελαχιστοποίησης της αρχικής καθίζησης. Τονίζεται ωστόσο ότι οι υπολογισμοί της μελέτης βασίστηκαν στην παραδοχή ότι ο δοκιμαστικός πάσσαλος θερμαίνεται σε όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ στην πραγματικότητα η θέρμανση του πασσάλου σε θερμά κλίματα διαρκεί 6 - 8 μήνες. Διαπιστώθηκε ότι η θερμική φόρτιση προκαλεί πρακτικά ασήμαντη θερμική παραμόρφωση και φορτία στον πάσσαλο σε σχέση με τις μέγιστες τιμές αστοχίας. Συστήνεται επίσης ότι η κατανομή σε κάτοψη των ε.π. θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο συμμετρική, ώστε να αποφεύγονται διαφορικές καθιζήσεις και παραμορφώσεις του κτιρίου λόγω της θερμικής παραμόρφωσης των πασσάλων.

Ο Mimouni (2014) διερεύνησε τη θερμομηχανική απόκριση 4^{ων} ε.π. από τη θεμελίωση μιας δεξαμενής νερού στο EPFL, Lausanne, Switzerland. Οι πάσσαλοι συγκεντρώθηκαν σε μια γωνία της δεξαμενής ώστε να μελετηθούν φαινόμενα ομάδας πασσάλων (group effects).



Σχήμα 4.19: Διάταξη ενεργειακών πασσάλων θεμελίωσης δεξαμενής νερού (Mimouni, 2014)

Το πείραμα συμπεριέλαβε 3 διαφορετικές δοκιμές. Κατά την 1^η δοκιμή, ο ένας πάσσαλος θερμάνθηκε πριν την κατασκευή της δεξαμενής, προκειμένου να αντληθούν πληροφορίες για τους επιβαλλόμενους από το έδαφος καταναγκασμούς στους πασσάλους μέσω των μεγεθών της πλευρικής τριβής και της θλίψης στην αιχμή των πασσάλων. Στην επόμενη δοκιμή, μετά την κατασκευή της δεξαμενής, οι πάσσαλοι θερμάνθηκαν ο καθένας ξεχωριστά και καταγράφηκαν οι τροπές στην κεφαλή και η θλίψη στην αιχμή των γειτονικών πασσάλων, προκειμένου να μελετηθεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Κατά την 3^η δοκιμή, η ομάδα των πασσάλων υπεβλήθη ταυτόχρονα σε θέρμανση, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της ομαδικής διαστολής (global group expansion) των πασσάλων στη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Η σύγκριση μεταξύ των προαναφερθέντων δοκιμών έγινε εξετάζοντας τα προφίλ θλίψης στην αιχμή, τροπών στην κεφαλή και βαθμού ελευθερίας των πασσάλων. Από τα αποτελέσματα του πειράματος συμπεράνθηκε ότι το μηχανικό φορτίο της δεξαμενής επηρέασε τη θερμομηχανική απόκριση των πασσάλων στα δύσκαμπτα εδαφικά στρώματα, ενώ η σχετική θέση των πασσάλων σε κάτοψη επηρέασε την απόκριση τους στο πρώτο 1/3^ο περίπου του μήκους τους. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πασσάλων ήταν ξεκάθαρα εμφανείς μεταξύ των άμεσα γειτονικών πασσάλων και στις αιχμές τους. Τα φαινόμενα ομάδας που παρατηρήθηκαν κατά την ταυτόχρονη θέρμανση της ομάδας πασσάλων, είχαν ως αποτέλεσμα το διπλασιασμό του βαθμού ελευθερίας του κάθε πασσάλου, σε σύγκριση με τη θέρμανση του καθένα ξεχωριστά, αυξάνοντας την ανύψωση των πασσάλων, μειώνοντας όμως τις διαφορικές καθιζήσεις και μειώνοντας έτσι την εσωτερική ένταση λόγω θέρμανσης των πασσάλων. Τα φαινόμενα ομάδας κρίθηκε ότι είναι σημαντικά. Ωστόσο οι τιμές των ανυψώσεων, σε σχέση με το μήκος των πασσάλων και τη θερμοκρασιακή αύξηση, δεν ήταν σημαντικές (0,5 - 1 mm σε 28 m μήκους πασσάλων και για 6 - 10 °C θερμοκρασιακή αύξηση). Όσον αφορά τις ακτινικές θερμικές τροπές, παρατηρήθηκε ότι παρεμποδίζονται σε δύσκαμπτα εδαφικά στρώματα, ενώ μπορούν να αναπτυχθούν σε μαλακά. Ως εκ τούτου, η αναπτυσσόμενη αξονική θερμική διαστολή μπορεί να αυξηθεί έως 50 % στα δύσκαμπτα εδαφικά στρώματα και πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του βαθμού ελευθερίας.

Πίνακας 4.7: Δεδομένα και αποτελέσματα δοκιμών πεδίου πάνω στη θερμομηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων (Olgun & McCartney, 2014)

Case	Site stratigraphy	Load mechanism at foundation head	Foundation diameter/m	Foundation length/m	Mechanical load during heating tests/kN	Range of $\Delta T/^\circ\text{C}$	Depth of minimum thermal axial strain during heating/m	Min./max. thermal axial stress/MPa	Maximum increase in thermal axial stress with temperature/kPa $^\circ\text{C}^{-1}$	Range in head displacements (negative is upward)/mm
Laloui <i>et al.</i> (2006)	Alluvial soil, sand and gravel, founded in soft sandstone, groundwater table near surface	Free expansion (T1)	0.96–1.17	25.8	0	+20.9	21.5	2.1	104	–4.2
		Building load (T7)	0.96–1.17	25.8	1088	+18	12.5	2.6	153	Not measured
Bourne-Webb <i>et al.</i> (2009)	Granular fill and sand, founded in stiff fissured silty clay, groundwater table at a depth of 3 m	Free expansion (heat sink pile)	0.55	30	0	+29.4	17.0	6.3	192	Not measured
		Load frame	0.55–0.61	23	1200	–19 to +10	6.0	2.8 (heating) –2.8 (cooling)	329 (heating) –177 (cooling)	4.0 to –2.0
McCartney and Murphy (2012); Murphy and McCartney (2014a)	Urban fill, sand and gravel, founded in shale, locations of perched groundwater	Building dead load	0.91	14.8 (A); 13.4 (B)	3840 (A); 3640 (B)	–5.0 to +14.0	11.6	–1.0–4.0	285	0.4 to –0.8
Murphy <i>et al.</i> (2014)	Sandy fill, gravel, sandstone	Building dead load	0.61	15.2	833	+18.0 to +19.0	11.5–12.5	4.0–5.1	210–268	–1.4 to –1.7
Stewart and McCartney (2014)	Unsaturated, compacted silt	Load control frame	1.2	12.7	950	+19.0	12.7	0.78	48	–1.4
Olgun <i>et al.</i> (2012)	Silty sand, shale	Load frame	0.25	30.5	1335	+27 (T-M T1), +30 (T-M T2)	12.2 m	13.2 (T-M T1); 12.2 (T-M T2)	490 (T-M T1); 408 (T-M T2)	–0.8 to 0.70 (T-M T1); –1.3 to 0.6 (T-M T2)
Sutman <i>et al.</i> (2014)	Stiff sandy/silty clay, very dense sand, groundwater table at depth of 3.7 m	Free expansion (TP-1)	0.46	15.2	0	+7.6 to –6.0	8.7	2.0 (Heating); –1.3 (Cooling)	214 (heating); –271 (cooling)	–5.8 to 2.5
		Load frame (TP-2 and TP-3)	0.46	9.1 (TP-2); 15.2 (TP-3)	378 (TP-2); 1056 (TP-3)	+8.2 to –5.2 (TP-2); +8.8 to –5.8 (TP-3)	2.7–5.8 (TP-2); 5.8 (TP-3)	2.1 (TP-2); 2.7 (TP-3)	222 (TP-2 heating); –179 (TP-2 cooling); 244 (TP-3 heating); –213 (TP-3 cooling)	–6.1 to 1.8 (TP-2); –4.0 to 1.8 (TP-3)

*The reinforced concrete in the centrifuge scale foundation tested by Stewart and McCartney (2014) has a Young's modulus of $E=7.9$ GPa and a coefficient of linear thermal expansion of $\alpha=-7.5 \mu\text{e}/^\circ\text{C}$ (the values for the full scale foundations are $E=30$ GPa and $\alpha=-10$ to $-12 \mu\text{e}/^\circ\text{C}$).

Δοκιμές εργαστηρίου

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα των εργαστηριακών δοκιμών με μοντέλα πασσάλων, οι ελεγχόμενες αυτές δοκιμές έχουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν την απομόνωση των διαφόρων μεταβλητών και των επιπτώσεών τους στην συμπεριφορά του συστήματος, όπως επισημαίνει ο Kramer (2013). Οι Yavari et al. (2014) προσθέτουν ότι οι δοκιμές μικρής κλίμακας είναι χρήσιμα ερευνητικά εργαλεία γιατί δεν κοστίζουν και μπορούν να επαναληφθούν. Σημειώνουν ωστόσο, ότι όπως κάθε ερευνητική μέθοδος έχουν και μειονεκτήματα, αναφέροντας τη διεξαγωγή τους σε χαμηλό εύρος τάσεων καθώς και την έλλειψή τους σε παραμέτρους κλίμακας για τη γενίκευση των συμπερασμάτων από ένα μικρής κλίμακας μοντέλο σε ένα πρωτότυπο πάσσαλο. Όπως εξηγούν οι Rotta Loria et al. (2015), οι δοκιμές φυγοκέντρησης επιτρέπουν τη διερεύνηση μηχανικών προβλημάτων μεγάλης κλίμακας, στην περιορισμένου μεγέθους κλίμακα εργαστηρίου και βασίζονται στο ότι το πεδίο τάσεων ενός προβλήματος μικρής κλίμακας είναι παρόμοιο με αυτό ενός N φορές μεγαλύτερου πλήρους κλίμακας προβλήματος, εάν το πρώτο υποβληθεί σε κεντρομόλο επιτάχυνση N φορές μεγαλύτερη από την επιτάχυνση της βαρύτητας της Γης. Αναφορικά με τη χρήση των κατάλληλων νόμων κλίμακας ομοιότητας και πειραματικών μεθοδολογιών, επισημαίνουν ότι είναι μείζονος σημασίας για την ακριβέστερη ομοιότητα του μοντέλου με το πρωτότυπο, σε όρους γεωμετρικών και δυναμικών ομοιοτήτων (Rotta Loria et al., 2015).

Πίνακας 4.8: Νόμοι κλίμακας ομοιότητας για δοκιμές φυγοκέντρησης (μοντέλο/πρωτότυπο) (Schofield, 1980; Taylor, 1995, as cited in Rotta Loria et al., 2015)

Some scaling laws for centrifuge tests (model/prototype).			
Parameter	Scale	Parameter	Scale
Acceleration	N	Force	$1/N^2$
Linear dimension	$1/N$	Bending moment	$1/N^3$
Area dimension	$1/N^2$	Flexural stiffness	$1/N^3$
Volume dimension	$1/N^3$	Time (dynamic)	$1/N$
Stress-strain ^a	1	Time (consolidation/diffusion)	$1/N^2$
Mass	$1/N^3$	Time (creep)	1
Density	1	Pore fluid velocity	N
Unit weight	N	Velocity (dynamic)	1
Thermal flow ^a	$1/N^2$	Frequency	N

^a Time required for heat to flow by conduction.

Οι Ng et al. (2014) περιγράφουν τη διαδικασία μιας δοκιμής φυγοκέντρησης, λέγοντας ότι οι διαδικασίες στερεοποίησης και διάχυσης θερμότητας επιταχύνονται σε ένα φυγοκεντρική N^2 φορές από ότι σε ένα πείραμα πεδίου, ενώ η ταχύτητα ροής

του νερού και η ένταση μετάδοσης θερμότητας (heat transfer rate) είναι N φορές ταχύτερες υπό συνθήκες υψηλών g (high- g conditions). Επισημαίνουν δε, ότι αν και μεγαλύτερο τμήμα εδάφους επηρεάζεται από τη θερμική φόρτιση, η άμμος είναι θερμικά αδρανής (inert) σε σχέση με άλλα εδάφη, γεγονός που καθιστά τα αποτελέσματα σε κατάσταση σταθερής θερμοκρασίας (steady-state temperature) έγκυρα μετά τη γενίκευση κλίμακας (scaling).

Πίνακας 4.9: Νόμοι κλίμακας ομοιότητας (Taylor, 2004, as cited in Ng et al., 2014)

Relevant scaling laws (Taylor 2004).	
Parameter	Prototype-model ratio
Gravitational acceleration	$1/N$
Temperature	1
Time (diffusion)	N^2
Length	N
Density	1
Stress	1
Strain	1
Displacement	N
Mass	1
Axial rigidity	N^2

Τονίζουν ωστόσο, ότι επειδή δεν ικανοποιούνται στις δοκιμές φυγοκέντρησης όλοι οι νόμοι που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα, θα πρέπει η επέκταση των συμπερασμάτων μιας τέτοιας δοκιμής να αντιμετωπίζεται με προσοχή κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειακών πασσάλων πλήρους κλίμακας (Ng et al., 2014).

Οι Kalantidou et al. (2012) στο Université Paris-Est, Paris, France, μελέτησαν τη θερμομηχανική απόκριση ενός δοκιμαστικού μοντέλου πασσάλου από αλουμίνιο σε ξηρή άμμο, το οποίο υπέβαλλαν σε θέρμανση και ψύξη (αποθέρμανση) και συγχρόνως σε αξονική φόρτιση διαφόρων μεγεθών στην κεφαλή του πασσάλου, διεξάγοντας συνολικά 4 διαφορετικές δοκιμές 1 g , για 4 διαφορετικά μεγέθη αξονικού φορτίου και 2 θερμικούς κύκλους ανά δοκιμή. Όταν το μηχανικό φορτίο ήταν μικρότερο από το 40 % της ολικής αντίστασης του μοντέλου, τότε η απόκριση του πασσάλου ήταν θερμο-ελαστική και ο συνολικός συντελεστής ασφάλειας μεγαλύτερος από 2,5, δηλαδή επαρκής, αν και η επίδραση πολλών κύκλων θερμικής φόρτισης τονίζεται ότι θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα αυτά. Όταν όμως το μηχανικό φορτίο ήταν μεγαλύτερο από το 40% της ολικής αντίστασης του μοντέλου, τότε αναπτυσσόταν μη-αναστρέψιμη συρρίκνωση του πασσάλου. Εντούτοις, όταν το μηχανικό φορτίο πλησίαζε την ολική

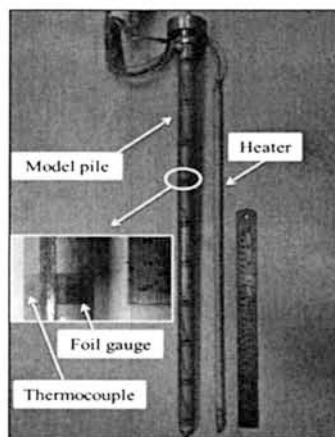
αντίσταση του πασσάλου, τότε οι θερμοκρασιακές επιπτώσεις συνδυάζονταν με φαινόμενα ερπυσμού και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αποσύνδεση των φαινομένων αυτών.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Yavari et al. (2014), από τη διερεύνηση της θερμομηχανικής απόκρισης του ίδιου μοντέλου πασσάλου με 7 δοκιμές συνδυασμένης θερμομηχανικής φόρτισης. Το μοντέλο υπεβλήθη σε διαφορετική για κάθε δοκιμή αξονική φόρτιση στην κεφαλή του, εύρους 0 έως 70 % της φέρουσας ικανότητάς του. Σε κάθε δοκιμή, η αξονική φόρτιση αυξανόταν έως μια τιμή, η οποία στη συνέχεια έμενε σταθερή και κατόπιν το μοντέλο ταυτόχρονα με τη σταθερή αξονική φόρτιση υποβαλλόταν σε 2 θερμικούς κύκλους φόρτισης. Κατά την εφαρμογή χαμηλών αξονικών φορτίων μικρότερα από 30 % της συνολικής αντίστασης του μοντέλου, η συμπεριφορά του ήταν θερμοελαστική. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ανύψωση της κεφαλής κατά τη θέρμανση και καθίζηση κατά τη ψύξη. Κατά την εφαρμογή υψηλών αξονικών φορτίων ωστόσο, παρατηρήθηκε σημαντική μη-αναστρέψιμη καθίζηση της κεφαλής, ενώ η αξονική δύναμη στην αιχμή σταδιακά αυξήθηκε. Οι θερμικοί κύκλοι φόρτισης επηρέασαν σημαντικά την ενεργοποιούμενη πλευρική τριβή (mobilised skin friction) κατά μήκος της επιφάνειας του μοντέλου. Οι συνολικές πιέσεις στην περιοχή του εδάφους κάτω από την αιχμή του μοντέλου επηρεάστηκαν σημαντικά από τις μηχανικές και θερμικές φορτίσεις, σε αντίθεση με άλλα σημεία του εδάφους όπου οι αλλαγές στις τιμές τους ήταν αμελητέες.

Οι McCartney et al. (2013) εξέτασαν την επίπτωση της άνω συνοριακής συνθήκης (upper boundary condition) στη θερμομηχανική απόκριση ενεργειακών πασσάλων αιχμής σε θέρμανση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από δοκιμές φυγοκέντρισης και από το προαναφερθέν πείραμα πεδίου των McCartney & Murphy, (2012). Σημειώνεται ότι ενώ το κτίριο περιόριζε τη θερμική διαστολή των ε.π., στην περίπτωση των δοκιμών φυγοκέντρισης το μοντέλο πασσάλου μπορούσε να διασταλεί ανεμπόδιστα (free displacement) υπό συνθήκες ελεγχόμενης αξονικής φόρτισης (load-controlled conditions). Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η συνοριακή συνθήκη στην κεφαλή έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος και το σχήμα της κατανομής των τάσεων κατά μήκος των ε.π.. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τους ε.π. της θεμελίωσης του κτιρίου, στη δοκιμή φυγοκέντρισης οι τάσεις κοντά στην κεφαλή του μοντέλου πασσάλου ήταν σχεδόν μηδενικές. Και στις δύο περιπτώσεις ωστόσο, οι τάσεις κοντά στην αιχμή ήταν μεγαλύτερες από αυτές κοντά στην κεφαλή.

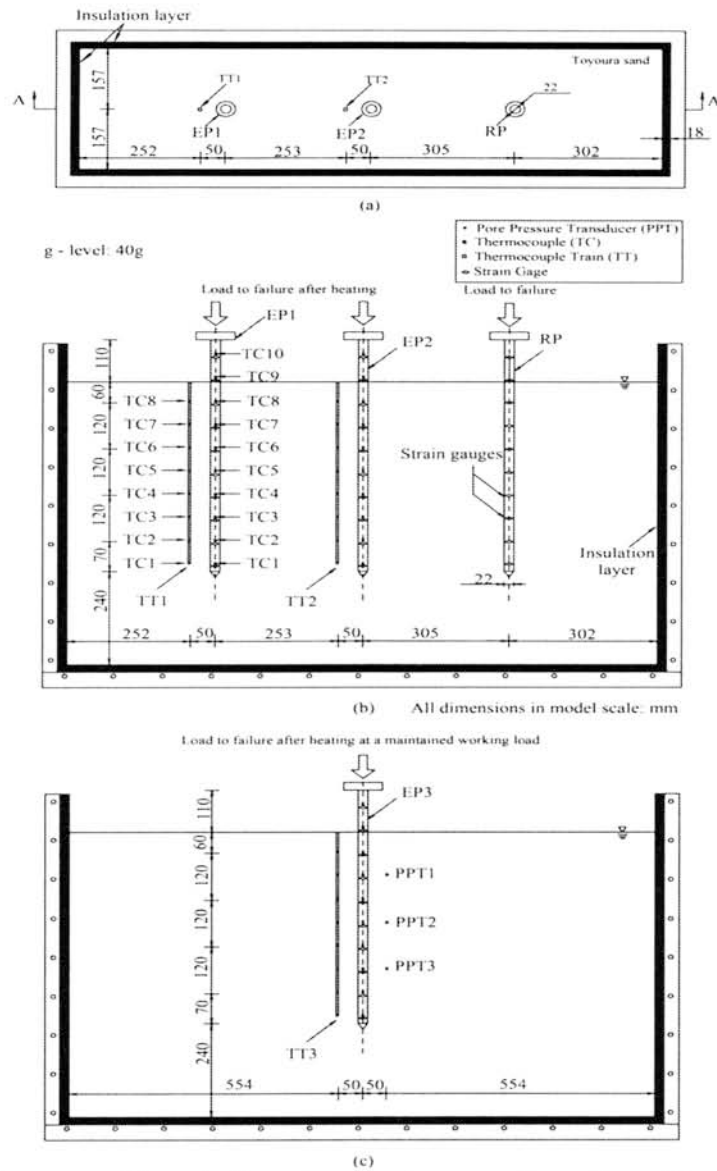
Ο Kramer (2013) στο Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA, διερεύνησε τη θερμομηχανική απόκριση ενός μοντέλου πασσάλου από σκυρόδεμα σε άμμο και παρατήρησε ότι ενώ η θερμική φόρτιση επηρέασε τη συμπεριφορά φορτίου - μετακίνησης και τις φέρουσες ικανότητες σε λειτουργικότητα και σε αστοχία του μοντέλου, ωστόσο η επιρροή αυτή δεν κατέστη δυνατό να υπολογιστεί με ακρίβεια. Κάνοντας την παραδοχή ότι η μηχανικές ιδιότητες της άμμου δεν αλλάζουν μέσα στο εύρος της θερμικής φόρτισης που της επιβλήθηκε, η αλλαγή στη συμπεριφορά φορτίου - μετακίνησης λόγω θερμικής φόρτισης του μοντέλου αποδόθηκε στη μερικώς περιορισμένη μετακίνηση του μοντέλου.

Οι Ng et al. (2014), στο Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, διερεύνησαν με δοκιμές φυγοκέντρωσης 40g, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες και ακολουθίες φορτίσεων, τις επιπτώσεις θέρμανσης στους μηχανισμούς καθίζησης και τη φέρουσα ικανότητα 4^{ov} μονήρων μοντέλων πασσάλων από αλουμίνιο, σε μέτριας πυκνότητας κορεσμένη άμμο.



Σχήμα 4.20: Μοντέλο πασσάλου δοκιμής φυγοκέντρωσης Hong Kong (Ng et al., 2014)

Παρατηρήκε ότι η θέρμανση του μοντέλου χωρίς αξονικό φορτίο προκάλεσε την ενεργοποίηση της αντίστασης αιχμής, λόγω περιορισμού από το έδαφος της καθοδικής θερμικής διαστολής του μοντέλου. Η θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία, προκάλεσε την κάθοδο του ουδέτερου επιπέδου (neutral plane) προς την αιχμή, λόγω μεγαλύτερου βαθμού ενεργοποίησης της αντίστασης αιχμής. Η χωρίς αξονικό φορτίο συνεχής θέρμανση για 4 μήνες των μοντέλων σε θερμοκρασίες 15 °C και 30 °C, προκάλεσε ανυψώσεις των κεφαλών τους κατά 0,4 % και 1 % της διαμέτρου τους αντίστοιχα.



Σχήμα 4.21: Πειραματική διάταξη δοκιμής φυγοκέντρησης Hong Kong (Ng et al., 2014)

Παρομοίως, υπό σταθερό αξονικό φορτίο λειτουργίας (maintained working load), η κεφαλή του μοντέλου ανυψώθηκε αρχικά κατά 1,4 % της διαμέτρου του με μια θερμοκρασιακή αύξηση 30 °C, αλλά σταδιακά μειώθηκε σε 0,8 % της διαμέτρου, ύστερα από 4 μήνες συνεχούς θέρμανσης στην ίδια θερμοκρασία. Η παραμένουσα καθίζηση (post-pile settlement) του μοντέλου εικάζεται ότι προκλήθηκε λόγω θερμικής συστολής της άμμου. Στις επόμενες δοκιμές, οι φέρουσες ικανότητες των μοντέλων αυξήθηκαν κατά 13 % και 30 %, λόγω θερμοκρασιακών αυξήσεων 15 °C και 30 °C αντίστοιχα. Συμπεράνθηκε ότι για μια θερμοκρασιακή αύξηση 15 °C, η αύξηση της φέρουσας ικανότητας οφείλεται σε αύξηση της αντίστασης τριβής (shaft

resistance), αν και με μειωμένο ρυθμό. Σε μια υψηλότερη θερμοκρασιακή αύξηση 30 °C όμως, η αντίσταση αιχμής αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του αξονικού φορτίου, λόγω της αυξημένης ενεργοποίησής της που προκαλεί η μεγαλύτερη καθοδική διαστολή του μοντέλου. Με τη χρήση μη-γραμμικής ελαστικής ανάλυσης, οι προβλεπόμενες αντιστάσεις τριβής ήταν μεγαλύτερες από τις τιμές που μετρήθηκαν, γεγονός που οφείλεται στη θερμική συστολή της άμμου, η οποία αγνοήθηκε κατά τον υπολογισμό τους. Οι συντελεστές εδαφικών ωθήσεων με τιμές 1.1 K_0 and 1.3 K_0 διαπιστώθηκε ότι ήταν καταλληλότεροι για τον προκαταρκτικό υπολογισμό της θερμικά επαγόμενης αντίστασης τριβής των μοντέλων για τις θερμοκρασιακές αυξήσεις 15 °C και 30 °C αντίστοιχα. Τονίζεται ωστόσο, ότι η όποια γενίκευση των αποτελεσμάτων αυτών σε εφαρμογές πλήρους κλίμακας θα πρέπει να προσεγγίζεται με προσοχή.

Πίνακας 4.10: Δεδομένα και αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών πάνω στη θερμομηχανική συμπεριφορά των ενεργειακών πασσάλων (Olgun et al., 2014b, as cited in Olgun & McCartney, 2014)

Study	Model	Soil type	Pile	$\Delta T/^\circ\text{C}$	Remarks
McCartney and Rosenberg (2011)	Centrifuge (24g)	Bonny silt (compacted) $w=13.2\%$ Fines=84% $PI=4$ $\phi'=32^\circ$	Concrete $D=76.2\text{ mm (1.8 m)}$ $H=381\text{ mm (9.1 m)}$	29/41	40% increase in side shear resistance with heating
Wang et al. (2011)	Laboratory (1g)	N50 fine sand (loosely compacted: 10 layers) $C_u=1.47$, $C_c=1.21$ $w=0.5\%$ 300WQ Silica flour (loosely compacted: 10 layers) $C_u=4.8$, $C_c=2.13$ $w=21.5$ and 24%	Steel tube $D=25.4\text{ mm}$ $t=1.2\text{ mm}$ Pile surface is coated with a layer of N50 fine sand using epoxy resin	20	50% decrease in side shear resistance with heating 10–50% decrease in side shear resistance with heating
Wang et al. (2012)	Laboratory (1g)	N50 fine sand (loosely compacted: 10 layers) $C_u=1.47$, $C_c=1.21$ $w=0$, 2 and 4%	Steel tube $D=25.4\text{ mm}$ $t=1.2\text{ mm}$ Pile surface is coated with a layer of N50 fine sand using epoxy resin	20/40	$w=0\%$: no change in side shear resistance $w=2$ and 4%: reduction in side shear resistance
Goode et al. (2014)	Centrifuge (24g)	Dry Nevada sand $D_r=60\%$ $e=0.75$ $D_{10}=0.09\text{ mm}$ $D_{30}=0.11\text{ mm}$ $D_{60}=0.16\text{ mm}$ $\phi=35^\circ$ $G=30\text{ MPa}$, $\nu=0.3$	Concrete $D=63.5\text{ mm (1.5 m)}$ $H=342.9\text{ mm (8.2 m)}$	7/12/18	No change in ultimate capacity with heating
Kramer and Basu (2014)	Laboratory (1g)	F50 Ottawa sand (fine silica sand) (Air plion) $e_{max}=0.78$, $e_{min}=0.48$ $D_{50}=0.28\text{ mm}$, $C_u=1.8$ $G_s=2.65$	Concrete $D=100\text{ mm}$ $H=1.22\text{ m}$	20	Slight increase in pile capacity (~5%) with heating Decrease in pile head stiffness with heating

4.2.1.2. Μελέτες προσομοίωσης

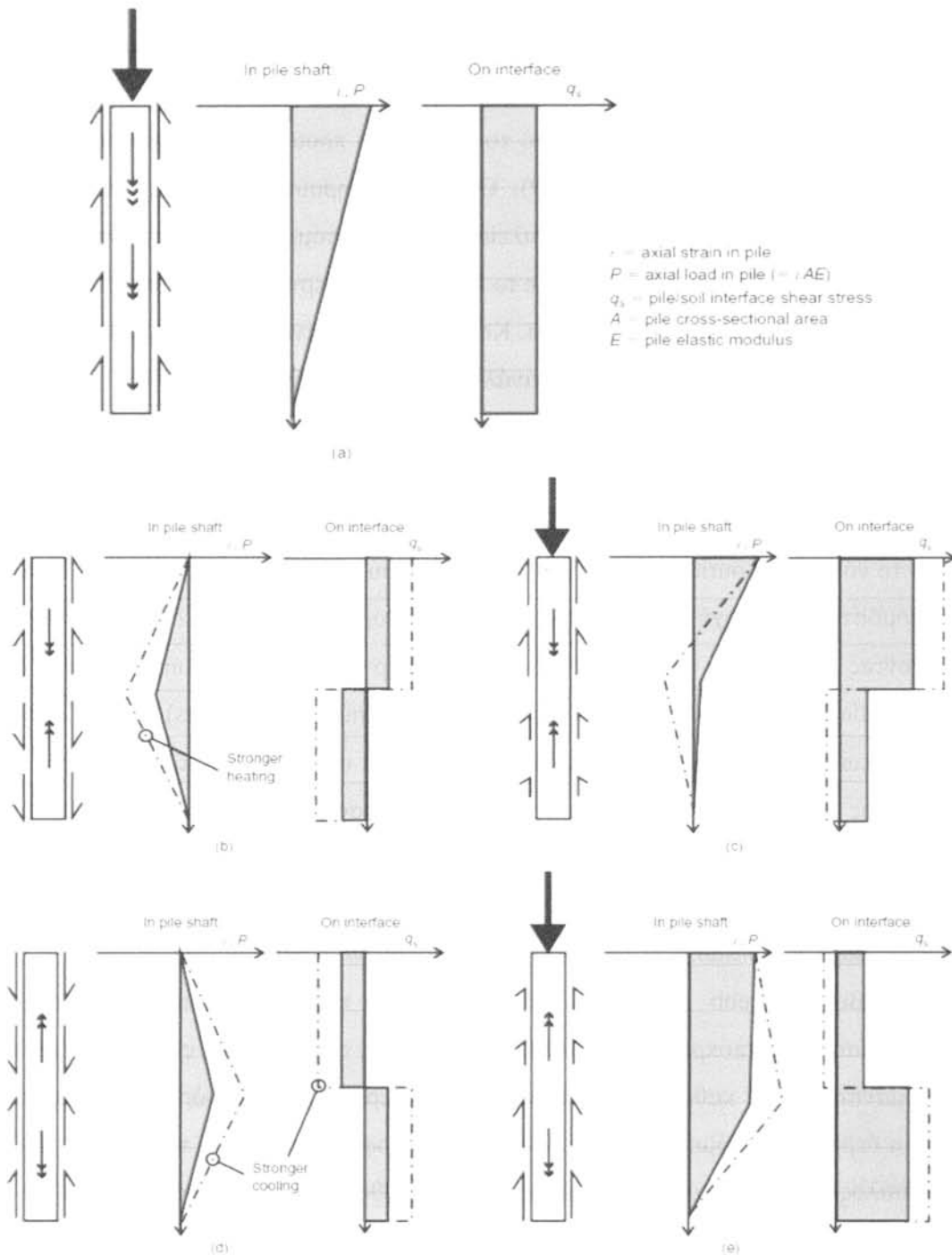
Θερμο-υδρο-μηχανικό μοντέλο

Οι Laloui et al. (2006) πραγματοποίησαν μια συζευγμένων θερμο-υδρο-μηχανικών μεγεθών (THM: thermo-hydro-mechanical) μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (coupled multi-physical finite element modelling), προκειμένου να προσομοιώσουν τα παρατηρηθέντα αποτελέσματα από το αντίστοιχο προαναφερθέν πείραμα (Laloui et al., 2006; Laloui & Nuth, 2009). Όπως παρατηρούν, έως τότε δεν υπήρχαν αναλυτικά, φυσικά, ή αριθμητικά εργαλεία για την προσομοίωση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης με το έδαφος των ενεργειακών πασσάλων και των ενεργειακών γεωκατασκευών εν γένει. Κατά τη συζευγμένων μεγεθών μετακίνησης - πίεσης πόρων - θερμοκρασίας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (coupled displacement-pore water pressure-temperature finite element analysis) που πραγματοποιήθηκε, έγιναν οι παραδοχές ότι το σκυρόδεμα και το έδαφος είναι κορεσμένα και διέπονται από ένα θερμομηχανικό νόμο, η ροή θερμότητας διέπεται από το νόμο του Fourier και το νερό των πόρων του εδάφους από το νόμο του Darcy, εφαρμόστηκε η αρχή της ενεργού τάσης, καθορίστηκαν τα πεδία θερμότητας, κάνοντας χρήση της αρχής διατήρησης της ενέργειας (energy conservation), της ισορροπίας και των εξισώσεων συνεχείας (continuity statements). Το σύστημα εξισώσεων το οποίο προέκυψε, εκτιμήθηκε ότι είναι ικανό για την προσομοίωση της σύνθετης συμπεριφοράς ενός ενεργειακού πασσάλου και ότι αναπαράγει ικανοποιητικά τα σημαντικότερα εκ των αποτελεσμάτων του πειράματος.

Μηχανισμοί θερμοελαστικής απόκρισης ενεργειακού πασσάλου

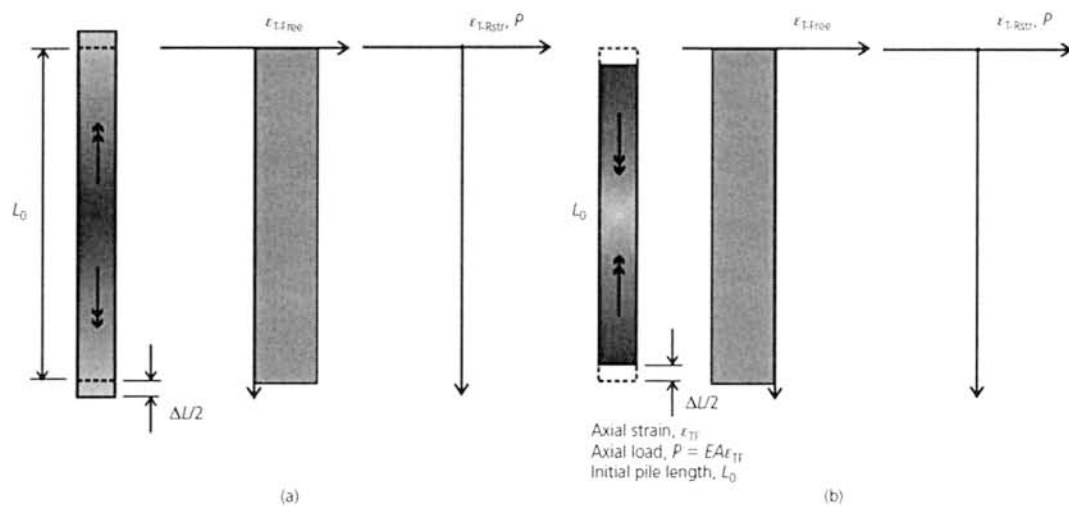
Οι Bourne-Webb et al. (2009) πρότειναν τους παρακάτω μηχανισμούς θερμοελαστικής απόκρισης ενεργειακού πασσάλου, σε μηχανική φόρτιση, θερμική (θέρμανση, ψύξη) καθώς και σε συνδυασμένη θερμομηχανική φόρτιση. Θεωρείται ότι οι θερμικά επαγόμενες αλλαγές είναι ομοιόμορφες κατά μήκος του ε.π. και ότι ο πάσσαλος διαστέλλεται και συστέλλεται εκατέρωθεν ενός ουδέτερου σημείου (null point) στο μέσο του. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι συνεπείς με τα παρατηρηθέντα προφίλ τροπών από το αντίστοιχο προαναφερθέν πείραμα που παρουσιάζεται στην ίδια μελέτη, από τα οποία συμπεράστηκε ότι η απόκριση του πασσάλου ήταν θερμοελαστική, όπως είχε συστηθεί από τους Laloui et al. (2006). Οι αλλαγές λόγω θερμικής φόρτισης στην απόκριση του πασσάλου ήταν δηλαδή αποτέλεσμα της

θερμικής συστολής και διαστολής του πασσάλου και τα παρατηρηθέντα φαινόμενα φάνηκε ότι είναι αναστρέψιμα.

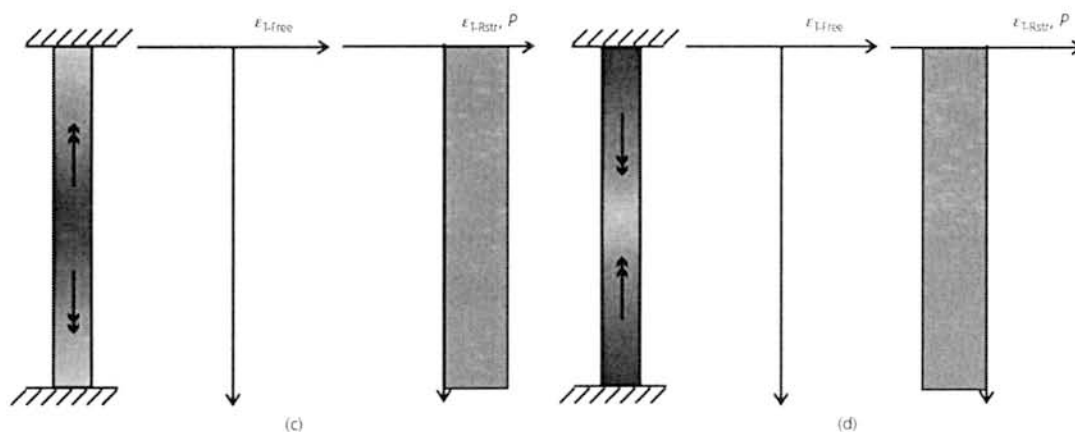


Σχήμα 4.22: Μηχανισμοί απόκρισης πασσάλου σε θερμική φόρτιση: (a) μόνο μηχανική φόρτιση, (b) μόνο ψύξη, (c) συνδυασμένη ψύξη και μηχανική φόρτιση, (d) μόνο θέρμανση, (e) συνδυασμένη θέρμανση και μηχανική φόρτιση (Bourne-Webb et al., 2009)

Οι Bourne-Webb et al. (2012) επέκτειναν το παραπάνω πλαίσιο μηχανισμών απόκρισης ε.π., συμπεριλαμβάνοντας σε αυτό την επίδραση στην απόκρισή του, των διαφόρων βαθμών συγκράτησης του κορμού από το περιβάλλον έδαφος και των άκρων από την ανωδομή στην κεφαλή και από το εδαφικό ή βραχώδες υπόβαθρο στην αιχμή του. Σημειώνεται ότι οι θλιπτικές αξονικές τροπές και τάσεις, καθώς και οι διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια του πασσάλου με ανοδική κατεύθυνση, θεωρούνται θετικές.

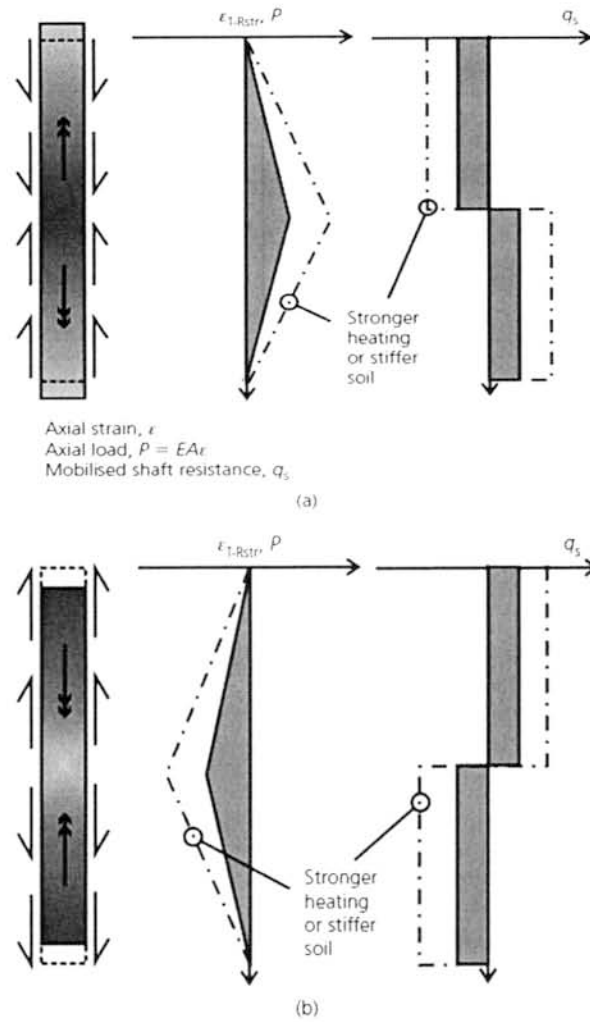


Σχήμα 4.23: Θερμική απόκριση πασσάλου χωρίς συγκράτηση των άκρων του σε (a) θέρμανση, (b) ψύξη (Bourne-Webb et al., 2012)

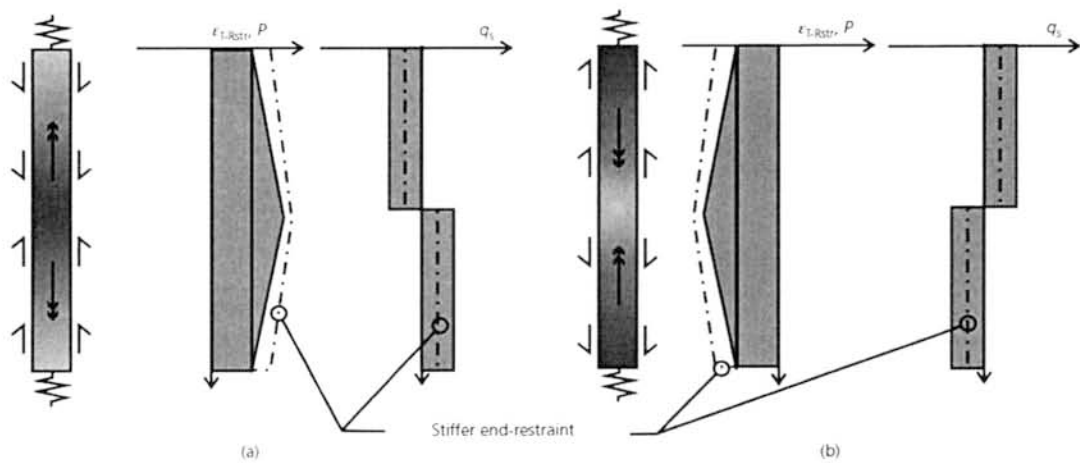


Σχήμα 4.24: Θερμική απόκριση πασσάλου με συγκράτηση των άκρων του σε (c) θέρμανση, (d) ψύξη (Bourne-Webb et al., 2012)

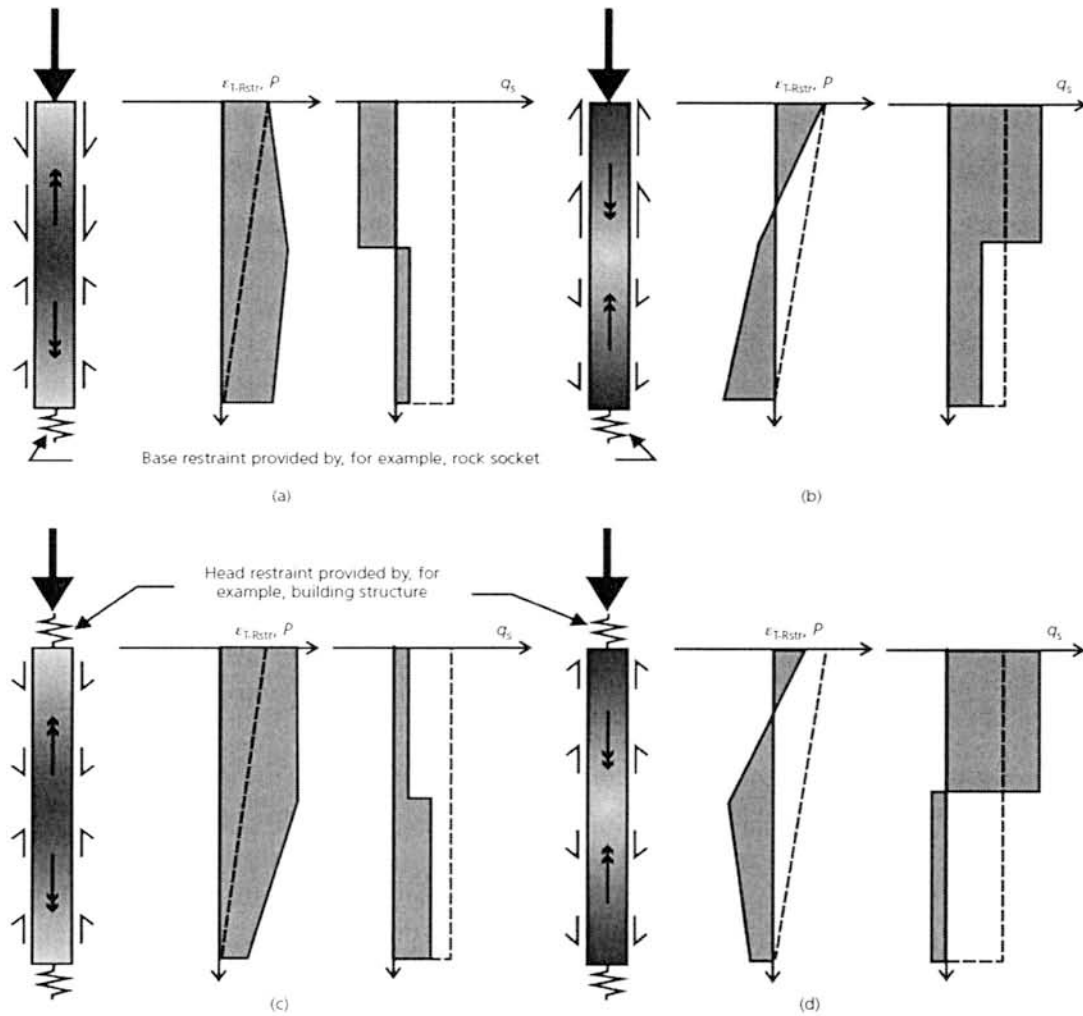
Κεφάλαιο 4^ο : Συμπεριφορά και σχεδιασμός των ενεργειακών πασσάλων



Σχήμα 4.25: Επίδραση στη θερμική απόκριση του πασσάλου της συγκράτησης του από το περιβάλλον έδαφος σε (a) θέρμανση, (b) ψύξη (Bourne-Webb et al., 2012)



Σχήμα 4.26: Επίδραση της συγκράτησης των άκρων του πασσάλου στη θερμική του απόκριση σε (a) θέρμανση, (b) ψύξη (Bourne-Webb et al., 2012)



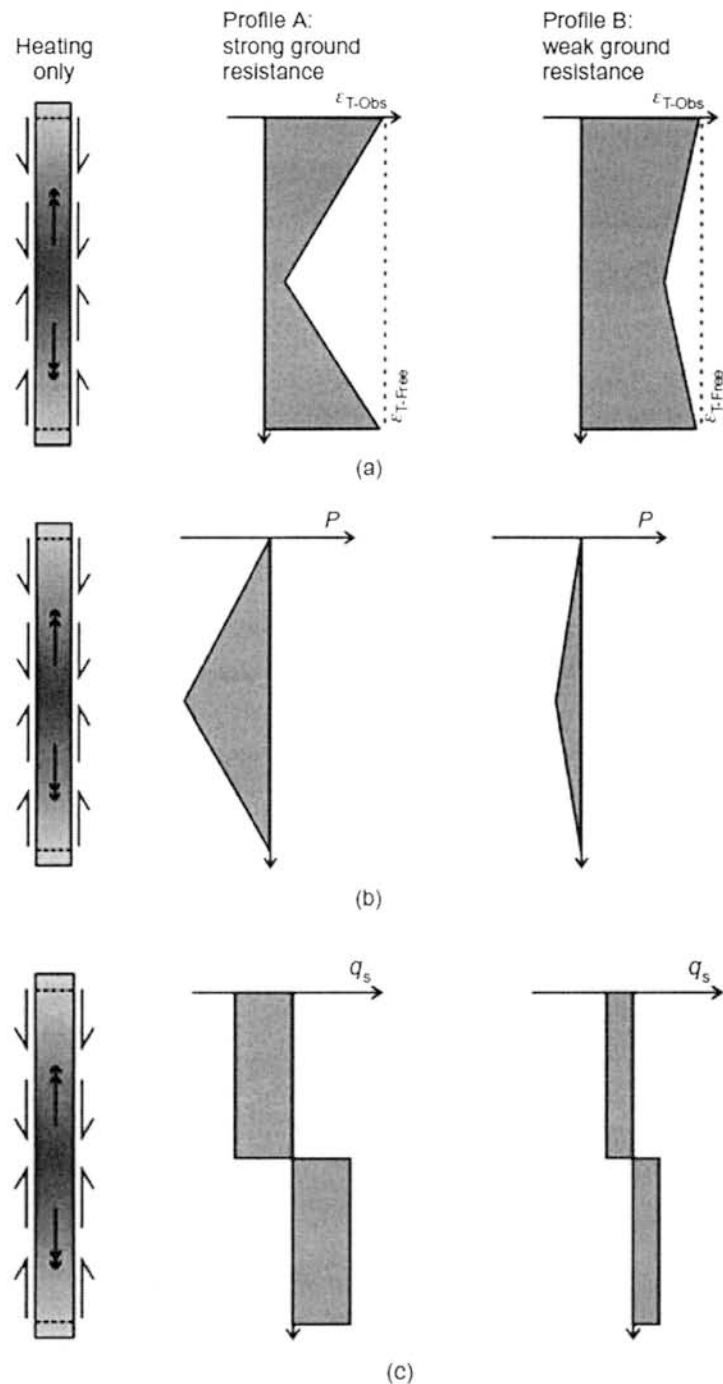
Σχήμα 4.27: Επίδραση της συγκράτησης των άκρων του υπό μηχανικό φορτίο πασσάλου στη θερμομηχανική του απόκριση: (α) θέρμανση και συγκράτηση μόνο της βάσης, (β) ψύξη και συγκράτηση μόνο της βάσης, (γ) θέρμανση και συγκράτηση και των δύο άκρων, (δ) ψύξη και συγκράτηση και των δύο άκρων (Bourne-Webb et al., 2012)

Το απλοποιητικό, περιγραφικό πλαίσιο των μηχανισμών αυτών, επικυρώνεται στη βάση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα του Lambeth College (Bourne-Webb et al., 2009) και του EPFL (Laloui et al., 2006) και επισημαίνεται ότι παρά την παρατηρηθείσα ασυμμετρία στα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών λόγω της διαφορετικότητας των αντίστοιχων εδαφών, τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της απόκρισης των πασσάλων σε θερμική και θερμομηχανική φόρτιση, αντικατοπτρίζονται στο προτεινόμενο πλαίσιο μηχανισμών. Τονίζεται επίσης η σημασία και η χρησιμότητα του προτεινόμενου πλαισίου μηχανισμών, ως ποιοτικό μέτρο αποτίμησης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων, αλλά και ως εργαλείο για την επεξήγηση των μηχανισμών απόκρισης

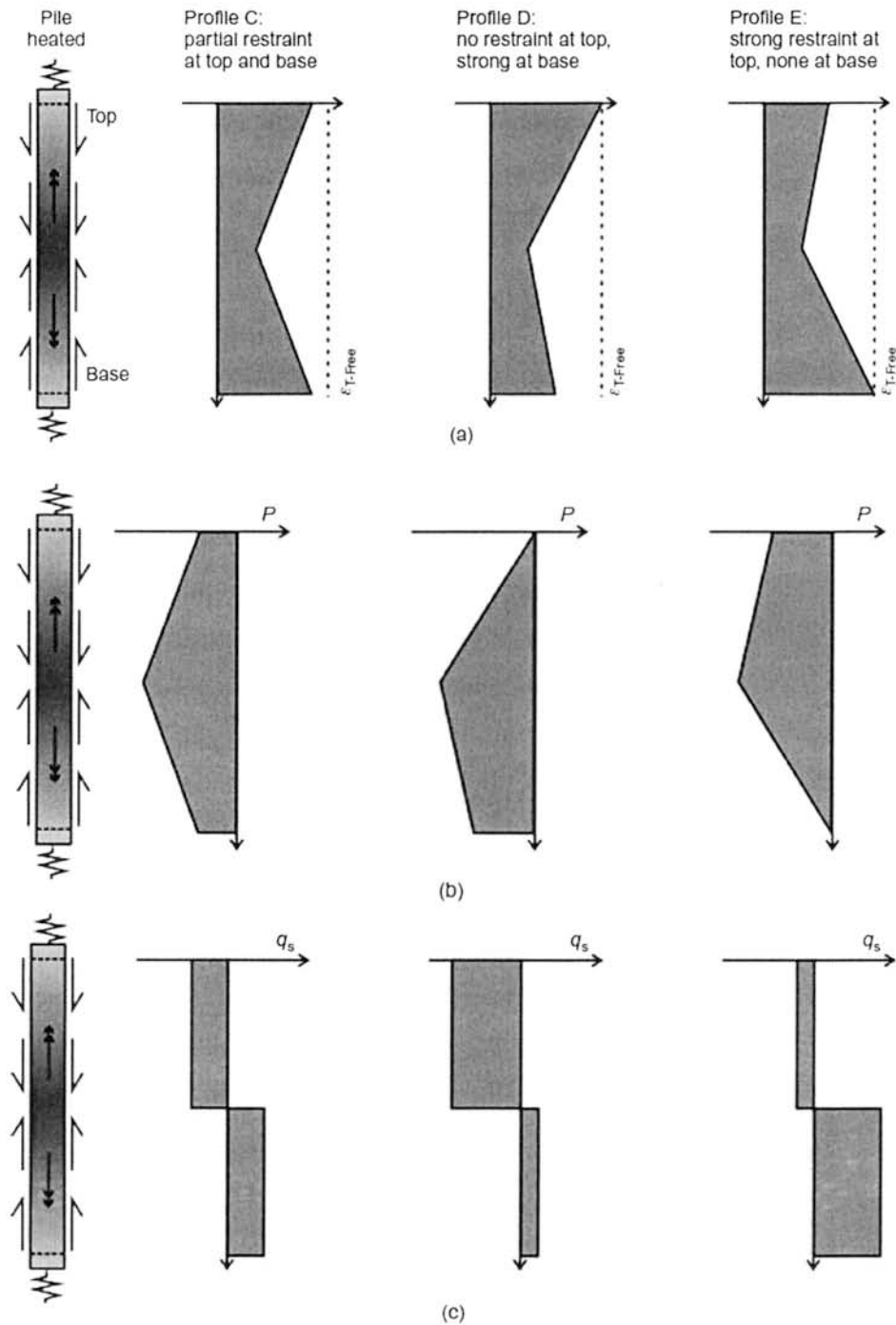
των ενεργειακών πασσάλων σε μηχανικούς μη-εξοικειωμένους με αυτή την τεχνολογία. Ωστόσο επισημαίνεται η ανάγκη διεύρυνσης της βάσης δεδομένων από αποτελέσματα πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων για την πιο αξιόπιστη επικύρωση τέτοιων μοντέλων.

Οι Amatya et al. (2012) σχολιάζουν και συμπεριλαμβάνουν ως βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη και επικύρωση του παραπάνω πλαισίου μηχανισμών, εκτός των 2 προαναφερθέντων πειραμάτων, τα αποτελέσματα από την οργανομέτρηση του δοκιμαστικού ε.π. στο Bad Schallerbach, Austria (Brandl, 2006). Συγκεκριμένα σχολιάζεται η επίδραση της συγκράτησης των άκρων των πασσάλων και των εδαφικών συνθηκών στη θερμομηχανική τους απόκριση και παρουσιάζονται επίσης οι θερμικά επαγόμενες αλλαγές της αξονικής τάσης και της ενεργοποιούμενης αντίστασης πλευρικής τριβής των ενεργειακών πασσάλων, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της μεθόδου σχεδιασμού τους. Η συγκράτηση των άκρων εκτιμήθηκε ότι είναι σημαντική. Παρατηρήθηκε ότι όταν ένας πάσσαλος θερμάνθηκε ή ψύχθηκε, η θερμικά επαγόμενη αξονική τάση εντός του πασσάλου ήταν μεταξύ 50 % και 100 % των τιμών πλήρους συγκράτησης, γεγονός που παρέχει ένα ασφαλές άνω όριο για εκτιμήσεις των αλλαγών της τάσης στο σχεδιασμό. Ωστόσο, σημειώνεται ότι οι μηχανισμοί με τους οποίους αυτό το φαινόμενο μετριάζεται, όπως στη δοκιμή της Lausanne, είναι ανάγκη να κατανοηθούν προκειμένου να αναπτυχθούν πιο βελτιωμένες σχεδιαστικές κατευθύνσεις και να αποφευχθεί ο υπέρμετρος συντηρητισμός. Σχετικά με τη θερμική φόρτιση μονήρων ή ομάδας ε.π., σημειώνεται ότι η μεγάλη θερμική τάση που αναπτύχθηκε στη δοκιμή του EPFL μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική περιπτώσεων όπου πολλοί πάσσαλοι θερμαίνονται ή ψύχονται ταυτόχρονα, όπως στην περίπτωση της δοκιμής του Bad Schallerbach, όπου η θερμική αξονική τάση στην κεφαλή του πασσάλου ήταν σημαντικά μικρότερη. Αναφορικά με την ενεργοποιούμενη αντίσταση πλευρικής τριβής για ένα μηχανικά φορτισμένο πάσσαλο, παρατηρήθηκε ότι μπορεί να υποστεί σημαντικές αλλαγές κατά τη διάρκεια της θερμικής φόρτισης. Παρατηρήθηκε ότι δύσκαμπτα ιλυώδη/αργιλικά εδάφη φαίνονται να επιδεικνύουν μεγαλύτερη ενεργοποίηση μονάδας αντίστασης πλευρικής τριβής ανά μονάδα αλλαγής θερμοκρασίας από απ' ότι εδάφη με μαλακή άργιλο. Ωστόσο, επισημαίνεται η ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων για την απλή και αξιόπιστη πρόβλεψη των φαινομένων αυτών, ειδικά σε πολυστρωματικές εδαφικές συνθήκες. Τονίζεται ότι αν και δεν υπάρχουν γνωστά παραδείγματα αστοχίας

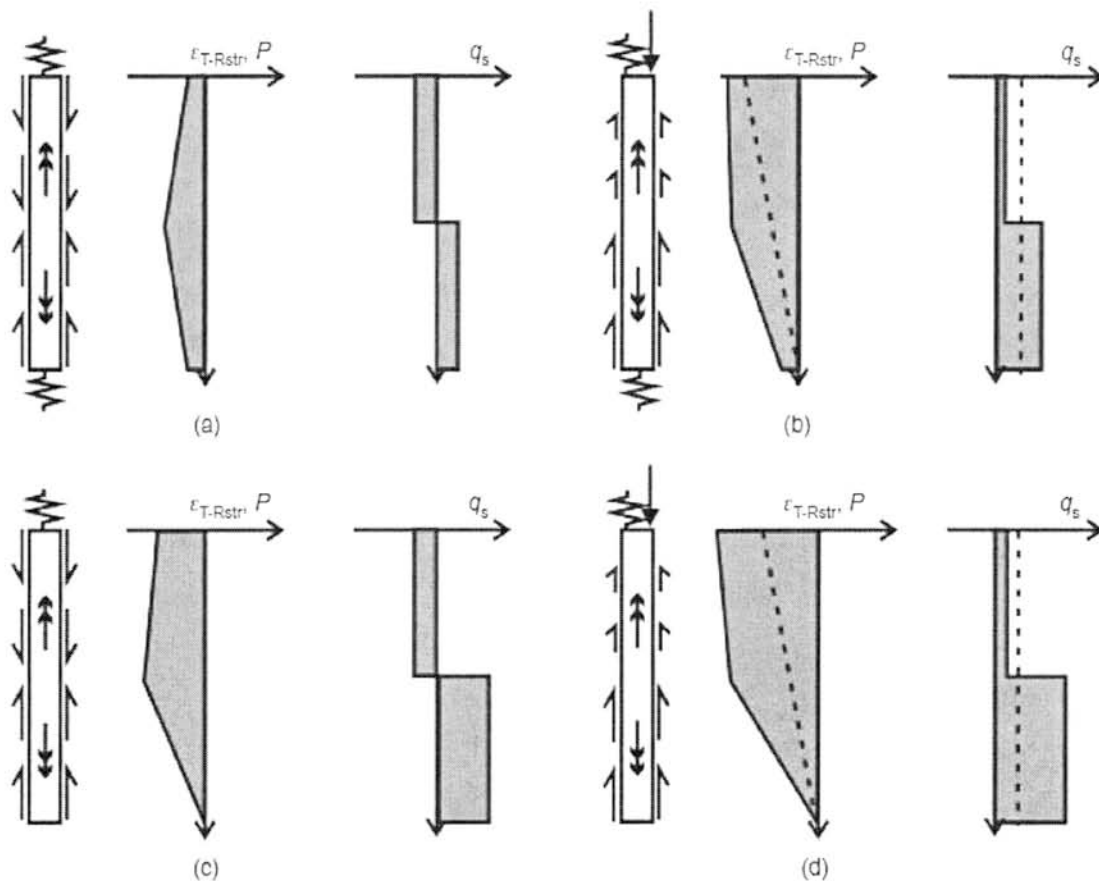
θεμελίωσης ενεργειακών πασσάλων εξαιτίας των θερμικών αλληλεπιδράσεων, η καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών απόκρισης θα επιτρέψει τη βελτίωση της μεθοδολογίας και την αποφυγή υπερβολικού συντηρητισμού στο σχεδιασμό τους.



Σχήμα 4.28: Επίδραση της θερμικής φόρτισης και του περιβάλλοντος εδάφους στην απόκριση του πασσάλου σε θέρμανση χωρίς συγκράτηση των άκρων του (after Bourne-Webb et al., 2012, as cited in Amatya et al., 2012)



Σχήμα 4.29: Επίδραση της θερμικής φόρτισης και του περιβάλλοντος εδάφους στην απόκριση του πασσάλου σε θέρμανση με συγκράτηση των άκρων του (after Bourne-Webb et al., 2012, as cited in Amatya et al., 2012)



Σχήμα 4.30: Μηχανισμοί απόκρισης πασσάλου σε θέρμανση

(a) με τα δύο άκρα μερικώς συγκρατημένα, (b) με τα δύο άκρα μερικώς συγκρατημένα και υπό μηχανική φόρτιση, (c) με συγκράτηση μόνο της κεφαλής, (d) με συγκράτηση μόνο της κεφαλής και υπό μηχανική φόρτιση (after Bourne-Webb et al., 2009, 2012, as cited in Amatya et al., 2012)

Επισημαίνεται ότι διασφαλίζοντας ότι οι τάσεις σχεδιασμού του σκυροδέματος δεν υπερβαίνονται, ότι οι συμβατικοί συντελεστές ασφαλείας για την πλευρική τριβή και για την αιχμή του πασσάλου διατηρούνται, καθώς και ότι οι καθιζήσεις της θεμελίωσης είναι περιορισμένες, η θέρμανση και ψύξη των ε.π. είναι απίθανο να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στα κτίρια. Εκτιμάνε επίσης ότι πιθανές επιπτώσεις μιας ομάδας πασσάλων και της θερμικής λειτουργίας των ε.π. στην απόκριση καθίζησης πασσάλου είναι μία σημαντική διάσταση για να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό.

Οι παραπάνω απλές σχηματικές περιγραφές που παρουσιάζονται εκτιμάται ότι είναι συνεπείς με τις πειραματικά δεδομένα που σχολιάζονται. Σημειώνεται ότι η θερμική διασταλτική τροπή λόγω θέρμανσης, η εφελκυστική τροπή, το εφελκυστικό αξονικό φορτίο ή τάση και η αντίσταση πλευρικής τριβής, με ανοδική κατεύθυνση, θεωρήθηκαν θετικές. Στα παραπάνω σχήματα, ϵ_{T-Free} είναι η ελεύθερη χωρίς συγκράτηση του πασσάλου αξονική θερμική (“T” for Thermal) τροπή, ϵ_{T-Rstr} είναι η

αξονική θερμική τροπή υπό συγκράτηση (“Rstr” for Restrained) του κορμού ή των άκρων του πασσάλου και ε_{T-Obs} είναι η μετρηθείσα (“Obs” for Observed) αλλαγή στην αξονική θερμική τροπή του πασσάλου λόγω αλλαγής θερμοκρασίας και ισχύει ότι:

$$\varepsilon_{T-Rstr} = \varepsilon_{T-Free} - \varepsilon_{T-Obs}$$

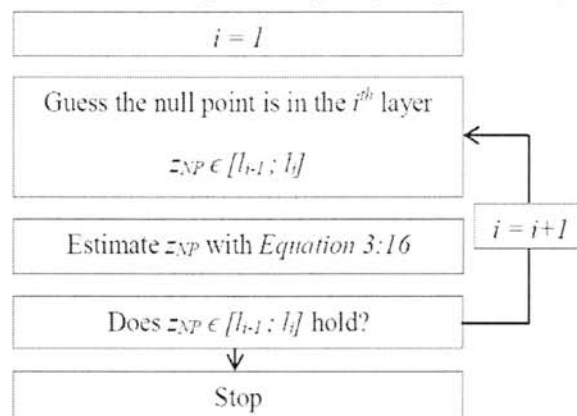
Τονίζεται ότι η τροπή υπό συγκράτηση ε_{T-Rstr} δημιουργεί θερμική τάση στον πάσσαλο, και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη στατική μελέτη.

Ουδέτερο σημείο

Ο Mimouni (2014) προτείνει ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση της ασυμπτωτικής θέσης του ουδέτερου σημείου (δηλαδή του σημείου που δεν μετακινείται υπό θερμικό φορτίο) του ε.π. σε πολυστρωματικό έδαφος, το οποίο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

$$z_{NP} = \frac{1}{2\pi D q_{si}} \left[\frac{\pi D^2}{4} q_b + \sum_{k=i-1}^N \pi D (l_k - l_{k-1}) q_{sk} + \pi D (l_{i+1} + l_i) q_{si} - P - \sum_{k=1}^{i-1} \pi D (l_k - l_{k-1}) q_{sk} \right]$$

Equation 3:16 Position of the null point for a pile in a layered soil



Σχήμα 4.31: Υπολογισμός ασυμπτωτικής θέσης ουδέτερου σημείου (null point) σε πολυστρωματικό έδαφος (Mimouni, 2014)

Ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση

Οι Saggu & Chakraborty (2014) ανέλυσαν αριθμητικά την απόκριση ενεργειακών πασσάλων τριβής και αιχμής σε χαλαρή και πυκνή άμμο υπό ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση 50 θερμικών κύκλων και υπό διάφορα μεγέθη σταθερής μηχανικής αξονικής φόρτισης στην κεφαλή των πασσάλων. Με τη βοήθεια της ανάλυσης αυτής διερευνήθηκε η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής.

1. Όταν οι πάσσαλοι υπόκεινται σε υψηλά μηχανικά φορτία κοντά στο όριο αστοχίας, τότε το μηχανικό φορτίο καθορίζει την απόκριση του πασσάλου και η φέρουσα ικανότητά (ultimate capacity) του μένει ανεπηρέαστη από τη θερμική φόρτιση. Σε χαμηλές ή μέτριες τιμές αξονικών φορτίων όμως, η θερμική διαστολή προκαλεί ανύψωσή των πασσάλων και κατά συνέπεια αναπτύσσονται δυνάμεις αρνητικής τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους κοντά στην κεφαλή του πασσάλου.

2. Οι αξονικές τάσεις αυξήθηκαν κατά τη θέρμανση του πασσάλου υπό θερμομηχανική φόρτιση σε σχέση με τις αξονικές τάσεις που αναπτύχθηκαν υπό μηχανική φόρτιση μόνο. Όταν όμως ο πάσσαλος υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση, η αξονική τάση κατά τη θέρμανση του πασσάλου μεταφέρθηκε στο περιβάλλον έδαφος.

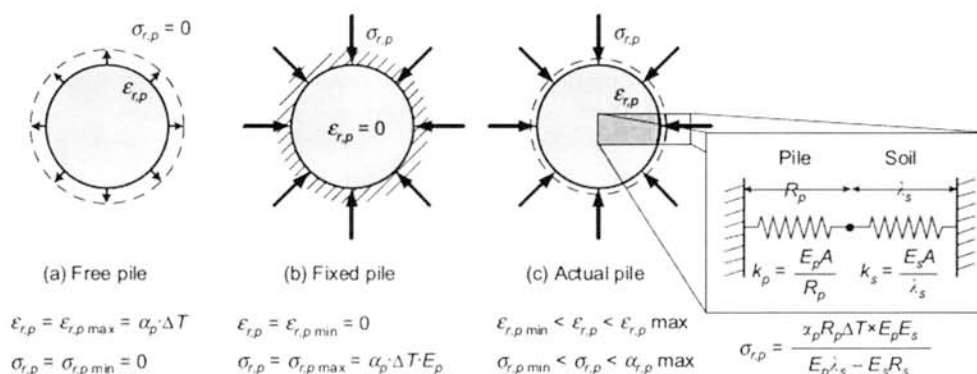
3. Η οριακή πλευρική αντίσταση πασσάλων σε χαλαρή άμμο δεν επηρεάστηκε σημαντικά υπό θερμομηχανική φόρτιση σε σχέση με αυτήν υπό μηχανική φόρτιση μόνο, ενώ για πασσάλους σε πυκνή άμμο αναμένεται να αυξηθεί.

Οι Di Donna & Laloui (2015) ανέπτυξαν 2 μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ένα για μονήρη ε.π. και ένα για ομάδα ε.π., προσομοιώνοντας 10 χρόνια ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης σε όρους εισαγωγής - εξαγωγής θερμότητας, υπό συνεχές μηχανικό φορτίο, ενώ οι συμπεριφορές του εδάφους και της διεπιφάνειας πασσάλου - εδάφους προσομοιώθηκαν με τη χρήση θερμοελαστικού - θερμοπλαστικού καταστατικού μοντέλου. Από τα αποτελέσματα, τα οποία επισημαίνεται ότι αφορούν τις μελετηθείσες περιπτώσεις, διαπιστώθηκε ότι αμφότερες οι θερμικά επαγόμενες μετακινήσεις και τάσεις, παρά το γεγονός ότι είναι αποδεκτές υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, είναι εντούτοις απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν στο γεωτεχνικό σχεδιασμό των ε.π..

Θερμικές ακτινικές τροπές ενεργειακού πασσάλου

Από την προαναφερθείσα αριθμητική ανάλυση των Saggu & Chakraborty (2014) διαπιστώθηκε ότι οι επιφερόμενες λόγω θερμομηχανικής φόρτισης ακτινικές τροπές ήταν μεγαλύτερες από εκείνες λόγω μηχανικής φόρτισης μόνο. Ωστόσο, δε δημιουργήθηκε κενό στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους.

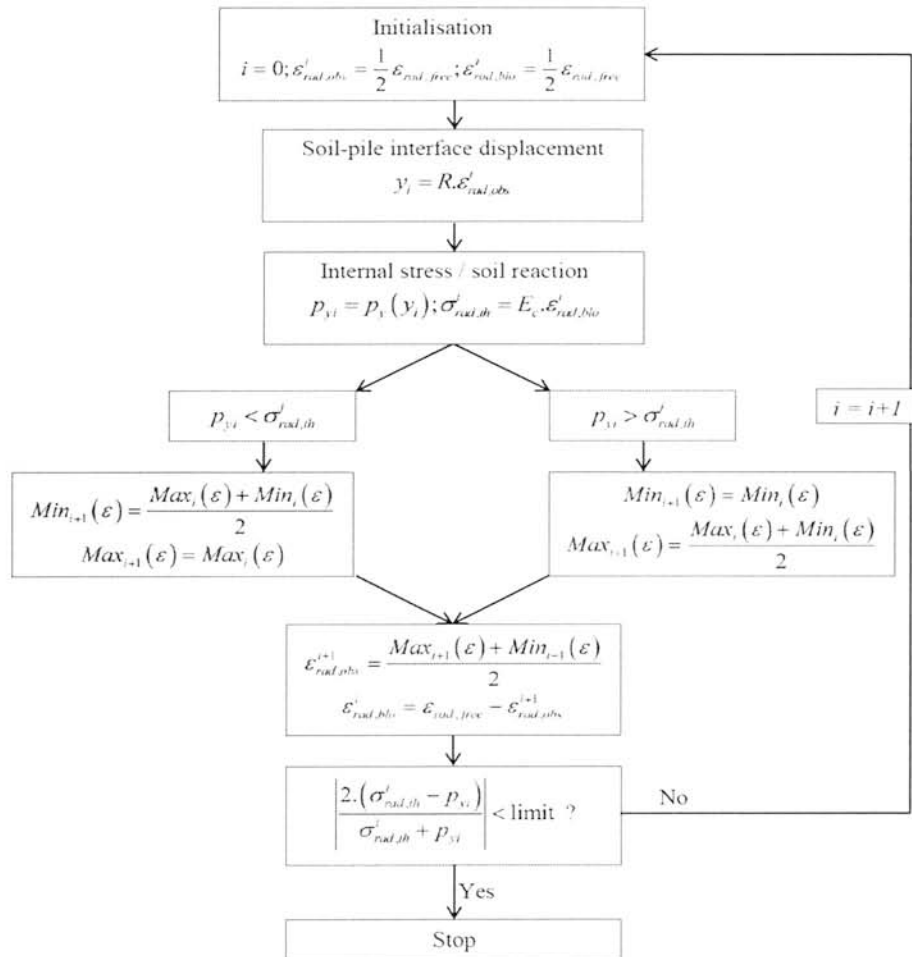
Οι Olgun et al. (2014c) διενέργησαν μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τον προσδιορισμό των ακτινικών θερμικών τροπών και τάσεων ενός ε.π. σε θέρμανση.



Σχήμα 4.32: Θερμικές ακτινικές τροπές και τάσεις πασσάλου (a) ελεύθερου να παραμορφωθεί (b) πλήρως περιορισμένου (c) υπό πραγματικές συνθήκες συγκράτησης (Olgun et al., 2014c)

Σημειώνεται ότι οι κύριοι θερμο-υδρο-μηχανικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τη φέρουσα ικανότητα και συμπεριφορά των ε.π. περιλαμβάνουν τη θερμική σκλήρυνση (thermal hardening) του εδάφους, τη θερμικά επαγόμενη ροή του νερού, την ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων και τις μεταβολές όγκου λόγω θερμικής στερεοποίησης. Επισημαίνεται ότι λόγω ελλιπούς κατανόησης της συμπεριφοράς εδάφους - πασσάλου στη διεπιφάνειά τους, οι θερμομηχανικές αλληλεπιδράσεις εδάφους - ε.π. δε λαμβάνονται καταλλήλως υπόψιν στο γεωτεχνικό σχεδιασμό του πασσάλου. Συμπεράνθηκε ότι η αύξηση λόγω θέρμανσης της αντίστασης πλευρικής τριβής ενεργειακού πασσάλου, που παρατηρήθηκε σε μικρής κλίμακας εργαστηριακές δοκιμές, δε μπορεί να εξηγηθεί πλήρως από τη μικρότερου μεγέθους αύξηση της πίεσης επαφής (contact pressure) στη διεπιφάνεια εδάφους - πασσάλου και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Ο Mimouni (2014) διαπιστώνει ότι η μονοδιάστατη ανάλυση απαιτεί ελευθερία ανάπτυξης θερμικών ακτινικών τροπών, οι οποίες όταν εμποδίζονται πλήρως, τότε η ενεργοποιούμενη αξονική θερμική διαστολή μπορεί να αυξηθεί έως 50 % και προτείνει μια μέθοδο για τον προσδιορισμό θερμικών ακτινικών τροπών ενεργειακού πασσάλου, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.33: Αλγόριθμος υπολογισμού πίεσης επαφής στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους (Mimouni, 2014)

Φαινόμενα ομάδας ενεργειακών πασσάλων

Την επίδραση μιας ομάδας προεντεταμένων υψηλής αντοχής (PHC: Pre-tensioned high strength concrete) ε.π. που υπόκεινται σε θερμική και αξονική φόρτιση, στη μηχανική συμπεριφορά του κάθε πασσάλου της ομάδας ξεχωριστά, διερεύνησαν οι Jeong et al. (2014), με τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, κάνοντας χρήση του λογισμικού προσομοίωσης COMSOL. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν σε σχετικά καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της ομάδας των ενεργειακών πασσάλων αφορά αλλαγές στα μεγέθη του αξονικού φορτίου και της καθίζησης των πασσάλων σε συνάρτηση με τις εξής μεταβλητές παραμέτρους :

1. την απόσταση μεταξύ των πασσάλων (pile spacing),
2. τη διάταξη (arrangement) των πασσάλων (3 x 3, 5 x 5),

3. τον τύπο του εδάφους,

4. τις συνθήκες στήριξης της αιχμής των πασσάλων (end restraint at pile toe).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την επίδραση του κάθε παράγοντα ξεχωριστά στη μηχανική συμπεριφορά κάθε πασσάλου της ομάδας είναι τα παρακάτω:

1. Όσον αφορά τη θερμικά επαγόμενη κατανομή αξονικού φορτίου και τις καθιζήσεις στην υπό αξονική φόρτιση ομάδα ε.π. σε αμμώδες έδαφος:

Το αξονικό φορτίο των πασσάλων μειώνεται με το βάθος, υποδεικνύοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος του αξονικού θλιπτικού φορτίου αναλαμβάνεται από την πλευρική τριβή (shaft friction). Λόγω της επίδρασης της ομάδας πασσάλων (group effect), το υψηλότερο φορτίο παρατηρείται στους γωνιακούς πασσάλους, ενώ ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά οι πλευρικοί και οι κεντρικοί πάσσαλοι. Κατά τη λειτουργία θέρμανσης της ανώδομής (κατά την ψύξη δηλαδή των πασσάλων), το αξονικό θλιπτικό φορτίο μειώνεται κατά μήκος του πασσάλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κύκλοι ψύξης (cooling cycles) προκαλούν συστολή του πασσάλου, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυστικής αξονικής δύναμης στο εσωτερικό του πασσάλου. Το αξονικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου μειώνεται ως αποτέλεσμα του περιορισμού στην προς τα κάτω (downward) μετακίνηση, ο οποίος επιβάλλεται από τον κεφαλόδεσμο. Η μείωση του αξονικού φορτίου δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του πασσάλου, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ψύξη του πασσάλου αυξάνει την πλευρική τριβή κατά μήκος του πάνω τμήματος του πασσάλου (upper part), ενώ τη μειώνει στο κάτω τμήμα (lower part) του. Το αξονικό φορτίο στην αιχμή του πασσάλου μειώνεται λόγω της προς τα πάνω κίνησης του πασσάλου κατά τη θερμική του συστολή. Σημαντική μείωση του αξονικού φορτίου παρατηρείται στον κεντρικό πάσσαλο, ενώ ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά οι πλευρικοί και οι γωνιακοί πάσσαλοι. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στον υψηλότερο περιορισμό στον οποίο υποβάλλεται ο κεντρικός πάσσαλος σε σχέση με τους εξωτερικούς πασσάλους λόγω της επίδρασης της ομάδας πασσάλων (group effect). Σχετικά με την επίδραση του θερμικού φορτίου στην καθίζηση των ε.π. σε μια ομάδα πασσάλων, παρατηρήθηκε ότι οι κύκλοι ψύξης (cooling cycles) αυξάνουν την καθίζηση της κεφαλής των πασσάλων, λόγω της συστολής (shortening) των πασσάλων. Η υψηλότερη καθίζηση παρατηρήθηκε στον κεντρικό πάσσαλο σε σχέση με τους εξωτερικούς πασσάλους σε

μια ομάδα πασσάλων, γεγονός που συνάδει με την υψηλότερη μείωση του αξονικού φορτίου στον κεντρικό πάσσαλο.

2. Όσον αφορά την επίδραση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων της ομάδας ε.π. σε αμμώδες έδαφος στη θερμομηχανική τους συμπεριφορά:

Για τον κεντρικό πάσσαλο, όταν η απόσταση μεταξύ των πασσάλων μειώνεται, το αξονικό φορτίο μειώνεται σε όλο το μήκος του πασσάλου και η μεγαλύτερη μείωση του αξονικού φορτίου παρατηρείται κοντά στην κεφαλή του πασσάλου. Για τους πλευρικούς και γωνιακούς πασσάλους, η μείωση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων αυξάνει τη δράση στην κεφαλή (head action) και το αξονικό φορτίο στο πάνω τμήμα του πασσάλου, αλλά μειώνει το αξονικό φορτίο στο κάτω τμήμα. Σχετικά με τις καθιζήσεις, η μείωση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων οδηγεί σε αύξηση της καθίζησης της κεφαλής του πασσάλου. Η αύξηση της καθίζησης του κεντρικού πασσάλου είναι μικρότερη σε σχέση με τους εξωτερικούς πασσάλους, γεγονός το οποίο σχετίζεται με τα διαφορετικά προφίλ αξονικού φορτίου του κεντρικού και των εξωτερικών πασσάλων.

3. Όσον αφορά την επίδραση της διάταξης (3 x 3, 5 x 5) της ομάδας ε.π. σε αμμώδες έδαφος στη θερμομηχανική τους συμπεριφορά:

Για τους κεντρικούς και τους πλευρικούς πασσάλους παρατηρούνται χαμηλότερα προφίλ αξονικού φορτίου στην 5 x 5 ομάδα ε.π. σε σχέση με την 3 x 3, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση του αριθμού των πασσάλων σε μια ομάδα ε.π. προκαλεί αύξηση της θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των γειτονικών πασσάλων της ομάδας. Ο βαθμός μείωσης (reduction rate) των αξονικών φορτίων στους κεντρικούς και πλευρικούς πασσάλους γενικά μειώνεται με το βάθος των πασσάλων. Αντιθέτως, παρατηρείται σημαντική αύξηση του αξονικού φορτίου κατά μήκος του γωνιακού πασσάλου στην 5 x 5 ομάδα ε.π.. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην αύξηση της προς τα πάνω θερμικά επαγόμενης μετακίνησης του κεφαλόδεσμου, η οποία προκαλείται από τη μείωση του αξονικού φορτίου στους κεντρικούς και πλευρικούς πασσάλους. Η καθίζηση που παρατηρείται στην 5 x 5 ομάδα ε.π. είναι υψηλότερη σε σχέση με την 3 x 3 και είναι σχετικά ομοιόμορφη και ανεξάρτητη της θέσης (κεντρικός, πλευρικός, γωνιακός) των πασσάλων.

4. Όσον αφορά την επίδραση του τύπου εδάφους στη θερμομηχανική συμπεριφορά της ομάδας ε.π.:

Τα παρατηρηθέντα προφίλ αξονικού φορτίου ε.π. σε άργιλο και σε άμμο ήταν παρόμοια, αν και οι κατανομές αξονικού φορτίου των πασσάλων σε άμμο ήταν σε γενικές γραμμές υψηλότερες από αυτές των πασσάλων σε άργιλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αμμώδη εδάφη έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) από τα αργιλικά, που σημαίνει ότι έχουν μικρότερο περιορισμό στη μετάδοση θερμότητας στο έδαφος, με αποτέλεσμα μικρότερη εφελκυστική δύναμη στον ε.π. υπό κύκλους ψύξης. Οι καθιζήσεις της κεφαλής των πασσάλων σε άργιλο είναι υψηλότερες από αυτές των πασσάλων σε άμμο. Ωστόσο το αποτέλεσμα αυτό δε σχετίζεται αποκλειστικά με τις θερμικές, αλλά και με τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφών και των πασσάλων.

5. Όσον αφορά την επίδραση των συνθηκών στήριξης της αιχμής των πασσάλων της ομάδας ε.π. σε αμμώδες έδαφος στη θερμομηχανική τους συμπεριφορά:

Για τον κεντρικό πάσσαλο, η παρουσία εδαφικής στρώσης έδρασης (bearing layer) της αιχμής του πασσάλου σε γενικές γραμμές αυξάνει τα προφίλ αξονικού φορτίου και ο βαθμός αύξησης του αξονικού φορτίου αυξάνεται με το βάθος. Για τους πλευρικούς και γωνιακούς πασσάλους, η επίδραση των συνθηκών στήριξης της αιχμής είναι ποσοτικά μικρότερη στο πάνω τμήμα του πασσάλου, ενώ γίνεται πιο έντονη στο κάτω τμήμα του. Η πιο δύσκαμπτη αντίσταση αιχμής (stiffer toe resistance) των πασσάλων αιχμής προκαλείται από το συνδυασμό του υψηλού φορτίου που μεταφέρεται από την κεφαλή του πασσάλου και τη μείωση (release) της θλίψης της αιχμής λόγω συστολής. Στους πασσάλους αιχμής παρατηρήθηκε περίπου 2,4 φορές μικρότερη καθίζηση σε σχέση με τους πασσάλους τριβής.

Τα συμπεράσματα της μελέτης συνοψίζονται ως εξής:

1. Η ψύξη των ε.π. προκαλεί θερμική συστολή στον πάσσαλο, με αποτέλεσμα τη μείωση του αξονικού φορτίου κατά μήκος του πασσάλου. Η μείωση αυτή του αξονικού φορτίου υποδεικνύει ότι οι πάσσαλοι βρίσκονται υπό εφελκυσμό (state of tension), γεγονός το οποίο συνδέεται με την αλλαγή στην αντίσταση πλευρικής τριβής (shaft resistance) του πασσάλου. Εν γένει, η επίδραση του κεφαλόδεσμου (pile cap effect) επιφέρει σημαντική μείωση στο αξονικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου, εξαιτίας του περιορισμού που επιβάλλει στην κάθετη μετακίνηση του.

2. Η παρατηρούμενη καθίζηση της κεφαλής του πασσάλου κατά τη διάρκεια των κύκλων ψύξης οδηγεί στη διακύμανση του μεταφερόμενου φορτίου (load transfer

variation) στους ε.π., υποδεικνύοντας ότι η ενεργοποιούμενη φέρουσα ικανότητα των πασσάλων αλλάζει με τη θερμοκρασία.

3. Όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών και τη διάταξη της ομάδας πασσάλων, παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος του θερμικά επιφερόμενου αξονικού φορτίου και της θερμικά επιφερόμενης καθίζησης της κεφαλής του πασσάλου επηρεάζεται σημαντικά από τη θέση του πασσάλου στη διάταξη της ομάδας πασσάλων καθώς και από τους υπόλοιπους παράγοντες.

4. Κατά την ψύξη των πασσάλων, παρατηρήθηκε μικρή αλλαγή στη μηχανική απόκριση των πασσάλων, η οποία είναι απίθανο να επιφέρει αστοχία σε έναν πασσάλο καθώς και να υπερβεί την οριακή κατάσταση λειτουργικότητάς του (serviceability limit state).

Οι Suryatriyastuti et al. (2015) διενέργησαν μια αριθμητική ανάλυση με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης ομάδας ε.π. στην απόκριση τους σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (cyclic interaction mechanisms in an energy pile group). Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση των απόκρισεων ενός μονήρους ε.π. και μιας ομάδας ε.π. με διαφορετικές συνοριακές συνθήκες στην κεφαλή τους, καθώς και διερευνάται η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων της ομάδας. Εφαρμόζοντας ένα ελαστο-πλαστικό καταστατικό μοντέλο ανακυκλιζόμενης φόρτισης (cyclic elastoplastic constitutive model) στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους, προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η επαναλαμβανόμενη αντιστροφή τάσεων (repetitive stress reversals) που προκαλεί η εναλλαγή θερμικών συστολών - διαστολών, παρατηρείται επιδείνωση της φέρουσας ικανότητας πασσάλου. Συστήνεται ότι η αλλαγή στη φέρουσα ικανότητα θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά κατά το μακροπρόθεσμο σχεδιασμό των ε.π., ακόμα κι αν οι κανονισμοί λαμβάνουν υπόψιν αυτό το ζήτημα. Οι γειτονικοί προς τους ε.π. απλοί πάσσαλοι, καθώς και το έδαφος στην περιοχή της ομάδας πασσάλων, υποβάλλονται εμμέσως στις επιδράσεις της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης (cyclic thermal effects) και έτσι προκειμένου να διατηρηθεί η στατική ισορροπία στο εσωτερικό της ομάδας, οι απλοί πάσσαλοι συμπεριφέρονται με αντίθετο από τους ε.π. τρόπο, γεγονός το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό ομάδας ε.π.. Επιπλέον, για τη βελτίωση της ανάλυσης της συμπεριφοράς ομάδας ε.π., συστήνεται η χρήση ενός μη-γραμμικού πλαστικού μοντέλου ανακυκλιζόμενης φόρτισης (nonlinear cyclic plasticity model) για τη συμπεριφορά του εδάφους. Επισημαίνεται ότι η διαφορά στην απόκριση των πασσάλων εξαρτάται

από την αρχική μηχανική φόρτιση, γεγονός που συνδέεται με τη θέση των πασσάλων μέσα στην ομάδα και τις επαγόμενες επιπτώσεις στη συμπεριφορά της ομάδας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι η διαστασιολόγηση μονηρους ενεργειακού πασσάλου είναι πιο συντηρητική σε σχέση με αυτή μιας ομάδας ενεργειακών πασσάλων και ότι τα φαινόμενα λόγω φόρτισης μακράς διάρκειας (long-term effects) και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενεργειακών και απλών πασσάλων μιας ομάδας πασσάλων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν.

Επίδραση παραμέτρων σχεδιασμού του γεωεναλλάκτη στη γεωτεχνική λειτουργία του ενεργειακού πασσάλου

Την επίδραση των διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων του γεωεναλλάκτη στην ενεργειακή και τη γεωτεχνική συμπεριφορά ενός ε.π. διερεύνησαν με αριθμητική προσομοίωση οι Batini et al. (2015). Η μελέτη αυτή πασουςιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς διερευνά απευθείας την επίδραση που έχουν στη γεωτεχνική απόδοση του ε.π. οι παράμετροι σχεδιασμού του γεωεναλλάκτη που καθορίζουν την θερμική του απόδοση, συνδέοντας κατ' αυτό τον τρόπο τα δύο ερευνητικά πεδία των ενεργειακών πασσάλων, αυτό της θερμικής με αυτό της θερμομηχανικής του συμπεριφοράς. Η διερεύνηση αφορά έναν πλήρους κλιμακας ε.π. ο οποίος εξετάστηκε σε λειτουργία θέρμανσης (κατά την οποία η υπερκατασκευή θερμαίνεται ενώ ο πάσσαλος ψύχεται) μόνο. Οι διαφορετικές σχεδιαστικές λύσεις αφορούν τις εξής παραμέτρους σχεδιασμού:

1. το σχηματισμό των σωλήνων απορρόφησης θερμότητας (U, διπλό U, W),
2. την αναλογία διαστάσεων θεμελίου (foundation aspect ratio $AR = H_{EP}/D_{EP}$), δηλαδή το μήκος H προς διάμετρο D του πασσάλου),
3. την παροχή του ρευστού στους σωλήνες (fluid flow rate), που αφορά μεταβολές στη διάμετρο του σωλήνα (pipe diameter variations) και στην ταχύτητα ροής του ρευστού (fluid velocity variations) και
4. τη σύνθεση του ρευστού μίγματος στους σωλήνες (operating fluid mixture composition).

Αναφορικά με τις παραμέτρους αυτές, η μελέτη καταλήγει στα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Ο σχηματισμός των σωλήνων αποδείχθηκε ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη θερμομηχανική συμπεριφορά των ε.π.. Η πιο επωφελής λύση, τόσο από

θερμοϋδραυλική όσο και από γεωτεχνική άποψη, αποδείχτηκε ότι είναι ο W σχηματισμός, καθώς αφενός είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης μετάδοσης θερμότητας (heat transfer rate) σε σχέση με τον απλό U σχηματισμό και σε ποσοστό ίδιας τάξης μεγέθους με το σχηματισμό διπλού U και αφετέρου ο σχηματισμός διπλού U είχε ως αποτέλεσμα την υψηλότερη ψύξη του σκυροδέματος με αντίστοιχα υψηλότερες κατανομές τάσεων και παραμορφώσεων.

2. Η λέπτυνση ή πάχυνση του ε.π. είχε ως αποτέλεσμα σημαντικά ποικίλες αποκρίσεις του πασσάλου στα θερμομηχανικά φορτία, αναλόγως την επίδραση που οι διαφορετικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των περιβαλλόντων εδαφικών στρωμάτων είχαν στην απόκριση της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου. Για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, οι κατανομές τάσεων και μετακινήσεων ήταν χαμηλότερες και πιο ομοιογενείς στους πιο κοντούς και παχείς πασσάλους, ενώ αντίθετα ήταν υψηλότερες και πιο ανομοιογενείς στους πιο μακρείς και λεπτούς.

3. Με τη μεταβολή στην παροχή και τη σύνθεση του ρευστού στους σωλήνες δεν παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες μεταβολές στις κατανομές των κατακόρυφων τάσεων, τροπών και μετακινήσεων του πασσάλου.

Οι συγγραφείς καταλήγοντας σημειώνουν ότι η επιλογή της καταλληλότερης σχεδιαστικής λύσης για το γεωεναλλάκτη των ε.π. θα πρέπει να γίνεται με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις του σχετιζόμενου περιβάλλοντος (related environment) σε σχέση με τις θερμοϋδραυλικές απαιτήσεις των αντλιών θερμότητας και λαμβάνοντας υπόψιν το μέγεθος των σχετιζόμενων γεωτεχνικών επιπτώσεων.

Πρόληψη παγώματος διεπιφάνειας ενεργειακού πασσάλου – εδάφους

Το πάγωμα του εδάφους λόγω ακραίας εξαγωγής θερμότητας κατά τη χειμερινή λειτουργία του συστήματος ε.π., είναι μια κατάσταση που πρέπει να αποφευχθεί, επειδή η ανάπτυξη παγετού μειώνει την πλευρική τριβή στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους και συνεπώς τη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Το ζήτημα της πρόληψης του παγώματος του εδάφους, μελέτησαν οι Loveridge et al. (2012). Εφαρμόζοντας τυπικά προφίλ απαιτήσεων θέρμανσης και δροσισμού σε αριθμητικά μοντέλα ε.π., με διαφορετικά μεγέθη και διάρκειες θερμικών φορτίσεων, εξέτασαν τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού στους σωλήνες και του εδάφους. Όπως σημειώνουν, η υπάρχουσα καθοδήγηση συστήνει ότι η θερμοκρασία δεν θα πρέπει να πέφτει κάτω από 0 °C, έχοντας σαν περιθώριο ασφαλείας τους 2 °C. Ωστόσο

εκτιμούν ότι η προσέγγιση αυτή είναι πολύ συντηρητική και θα οδηγήσει σε αποτυχία το σχεδιασμό για τη βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους υπολογισμούς της μελέτης αυτής, ακόμα και για θερμοκρασία ρευστού στους σωλήνες $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, η επιφάνεια του πασσάλου παραμένει τουλάχιστον $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ πάνω από το πάγωμα του εδάφους. Αυτό αποδίδεται αφενός στο ότι πάντα υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας έως και $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανάμεσα στο ρευστό στους σωλήνες και στην επιφάνεια του πασσάλου και αφετέρου στο ότι οι βραχυπρόθεσμες ακραίες ανταλλαγές θερμότητας δεν επαρκούν σε διάρκεια για να επηρεάσουν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του πασσάλου, επειδή το σκυρόδεμα μονώνει αποτελεσματικά το έδαφος από τέτοιες ακραίες διακυμάνσεις. Το μέγεθος της θερμοκρασιακής ρυθμιστικής επίδρασης (thermal buffering effect) του σκυροδέματος εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του εδάφους, το μέγεθος του πασσάλου, τη διάρκεια των εφαρμοζόμενων θερμοκρασιών και τη θερμική αντίσταση του πασσάλου, η οποία με τη σειρά της, εκτός από τις θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος, εξαρτάται από τον αριθμό και το σχηματισμό των σωλήνων και από τις συνθήκες ροής του ρευστού στους σωλήνες. Συμπερασματικά, συστήνεται για ε.π. μεσαίας και μεγάλης διαμέτρου (π.χ. 600mm) η θερμοκρασία ρευστού στους σωλήνες να μην πέφτει κάτω από $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για ε.π. μικρότερης διαμέτρου (π.χ. 300mm) εκτιμάται ότι κατάλληλο είναι το όριο των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Σημειώνεται επίσης ότι δεν είναι απαραίτητο κάποιο περιθώριο ασφαλείας, εκτός αν το σύστημα ελέγχου του συστήματος για την αποφυγή παραβίασης των ορίων θερμοκρασίας το απαιτεί.

Ωστόσο, ο Brandl αναφέρει ότι ενώ η θερμοκρασία ρευστού των $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι δυνατή, στην πράξη αυτό μπορεί να ενέχει μακροπρόθεσμες επιζήμιες επιπτώσεις στο σκυρόδεμα και σημειώνει ότι το όριο των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι οικονομικό (Boranyak, 2013).

Επίδραση θερμικά αναπτυσσόμενης πίεσης πόρων εδάφους στη μακροπρόθεσμη λειτουργικότητα ενεργειακού πασσάλου

Την επίδραση θερμικά αναπτυσσόμενης πίεσης του νερού των πόρων (thermally induced pore water pressure build) του εδάφους στη φέρουσα ικανότητα μονήρους ε.π. σε χρονικό πλαίσιο 40 χρόνων, διερεύνησε με θερμο-υδρο-μηχανική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ο Mimouni (2014). Ο πάσσαλος υπεβλήθη σε διαφορετικά μηχανικά φορτία επιλεγμένα βάσει της προσομοιωμένης καμπύλης φορτίου -

καθίζησης (modelled load-settlement curve). Δοκιμάστηκαν 2 περιπτώσεις υπό συνθήκες στράγγισης με διαπερατότητες (permeabilities) $10 - 16 \text{ m}^2$ και $10 - 18 \text{ m}^2$, καθώς και η περίπτωση πλήρους στράγγισης ως σημείο αναφοράς, όπου οι μηχανισμοί μεταφοράς φορτίου καθορίζονται μόνο από τη θερμική διαστολή του εδάφους και του σκυροδέματος του πασσάλου (και όχι από την πίεση πόρων). Διαπιστώθηκε ότι ετήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις μεταξύ $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ και $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ επέφεραν στη διεπιφάνεια εδάφους - πασσάλου μικρές διακυμάνσεις πίεσης πόρων $\pm 4 \text{ kPa}$ για διαπερατότητα $10 - 16 \text{ m}^2$ και σημαντικές διακυμάνσεις περίπου $\pm 40 \text{ kPa}$ για διαπερατότητα $10 - 18 \text{ m}^2$. Η εξέλιξη των μέγιστων φερουσών ικανοτήτων (ultimate bearing capacities) καθορίζεται από τη διαστολή του εδάφους και του σκυροδέματος για διαπερατότητες $10 - 16 \text{ m}^2$, όπου αυξάνονται κατά τη θέρμανση και μειώνονται κατά την ψύξη του πασσάλου. Αντίστροφα, στην περίπτωση διαπερατότητας $10 - 18 \text{ m}^2$, όπου καθορίζονται από την πίεση πόρων, οι μέγιστες φέρουσες ικανότητες μειώνονται κατά τη θέρμανση και αυξάνονται κατά την ψύξη. Κατά συνέπεια, η μακροπρόθεσμη εξέλιξη της λειτουργικότητας του πασσάλου διαφέρει ακόμα κι αν τα θερμικά φορτία είναι τα ίδια και παρατηρούνται ανεξέλεγκτες καθιζήσεις σε εδάφη με πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Επιπλέον, συγκρίνοντας αντιστάσεις σχεδιασμού (design resistances) υπολογισμένες βάσει Ευρωκώδικα 7 με την ανάλυση στην εν λόγω μελέτη, διαπιστώθηκε ότι εκτός των χαμηλής διαπερατότητας εδαφών, ο κώδικας είναι συντηρητικός για το σχεδιασμό των ε.π..

Λογισμικό γεωτεχνικού σχεδιασμού ενεργειακών πασσάλων Thermo-Pile

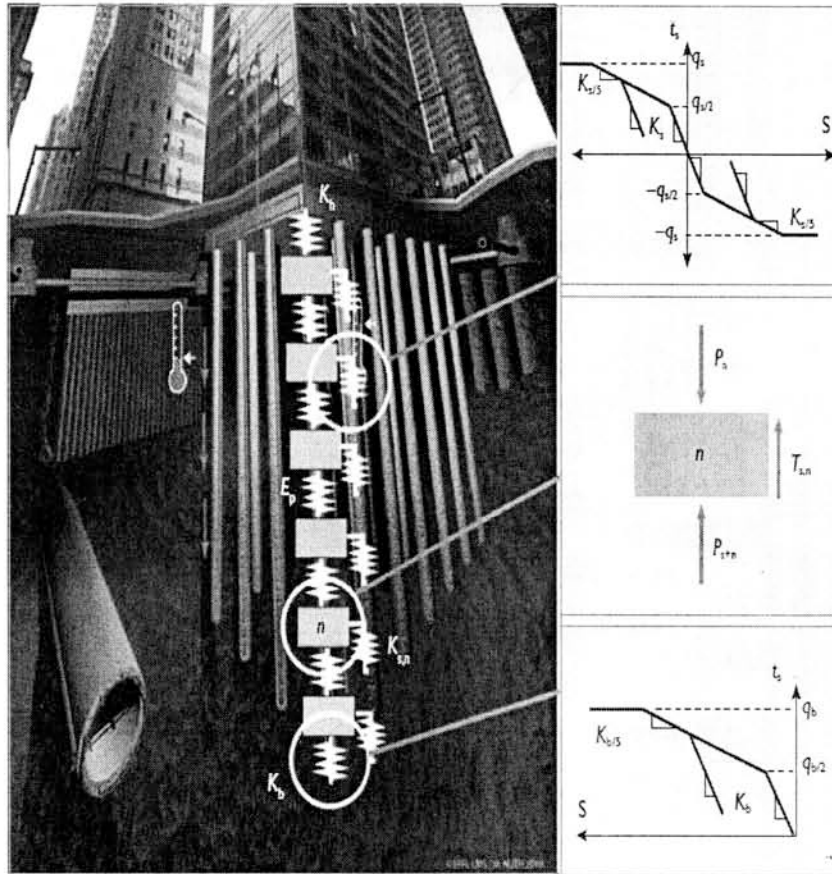
Οι Peron et al. (2011) επισημαίνοντας την απουσία μεθοδολογίας γεωτεχνικού σχεδιασμού των ε.π., σημειώνουν ότι αντί του υπολογισμού των θερμικά επαγόμενων αλλαγών στη στατική συμπεριφορά του πασσάλου, η διαστασιολόγηση των ε.π. βασίζεται σε εμπειρικές εκτιμήσεις (Boënnec, 2009, as cited in Peron et al., 2011) και η συνήθης πρακτική είναι η εφαρμογή ενός μεγαλύτερου από αυτόν που εφαρμόζεται στους συμβατικούς πασσάλους συντελεστή ασφαλείας.

Ένα αριθμητικό εργαλείο για το γεωτεχνικό σχεδιασμό των ε.π., το Thermo-Pile, αναπτύχθηκε από το Laboratory of Soil Mechanics, EPFL, Lausanne, στη βάση πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων (Knellwolf et al., 2010, as cited in Laloui & Di Donna, 2011; Peron & Laloui, 2010; Peron et al., 2011). Το

εργαλείο αυτό είναι βασισμένο στη load transfer approach (Coyle & Reese, 1966, as cited in Peron et al., 2011) και επικυρωμένο στη βάση των πειραμάτων του EPFL και του Lambeth College. Μέσω διακριτοποίησης του πασσάλου σε τμήματα, δίνεται η δυνατότητα θεώρησης πολλών εδαφικών στρωμάτων με διαφορετικές ιδιότητες και διακύμανσης των ιδιοτήτων με το βάθος (Peron & Laloui, 2010; Laloui & Di Donna, 2011). Με τη χρήση Java, μια επαναληπτική διαδικασία, με την οποία υπολογίζονται οι θερμομηχανικές τάσεις και τροπες στο εσωτερικό του πασσάλου όταν υποβάλλεται σε αξονική μηχανική και θερμική φόρτιση συγχρόνως, έχει ενσωματωθεί στον κώδικα (Peron & Laloui, 2010; Laloui & Di Donna, 2011). Το λογισμικό βασίζεται στις εξής παραδοχές (Peron & Laloui, 2010; Laloui & Di Donna, 2011):

- Μόνο οι αξονικές παραμορφώσεις του πασσάλου λαμβάνονται υπόψη.
- Η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής προσομοιώνεται με ελατήρια και χαρακτηρίζεται από ελαστο-πλαστική συμπεριφορά, ενώ ο πάσσαλος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά.
- Οι καμπύλες πλευρικής τριβής - πλευρικής μετακίνησης (shaft friction - shaft displacement curves), τάσεων κεφαλής/μετακινήσεων κεφαλής (head stress/head displacement) και τάσεων αιχμής/τροπών αιχμής (base stress/base strain displacements) είναι αυτές που προτείνονται από τους Frank & Zhao (1982).
- Οι ανοδικές μετακινήσεις θεωρούνται θετικές και οι θλιπτικές τάσεις αρνητικές.

Λαμβάνει εδαφικές παραμέτρους σαν εισαγωγή δεδομένων και συνδέει τη θερμοκρασιακή διακύμανση στο έδαφος με τη θερμομηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδάφους – ε.π. (Laloui & Di Donna, 2011). Με το εργαλείο αυτό προσδιορίζονται τα μεγέθη της αντίστασης πλευρικής τριβής, της αντίστασης αιχμής, ενώ η καθοριστικής σημασίας για τη θερμική φόρτιση αλληλεπίδραση πασσάλου - ανωδομής λαμβάνεται επίσης υπόψη (Peron et al., 2011). Υπολογίζει επιτυχώς τις τάσεις και τις τροπές στο εσωτερικό του πασσάλου λόγω μηχανικής και θερμικής φόρτισης, ενώ μπορεί να καθορίσει τις μετατοπίσεις και το φορτίο που μεταφέρεται στο εσωτερικό του πασσάλου κάτω από συνθήκες θερμομηχανικής φόρτισης (Laloui & Di Donna, 2011). Εκτιμάται ότι το εργαλείο παρέχει επαρκή ακρίβεια για πρακτικές εφαρμογές (Peron et al., 2011).



Σχήμα 4.34: Load transfer method (Laloui & Di Donna, 2011)

Οι Peron & Laloui (2010) επισημαίνουν ότι στο σχεδιασμό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα προσέγγισης της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου κατά τη θέρμανση και η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων κατά τη ψύξη αντίστοιχα. Η μεθοδολογία που προτείνουν για το σχεδιασμό των ε.π. διατυπώνεται ως ακολούθως:

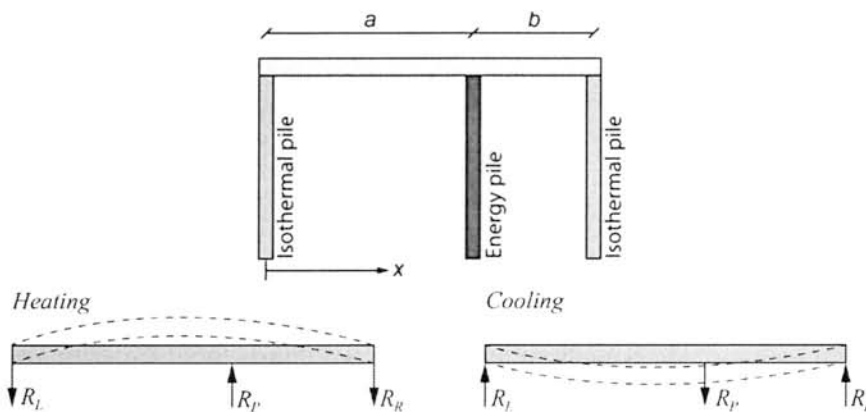
Καταρχάς, το σύστημα των ε.π. διαστασιολογείται με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις της ανωδομής. Από τη διαστασιολόγηση αυτή προκύπτει ένας αριθμός πασσάλων με συγκεκριμένο συνολικό μήκος και θερμοκρασιακά προφίλ κατά μήκος των πασσάλων. Κατόπιν ελέγχεται η γεωτεχνική επάρκεια της λύσης αυτής και σε περίπτωση μη επάρκειας το σύστημα των πασσάλων επαναδιαστασιολογείται χρησιμοποιώντας το Thermo-Pile.

Οι Mimouni & Laloui (2013) διερεύνησαν τους λόγω θερμοκρασιακών διακυμάνσεων επαγόμενους μηχανισμούς ανάληψης φορτίου (bearing mechanisms) σε μονήρεις ε.π. υπό μονοτονική (μόνο θέρμανση ή μόνο ψύξη) θερμική φόρτιση. Οι μηχανισμοί που προκαλούν τις διακυμάνσεις και ανακατανομές των

ενεργοποιούμενων φέρουσων αντιδράσεων κατά μήκος των πασσάλων ταυτοποιούνται χρησιμοποιώντας το λογισμικό Thermo-Pile. Η μελέτη χρησιμοποιεί τη load-transfer approach (Seed and Reese, 1957; Coyle and Reese, 1966, as cited in Mimouni & Laloui, 2013) για να εκτιμηθούν οι φέρουσες ικανότητες των πασσάλων υπό μηχανική φόρτιση. Βάσει του απλοποιητικού μοντέλου των Bourne-Webb et al. (2009), ο πάσσαλος χωρίζεται σε 2 τμήματα που οριοθετούνται από το ουδέτερο σημείο, το οποίο δε μετακινείται υπό θερμοκρασιακή διακύμανση. Πάνω από το ουδέτερο σημείο ο πάσσαλος υποβάλλεται σε ανοδικές μετακινήσεις όταν θερμαίνεται και διαστέλλεται και σε καθοδικές όταν ψύχεται και συστέλλεται, ενώ αντίστροφα, το τμήμα του πασσάλου κάτω από το ουδέτερο σημείο καθιζάνει όταν θερμαίνεται και ανυψώνεται όταν ψύχεται. Συμπεραίνεται ότι επειδή η κεφαλή του πασσάλου ανυψώνεται όταν θερμαίνεται, το φαινόμενο της συγκράτησης (capping effect) από την υπερκείμενη κατασκευή της κεφαλής του πασσάλου επιφέρει ένα επιπλέον φορτίο, το οποίο πρέπει να εξισορροπηθεί από την ενεργοποιούμενη αντίδραση και ως εκ τούτου, η συνολική ενεργοποιούμενη αντίδραση αυξάνεται όταν ο πάσσαλος θερμαίνεται. Αντιστρόφως, κατά την ψύξη του πασσάλου, οι καθιζήσεις της κεφαλής του επιφέρουν μια αντίδραση ανοδικού τραβήγματος από την υπερκείμενη κατασκευή, που αφαιρεί από τον πάσσαλο ένα τμήμα του μηχανικού του φορτίου, με αποτέλεσμα η συνολική ενεργοποιούμενη αντίδραση του πασσάλου να μειώνεται όταν ψύχεται. Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στις διακυμάνσεις των λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών ενεργοποιούμενων αντιδράσεων των πασσάλων, εκτιμάται ότι είναι απίθανο να επιφέρουν αστοχία, ακόμα κι αν προσεγγιστεί η μέγιστη φέρουσα ικανότητα (ultimate bearing force) του πασσάλου. Αυτό αποδίδεται στο ότι τουλάχιστον ένα σημείο του πασσάλου - το ουδέτερο - παραμένει σταθερό, εμποδίζοντας έτσι υπερβολικές καθιζήσεις της κεφαλής για το εύρος των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων που διερευνώνται. Από τη μελέτη 3^{ov} απλών αντιπροσωπευτικών για τη σχέση υπερδιαστασιολόγησης - λειτουργικότητας περιπτώσεων πασσάλου τριβής, πασσάλου τριβής - αιχμής και πασσάλου αιχμής, συμπεράνθηκε ότι η υπερδιαστασιολόγηση των ε.π. σε σύγκριση με τους συμβατικούς, μέσω της αύξησης του συντελεστή ασφαλείας των ε.π., δεν παρέχει καλύτερη λειτουργικότητα, ενώ μπορεί να αυξήσει σημαντικά τα κόστη.

Ο Mimouni (2014), επισημαίνοντας τη σημασία των μηχανισμών ανακυκλιζόμενης φόρτισης και παρατηρώντας ότι το Thermo-Pile χρησιμοποιείται

για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας πασσάλων υπο μονοτονικά θερμικά φορτία, ενσωμάτωσε μια ακολουθία θερμικής αποφόρτισης (thermal unloading path) στον κώδικα του Thermo-Pile, επικυρώνοντάς το στη βάση των πειραμάτων του EPFL και του Lambeth College. Ενσωμάτωσε επίσης το μοντέλο δοκού Euler-Bernoulli για τον προσδιορισμό φαινομένων ομάδας ε.π., δίνοντας έτσι στο λογισμικό τη δυνατότητα ανάλυσης δοκών θεμελιωμένων σε ε.π. (piled beams).



Σχήμα 4.35: Παραμόρφωση δοκού θεμελιωμένης σε 2 ισοθερμικούς στα άκρα και έναν ενεργειακό μεταξύ τους (Mimouni, 2014)

4.2.2. Επίδραση θερμικής φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά και ιδιότητες του εδάφους

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στις οποίες η απόκριση του εδάφους σε θερμική φόρτιση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η απόθεση στο έδαφος πυρηνικών αποβλήτων (Dupray et al., 2013, as cited in Di Donna & Laloui, 2015), τα θαμμένα στο έδαφος καλώδια υψηλής τάσης (Boggs, 1982, as cited in Di Donna & Laloui, 2015), τα εργοστάσια δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ sequestration plant) (Ochsner, 2008, as cited in Di Donna & Laloui, 2015) και βέβαια τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος (Burger et al., 1985, as cited in Di Donna & Laloui, 2015) και οι ενεργειακές γεωκατασκευές όπως οι ε.π.. Η θερμική φόρτιση του εδάφους μπορεί συνεπώς να επιβάλλεται από τη λειτουργία οποιασδήποτε από τις παραπάνω εφαρμογές και για το λόγο αυτό η εργασία δεν εμβαθύνει στο ζήτημα και περιορίζεται σε μια ενδεικτική αναφορά, καθώς αν και συνδέεται άμεσα, εντούτοις είναι ξεχωριστό σε σχέση με τους ε.π. πεδίο έρευνας με πλούσια βιβλιογραφία.

Στη βιβλιογραφία για τη θερμομηχανική συμπεριφορά των εδαφών υπάρχουν πολλές πειραματικές έρευνες εργαστηριακής κλίμακας (Abuel-Naga et al., 2007; Baldi et al., 1991; Boudali et al., 1994; Burghignoli et al., 2000; Cekerevac and Laloui, 2004; Hueckel and Baldi, 1990; as cited in Di Donna & Laloui, 2015) καθώς και μελέτες για την ανάπτυξη καταστατικών μοντέλων προσομοίωσης της θερμομηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών (Hong et al., 2013, as cited in Di Donna & Laloui, 2015). Οι ε.π., κατά τον κύκλο ζωής τους επιβάλλουν σημαντικές μεταβολές θερμοκρασίας στο περιβάλλον έδαφος, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τις ιδιότητές του και με βάση τα εμπειρικά δεδομένα, η θερμοκρασία του εδάφους κοντά στους ε.π. είναι μεταξύ 0 και 2°C το χειμώνα και μεταξύ 30 και 40°C το καλοκαίρι (Laloui & DiDonna, 2011). Η θέρμανση αργιλικών εδαφών σε συνθήκες στράγγισης προκαλεί είτε συστολή είτε διαστολή του όγκου του εδάφους, ανάλογα με το βαθμό στερεοποίησης του (Baldi et al., 1988; Campanella and Mitchell, 1968; Demars and Charles, 1982; Desideri, 1988; Plum and Esrig, 1969; Burghignoli et al., 2000; Cekerevac and Laloui, 2004; Milizia no, 1992; Towhata et al., 1993; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Θερμοκρασιακή εξάρτηση της γωνίας εσωτερικής τριβής έχει παρατηρηθεί στην καολινική άργιλο (Cekerevac and Laloui, 2004; as cited in Laloui & DiDonna, 2011), ενώ δεν ισχύει το ίδιο για σμεκτιτικές ή ιλλιτικές αργίλους (Hueckel and Baldi, 1990; Hueckel and Pellegrini, 1989; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Οι επιπτώσεις των θερμικών μεταβολών της γωνίας εσωτερικής τριβής εξαρτώνται έντονα από το ιστορικό της θέρμανσης και της φόρτισης (Hueckel et al., 2011; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Συγκεκριμένα, το επίπεδο της τάσης στο οποίο πραγματοποιείται η θέρμανση, συμπεριλαμβανομένου και του συντελεστή υπερστερεοποίησης (OCR) του εδάφους, επηρεάζει την επακόλουθη μεταβολή της αντοχής του (Hueckel et al., 2009; Laloui and François, 2009; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Αναφορικά με την παραμορφωσιμότητα του εδάφους, είναι αποδεδειγμένο ότι η θέρμανση προκαλεί αρχικά σκλήρυνση (stiffening) του εδάφους, με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, το οποίο μειώνεται σταδιακά με την αυξάνουσα εφαρμοζόμενη τάση (Burghignoli et al., 2000; Cekerevac and Laloui, 2004; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Σχετικές μελέτες έχουν επίσης εκπονηθεί πάνω στο θέμα της θερμικής διαρροής και την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή της πίεσης προ-στερεοποίησης (Hueckel and Baldi, 1990; Laloui and Cekerevac, 2003; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Το όριο διαρροής συρρικνώνεται με

αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της πίεσης προ-στερεοποίησης και ο νόμος που διέπει τη ροή εξαρτάται από τη θερμοκρασία (Laloui & DiDonna, 2011). Στη βάση αυτών των αποτελεσμάτων, αρκετά καταστατικά μοντέλα έχουν προταθεί, τα οποία μπορούν να αναπαράγουν τη θερμομηχανική συμπεριφορά των εδαφών όπως περιγράφηκε (Hueckel and Borsetto, 1990; Modaressi and Laloui, 1997; as cited in Laloui & DiDonna, 2011). Πιο πρόσφατα μάλιστα, προτάθηκε ένα προηγμένο καταστατικό μοντέλο, το ACMEG-T, για περιβαλλοντική εδαφομηχανική και θερμικά φαινόμενα (Laloui και François, 2009; as cited in Laloui & DiDonna, 2011).

4.2.3. Πεδία μελλοντικής έρευνας θερμομηχανικής συμπεριφοράς ενεργειακών πασσάλων

Οι ενεργειακοί πάσσαλοι, ως σχετικά νέα τεχνολογία, αλλά και ως σύστημα με διττή στατική και θερμική λειτουργία, ενέχουν πληθώρα γεωτεχνικών ζητημάτων προς μελλοντική διερεύνηση, τα οποία αποτελούν πρόκληση για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Επισημαίνεται δε από πολλούς ερευνητές (Bourne-Webb et al., 2009; Bourne-Webb et al., 2012; Laloui et al., 2006; Laloui & Nuth, 2009; Laloui & DiDonna, 2011; Ng et al., 2014; Peron et al., 2011; Suryatriyastuti et al., 2015; Yavari et al., 2014) ότι η υπάρχουσα βιβλιογραφία πάνω σε αυτά τα ζητήματα είναι σχετικά περιορισμένη.

Οι Bourne-Webb et al. (2009) επισημαίνουν την ανάγκη κατανόησης της διακύμανσης των θερμικά ενεργοποιούμενων αντιδράσεων στον ε.π. σε μακροπρόθεσμα χρονικά πλαίσια και κατά πόσο υπάρχουν συσσωρευτικά φαινόμενα, τα οποία παραβλέφθηκαν στο πείραμα του Lambeth College. Θεωρούν επίσης ότι θα πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης στη συμπεριφορά πασσάλου φορτισμένου μηχανικά σε ποσοστό μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να αναλάβει η αντίσταση πλευρικής τριβής, καθώς με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαν να ανιχνευθούν τυχόν επιβλαβείς επιπτώσεις της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης στην αντίσταση πλευρικής τριβής.

Οι Bourne-Webb et al. (2012) σημειώνουν ότι απαιτούνται επιπλέον πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις που να εξετάσουν την επίδραση της συγκράτησης των άκρων και τη διακύμανση της αντίστασης πλευρικής τριβής, στη βάση των οποίων να επικυρωθεί το προαναφερθέν προτεινόμενο πλαίσιο μηχανισμών θερμομηχανικής απόκρισης ε.π..

Οι Bodas Freitas et al. (2013) υποστηρίζουν ότι οι παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό συγκράτησης του πασσάλου έναντι της θερμικής του διαστολής απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση και ότι μελλοντικές έρευνες θα εστιάσουν στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους και την επιρροή των θερμικών συνοριακών συνθηκών.

Οι Wang et al. (2013) σημειώνουν ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την κατανόηση της συμπεριφοράς του πασσάλου σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες.

Ο Kramer (2013) εκτιμάει ότι η θερμομηχανική συμπεριφορά των ε.π. είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και θα πρέπει να διερευνηθεί λεπτομερικά, ενώ επισημαίνει ότι απαιτείται επιπλέον έρευνα για τον υπολογισμό των θερμικών τροπών και τάσεων σε διαφορετικές διατομές και βαθμούς συγκράτησης των άκρων πασσάλων, καθώς και ότι η προσομοίωση διαφορετικών επιπέδων φόρτισης του εδάφους είναι ένα σημαντικό προς διερεύνηση ζήτημα.

Οι Mimouni and Laloui (2013) επισημαίνουν ότι χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να εκτιμηθεί αν είναι σημαντικές ή όχι οι διαφορές ανάμεσα στις 2 μεθόδους σχεδιασμού αφενός με και αφετέρου χωρίς την ακαμψία της κεφαλής του πασσάλου, όπου η αλληλεπίδραση πασσάλου - κατασκευής αγνοείται προκειμένου να μεγιστοποιηθούν οι μετακινήσεις της κεφαλής του πασσάλου και έτσι ο σχεδιασμός να παραμείνει συντηρητικός.

Οι Olgun et al. (2014c) αναφέρουν ότι διενεργούνται έρευνες για τον προσδιορισμό των μηχανισμών που διέπουν τη συμπεριφορά φορτίου - μετακίνησης καθώς και τις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας και αστοχίας των ε.π..

Οι Akrouch et al. (2014) υποστηρίζουν ότι η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά και ο προσδιορισμός του βαθμού ερπυσμού των ε.π. απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση σε διαφορετικά εδαφικά προφίλ και σε συνθήκες θέρμανσης και ψύξης.

Οι Salciarini et al. (2014) αναφέρουν ότι βρίσκονται σε εξέλιξη διερευνήσεις για την εκτίμηση της επιρροής των ανελαστικών εδαφικών παραμορφώσεων, της επίδρασης της ανάπτυξης και αποανάπτυξης (development and dissipation) υπερπίεσης πόρων υπό συζευγμένη θερμομηχανική φόρτιση και την επίδραση της ανακυκλιζόμενης θερμικής φόρτισης στην απόκριση των ε.π..

Οι Olgun and McCartney (2014) επισημαίνουν τα εξής ζητήματα που χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης:

1. Ενεργειακοί πάσσαλοι σε πολυστρωματικά εδάφη, κανονικώς στερεοποιημένες αργίλους και σε εδαφικά υποστρώματα χαμηλής αντοχής (non-end bearing conditions).

2. Προσδιορισμός καμπυλών T - z, Q - z, p - y σε μη ισοθερμικές συνθήκες.

3. Απόκριση ε.π. σε ανακυκλιζόμενη θερμική φόρτιση, ειδικά σε πολυστρωματικά εδάφη.

4. Η πλευρική φόρτιση του ε.π. θεωρείται ότι είναι ένα ενδιαφέρον ζήτημα, καθώς εκτιμάται ότι η θέρμανση του επιφέρει σημαντική αύξηση στην πλευρική φέρουσα ικανότητα, ενώ η ψύξη μειώνει την αλληλεπίδραση πασσάλου- εδάφους κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Όσον αφορά τη θερμομηχανική συμπεριφορά των εδαφών, εντοπίζουν τα παρακάτω προς διερεύνηση ζητήματα:

1. Χρήση αποβαλλόμενης από κτίρια κατοικιών και βιομηχανικές εγκαταστάσεις θερμότητας για τη βελτίωση της συμπεριφοράς των εδαφών (Coccia & McCartney, 2013, as cited in Olgun & McCartney, 2014).

2. Προσδιορισμός του δυνατού επιπέδου βελτίωσης των εδαφικών ιδιοτήτων για συγκεκριμένη θερμοκρασιακή μεταβολή.

3. Υπολογισμός του προσωρινού και του μόνιμου τμήματος των θερμικά επιφερόμενων μεταβολών στον όγκο των εδαφών, καθώς η συμπεριφορά των εδαφών είναι ελαστο-πλαστική.

4. Εκτίμηση των μεταβολών στα μεγέθη του όγκου, της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και της δυσκαμψίας των εδαφών, αλλά και των μεταβολών στην υδραυλική και θερμική αγωγιμότητα που προκαλούνται από μεταβολές του όγκου.

Ο Mimouni (2014) εκτιμάει ότι κάποια ζητήματα έχουν διερευνηθεί αμυδρά, όπως η επι τόπου (in situ) εξέλιξη της διεπιφάνειας εδάφους - πασσάλου και των φερουσών ικανοτήτων ε.π.. Παρατηρεί ότι οι επι τόπου μακροπρόθεσμες μετακινήσεις των ε.π. δεν είναι διαθέσιμες επειδή δεν έχουν καταγραφεί επι τόπου μακροπρόθεσμες μετακινήσεις έως τώρα. Τα διδιάστατα φαινόμενα (two-dimensional effects) θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω, καθώς θεωρεί ότι οι ακτινικές θερμικές τροπές έχουν σημαντική επίδραση στην αξονική θερμομηχανική απόκριση των ε.π.. Για το πειραματικό πεδίο της συγκεκριμένης μελέτης όπου οι ε.π. εξετάστηκαν σε θέρμανση μόνο, υποστηρίζει ότι αξίζει να διερευνηθεί η απόκριση τους σε ψύξη, καθώς αναμένεται η ψύξη να επιφέρει μείωση στην αντίσταση πλευρικής τριβής.

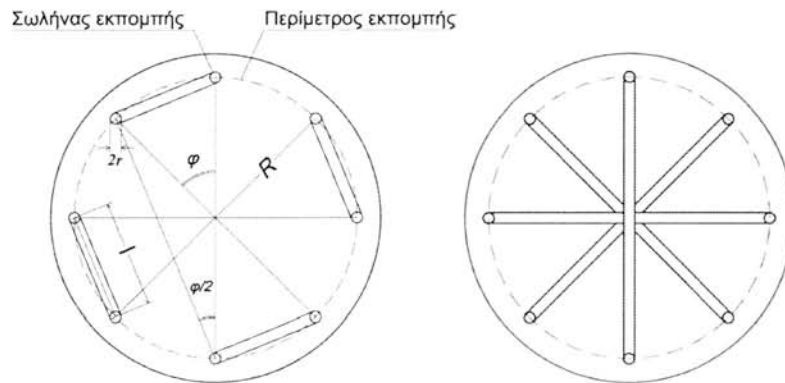
Επισημαίνοντας τη δυσκολία διερεύνησης ε.π. μεγάλης διαμέτρου λόγω της ανομοιογένειας της θερμοκρασίας στη διατομή τους, εκτιμάει ότι θα ήταν χρήσιμη η μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία στη διατομή των πασσάλων, καθώς και στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους, αν και τονίζεται η δυσκολία (challenging) να γίνει αυτό σε δοκιμές πεδίου. Προτείνει επίσης την οργανομέτρηση για ακαδημαϊκούς ερευνητικούς σκοπούς σε κάθε μελλοντική κατασκευή ε.π.. Εκτιμάει ότι η περαιτέρω ανάπτυξη λογισμικών γεωτεχνικού σχεδιασμού ε.π. όπως το Thermo-Pile, θα οδηγήσει σε πιο ευρεία αποδοχή της τεχνολογίας. Προτείνει συγκεκριμένα για το Thermo-Pile την ενσωμάτωση σε αυτό φαινομένων ομάδας πασσάλων και ανακυκλιζόμενης μακράς διάρκειας φόρτισης (long term cyclic effects). Ένα κρίσιμο για το σχεδιασμό ζήτημα επισημαίνει ότι είναι η θερμομηχανική βελτιστοποίηση, με χαρακτηριστικές θερμικές ακτίνες επιρροής, της διάταξης των ε.π. μεταξύ τους στο επίπεδο, καθορίζοντας ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων ώστε οι ακτίνες να μην αλληλοκαλύπτονται.

Οι Wang et al. (2015) επισημαίνουν ότι οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ θερμοκρασιακών μεταβολών και θερμικά επιφερόμενης ενεργούς τάσης και πίεσης πόρων σε μερικώς κορεσμένα εδάφη, δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως. Συγκεκριμένα, η θερμική συστολή και διαστολή των πασσάλων, οι θερμικά επαγόμενες μεταβολές στον όγκο του εδάφους και η θερμικά επιφερόμενη ροή του νερού στους πόρους του εδάφους, μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές της ενεργούς τάσης στο έδαφος και της πλευρικής τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους, επηρεάζοντας έτσι τη μηχανική απόκριση των ε.π. και τη μακροπρόθεσμη μηχανική τους απόδοση.

Πέρα από τις προτάσεις των ερευνητών για μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε να διερευνηθεί και η επίδραση στο σώμα του πασσάλου της θερμικής διαστολής και συστολής των διαφόρων τύπων σωληνών γεωεναλλάκτη με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, καθώς δε βρέθηκε να αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία.

Ο Μποζής (2011) σημειώνει ότι ένα κρίσιμο μέγεθος για την ικανότητα παραλαβής τάσεων από τον πάσσαλο είναι η μείωση της καθαρής ενεργούς διατομής του, λόγω των κενών που δημιουργεί η εγκατάσταση των σωλήνων του γεωεναλλάκτη. Το μέγεθος αυτό εκτιμάται ότι είναι σημαντικό γιατί συσχετίζει τον αριθμό των ζευγών σωλήνων με τη μείωση της διατομής του πασσάλου που παραλαμβάνει τάσεις. Το ζήτημα αυτό δε βρέθηκε να έχει θιχτεί στη σχετική με τη

θερμομηχανική συμπεριφορά του ε.π. βιβλιογραφία και αποτελεί συνεπώς αντικείμενο προς διερεύνηση.



Σχήμα 4.36: Μείωση ενεργού διατομής πασσάλου για διαφορετικές διατάξεις βρόχων σωλήνων (Μποζής, 2011)

Προτείνεται επίσης η εκπόνηση βιβλιογραφικής επισκόπησης πάνω στη θερμομηχανική συμπεριφορά του εδάφους, καθώς και πάνω σε άλλες ενεργειακές γεωκατασκευές.

Κεφάλαιο 5^ο : Συμπεράσματα

Η κλιματική αλλαγή είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα τον αιώνα που διανύουμε, παράλληλα με την εξάντληση των ενεργειακών πόρων του πλανήτη. Η άνοδος της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του πλανήτη έχει προκληθεί κυρίως από τις αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, οι οποίες οφείλονται στην καύση των λεγόμενων ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία εκτός από την περιβαλλοντική επιβάρυνση έχουν και το μειονέκτημα της ενεργειακής εξάρτησης από τις χώρες που τα εξάγουν. Συγχρόνως, η θέρμανση και ο δροσισμός των κτιρίων συναποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ε.Ε. και την Ελλάδα, με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας να παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Διαπιστώνεται επομένως η ανάγκη άμεσης απεξάρτησης της οικονομίας από τα ορυκτά καύσιμα και αντικατάστασής τους, μέσω του ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων, από συστήματα που αξιοποιούν τις φιλικές προς το περιβάλλον α.π.ε. για τη θέρμανση και το δροσισμό τους, όπως τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας.

Στην παρούσα εργασία διενεργήθηκε μια βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας των ενεργειακών πασσάλων, ενώ δόθηκε βαρύτητα στην επισκόπηση της σχετικής με τη θερμομηχανική τους συμπεριφορά βιβλιογραφίας, τη μελέτη δηλαδή των επιπτώσεων της θερμικής φόρτισης που συνεπάγεται η ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος στη μηχανική συμπεριφορά των πασσάλων.

Όπως διαπιστώθηκε, η αβαθής γεωθερμία είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή γεωθερμικής ενέργειας, ενώ οι ενεργειακοί πάσσαλοι είναι η πιο συχνά χρησιμοποιημένη ενεργειακή γεωκατασκευή πασσοσμίως, με αυξητικούς ρυθμούς διάδοσης. Οι ενεργειακοί πάσσαλοι ενέχουν πολλά οφέλη οικονομικά, περιβαλλοντικά, τεχνολογικά, κοινωνικά, πολιτικά, αλλά και σε θέματα ευφορίας και άνεσης των χρηστών των κτιρίων που εδράζουν, καθώς και πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας και με συμβατικά συστήματα θέρμανσης – δροσισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας δεν παράγει καθόλου ρύπους, γεγονός που την καθιστά καθοριστικής σημασίας για την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης και της εξάντλησης των ορυκτών

ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη, ενώ ο σωστός σχεδιασμός των συστημάτων αυτών περιορίζει τις τυχόν περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους μονάχα στις οχλήσεις κατά την κατασκευή τους. Στην Ελλάδα ενδείκνυται η χρήση τέτοιων συστημάτων για έναν επιπλέον λόγο, ο οποίος είναι οι λόγω μεσογειακού κλίματος ισοβαθμισμένες απαιτήσεις σε θέρμανση και δροσισμό στη διάρκεια του έτους, οι οποίες αποτρέπουν τον κίνδυνο βαθμιαίας μείωσης ή αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους μακροπρόθεσμα. Επιπλέον η εποχιακή λειτουργία των συστημάτων αυτών, συμπεριλαμβάνοντας δηλαδή αμφοτέρως τις λειτουργίες θέρμανσης και δροσισμού στη διάρκεια του έτους, είναι και η πιο αποδοτική και βιώσιμη.

Διαπιστώθηκε επίσης η σημασία που έχει τόσο για τη θερμική απόδοση του συστήματος όσο και για τη γεωτεχνική λειτουργία των πασσάλων, ο διεπιστημονικός συντονισμός κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος.

Αναφορικά με το κατά πόσο η θερμική φόρτιση επηρεάζει τη γεωτεχνική λειτουργία των πασσάλων, συμπεραίνεται από την επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας ότι ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας, ωστόσο οι θερμικές επιπτώσεις είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν κατά το γεωτεχνικό σχεδιασμό των πασσάλων. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία τη συνέχιση της έρευνας για την καλύτερη κατανόηση της θερμομηχανικής τους συμπεριφοράς, ενώ ως σχετικά νέα τεχνολογία έχει πληθώρα πεδίων μελλοντικής έρευνας, καθιστώντας τους ενεργειακούς πασσάλους και τις υπόλοιπες ενεργειακές γεωκατασκευές ένα πρόσφορο έδαφος προς καλλιέργεια για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς.

Συμπεραίνεται τέλος, ότι για την προώθηση της χρήσης ενεργειακών πασσάλων και άλλων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας εν γένει, έχει σημασία

1. να δοθούν οικονομικά και φορολογικά κίνητρα από την πολιτεία, η οποία έχει ούτως ή άλλως αναλάβει δεσμεύσεις για την αύξηση της χρήσης α.π.ε.,
2. η υψηλή φορολογία στα ορυκτά καυσίμα,
3. η ενσωμάτωση σχετικών διατάξεων στους κατασκευαστικούς κανονισμούς,
4. η πληροφόρηση των καταναλωτών και των κατασκευαστών, από φορείς μηχανικών όπως οι πολυτεχνικές σχολές, οι σύλλογοι μηχανικών και το Τ.Ε.Ε.,
5. η συνέχιση της έρευνας.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνικές

- Αποστολίδου, Γ. (2010). *Συστήματα αξιοποίησης του εδάφους για θέρμανση-ψύξη κτιρίων* (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία). Πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών ειδίκευσης «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη» Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- Αρβανίτης, Α. (2008). Μύθοι και πραγματικότητα για τη Γεωθερμία. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων, Υπουργείο Ανάπτυξης.
- Βραχόπουλος, Μ., Γ. (2009). Κανονική Γεωθερμία – Εφαρμογές στα κτήρια. *Τεχνολογίες & Εφαρμογές ΑΠΕ σε Νησιωτικές Περιοχές*, 3 Ιουλίου, ΤΕΕ, Κέρκυρα.
- Καρύτσας, Κ. (2009). Γεωθερμία, *Παρουσίαση*, 29 Οκτωβρίου, ΚΑΠΕ.
- Καρύτσας, Σ. (2015). Ορισμοί και βασικές έννοιες της αβαθούς γεωθερμίας – Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας. *3η Εκπαιδευτική Ημερίδα Γεωθερμίας «Αβαθής Γεωθερμία και Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας» από ΚΑΠΕ*, 5 Ιουνίου, Άρτα.
- Μαστοράκη, Σ., Γ. (2012). *Τεχνικο-οικονομική ανάλυση και περιβαλλοντική αποτίμηση εφαρμογής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας: Θερμικά ηλιακά συστήματα - Αβαθής Γεωθερμία* (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία). Διεπιστημονικό-διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.
- Μενδρινός, Δ., Καρύτσας, Κ. (2005). Γεωθερμία, Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, εμπειρία Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). *Μεταλλειολογικά Μεταλλουργικά Χρονικά*, Τόμος 15.
- Μενδρινός, Δ., Καρύτσας, Κ. (2015). Ενσωμάτωση συστημάτων ΓΑΘ στα κτίρια. Παραδείγματα καλής εφαρμογής ΓΑΘ. *2^η Εκπαιδευτική Ημερίδα Γεωθερμίας «Αβαθής Γεωθερμία και Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας» από ΚΑΠΕ*, 29 Μαΐου, ΚΑΠΕ, Πικέρι, Αττική.
- Μιχόπουλος, Α., Κ. (2011). Συστήματα και νομοθετικό πλαίσιο γεωθερμικών εγκαταστάσεων κλιματισμού. *Αντλίες Θερμότητας – Σύγχρονες Εφαρμογές –Σύλλογος Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων Βορείου Ελλάδος*, 22 Οκτωβρίου, Θεσσαλονίκη.
- Μιχόπουλος, Α., Κ., Μποζής, Δ., Κικίδης, Π., Παπακώστας, Κ., Κυριάκης, Ν. (2011). Χαρακτηριστικά λειτουργίας του Αβαθούς Γεωθερμικού συστήματος Νέου Δημαρχείου Πυλαίας. *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ*, τεύχ. 1.
- Μποζής, Δ. (2011). *Ο πάσσαλος θεμελίωσης ως γεωεναλλάκτης. Διερευνήσεις για τη θερμική του συμπεριφορά (Διδακτορική Διατριβή)*. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

- Μποζής, Δ. (2013). Παρουσίαση του συστήματος γεωθερμικών αντλιών του Δημαρχείου Πυλαίας. *Ημερίδα Affirmative Integrated Energy Design Action (AIDA) – ΚΑΠΕ: Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας – Από τη Θεωρία στην Πράξη, 15 Μαρτίου, Πυλαία.*
- Οικονόμου, Α. (2012). *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Η περίπτωση τη Γεωθερμίας (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία).* Διεπιστημονικό-διαπανεπιστημιακό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «στην οργάνωση και διοίκηση βιομηχανικών συστημάτων» με ειδίκευση: Συστήματα διαχείρισης ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος, Σχολή Χημικών Μηχανικών Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας Πανεπιστημίου Πειραιά.
- Πολύζου, Ο. (2007). *Γεωθερμία - Βιώσιμη ανάπτυξη και τοπικές κοινωνίες* (Διδακτορική Διατριβή). Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.
- Φυτίκας, Μ., Ανδρίτσος, Ν. (2005). Παρούσα κατάσταση στον κόσμο και την Ελλάδα και προοπτικές. *Παγκόσμιο Συνέδριο Γεωθερμίας 2005, 24-29 Απριλίου. Αττάλεια, Τουρκία.*
- Φυτίκας, Μ., Ανδρίτσος, Ν., Δρακούλης, Ρ. (2008). Γεωθερμία και τυποποίηση. *Διήμερο Συμπόσιο για την Τυποποίηση, 27-28 Νοεμβρίου.* Αθήνα.

Ξενόγλωσσες

- Akrouch, G., A., Sanchez, M., Briaud, J., L. (2014). Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays, *Acta Geotechnica*. doi: 10.1007/s11440-014-0312-5
- Amatya, B., L., Soga, K., Bourne-Webb, P., J., Amis, T., Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behavior of energy piles, *Geotechnique* 62 (6), 503–519. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.10.P.116>
- Amis, T., Loveridge, F., (2014). Energy piles and other thermal foundations for GSHP - developments in UK practice and research, *REHVA Journal*.
- Batini, N., Loria, A., F., R., Conti, P., Testi, D., Grassi, W., Laloui, L. (2015). Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions, *Applied Thermal Engineering* 86, 199–213
- Bodas Freitas, T., M., Cruz Silva, F., Bourne-Webb, P., J. (2013). The response of energy foundations under thermo-mechanical loading. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* Paris.
- Boennec, O. (2008). Shallow ground energy systems. *Energy*, 161 (2), 57–61. doi: 10.1680/ener.2008.161.2.57
- Boranyak, S., (2012). Energy foundations gain traction in North America. *Deep Foundations*.

- Boranyak, S., (2013). International cooperation expands energy foundation technology. *Deep Foundations*.
- Bourne-Webb, P., J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique*, 59 (3), 237–248. doi: 10.1680/geot.2009.59.3.237
- Bourne-Webb, P., J., Amatya, B., Soga, K. (2012). A framework for understanding energy pile behavior. *Geotechnical Engineering*, 166 (2), 170–177. <http://dx.doi.org/10.1680/geng.10.00098>
- Brandl, H., (1998). Energy Piles for Heating and Cooling of Buildings.
- Brandl, H., (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56 (2), 81–122.
- Brandl, H., (2008). Thermo-active ground-source systems “Energy Foundations”.
- Brandl, H., (2013). Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques. Procedia Engineering*, 57, 9–18.
- Cervera, C., P., (2013). *Ground thermal modelling and analysis of energy pile foundations* (Master’s Thesis). Civil and Environmental Engineering Department, Aalto University, Espoo, Finland.
- De Moel, M., Bach, P., M., Bouazza, A., Singh, R., M., Sun, J., O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2683–2696. doi:10.1016/j.rser.2010.07.027
- Di Donna, A., Laloui, L., (2015). Numerical analysis of the geotechnical behaviour of energy piles, *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39, 861–888. doi: 10.1002/nag.2341
- Dupray, F., Li, C., Laloui, L. (2014). Heat-exchanger piles for the de-icing of bridges. *Acta Geotechnica*, 9, 413–423. doi: 10.1007/s11440-014-0307-2
- European Geothermal Energy Council, (2009). *Geothermal Heat pumps - Ground Source Heat pumps*. Brussels.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., S., Yang, J. (2008). Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 28, 2295–2304. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.01.013
- Ground Source Heat Pump Association (2012). *Thermal pile design, installation and material standards*. Issue 1.0, GSHP Association, Milton Keynes, UK.
- Jeong, S., Lim, H., Lee, J., K., Kim, J. (2014). Thermally induced mechanical response of energy piles in axially loaded pile groups. *Applied Thermal Engineering*, 71, 608–615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.007>

- Kalantidou, A, Tang, A., M., Pereira, J., M., Hassen, G. (2012). Preliminary study on the mechanical behaviour of heat exchanger pile in physical model. *Geotechnique*, 62 (11), 1047–1051. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.T.013>
- Kramer, C., A. (2013). *An experimental investigation on performance of a model geothermal pile in sand* (A Thesis in Civil Engineering). The Graduate School, Department of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University.
- Laloui, L., Moreni, L., Fromentin, A., Pahud, D., Steinmann, G. (1999). Heat exchanger pile effect of the thermal solicitations on its mechanical properties. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 17.
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30, 763–781. doi: 10.1002/nag.499
- Laloui, L., Nuth, M. (2009). Investigations on the mechanical behaviour of a Heat Exchanger Pile. *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, 343–347.
- Laloui, L., Di Donna, A., (2011). Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Civil Engineering*, 164, 184–191. <http://dx.doi.org/10.1680/cien.2011.164.4.184>
- Loveridge, F., Amis, T., Powrie, W. (2012). Energy Pile Performance and Preventing Ground Freezing. *Proceedings of the 2012 International Conference on Geomechanics and Engineering*.
- Loveridge, F., (2012). *The Thermal Performance of Foundation Piles used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems* (Thesis for the degree of Doctor of Philosophy). Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton.
- Loveridge, F., Powrie, W., (2013). Pile heat exchangers thermal behaviour and interactions. *Geotechnical Engineering*, 166, 2, 178–196. <http://dx.doi.org/10.1680/geng.11.00042>
- Mands, E., Sanner, B., (n.d.). Shallow geothermal energy.
- McCartney, J., S., LaHaise, D., LaHaise, T., Rosenberg, J. (2010). *Application of Geoexchange Experience to Geothermal Foundations*.
- McCartney, J., S., Murphy, K., D. (2012). Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations. *DFI Journal* 6 (2).
- McCartney, J., S., Murphy, J., S., Stewart, M., A. (2013). Thermo-Mechanical Behavior of Energy Foundations. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Paris.
- Mimouni, T., Laloui, L., (2013). Towards a secure basis for the design of geothermal piles. *Acta Geotechnica*. doi: 10.1007/s11440-013-0245-4
- Mimouni, T. (2014). *Thermomechanical Characterization of Energy Geostructures with Emphasis on Energy Piles* (Doctoral Thesis). Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.

- Murphy, K., D., McCartney, J., S., Henry, K., S. (2014). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10, 179–195. doi: 10.1007/s11440-013-0298-4
- Murphy, K., D., McCartney, J., S. (2014). Seasonal Response of Energy Foundations During Building Operation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 343–356. doi: 10.1007/s10706-014-9802-3
- Ng, C., W., W., Shi, C., Gunawan, A., Laloui, L., Liu, H., L. (2014). Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 1–13. dx.doi.org/10.1139/cgj-2014-0301
- Olgun, C., G. (2013). Energy Piles: Background and Geotechnical Engineering Concepts. *16th Annual George F. Sowers Symposium, May 7*. Atlanta, GA.
- Olgun, C., G., McCartney, J., S., Loveridge, F., A., Bowers, G., A., Coccia, C., J., Bouazza, A., Soga, K., Spitler, J., D., Nicholson, D., Sutman, M., (2014a). Building codes, green certification and implementation issues, market challenges. *The Journal of the Deep Foundations Institute*, 8 (2), 84–92. doi: 10.1179/1937525514Y.0000000011
- Olgun, C., G., Ozudogru, T., Y., Abdelaziz, S., L., Senol, A. (2014b). Long-term performance of heat exchanger piles. *Acta Geotechnica*. doi: 10.1007/s11440-014-0334-z
- Olgun, C., G., McCartney, J., S. (2014). Outcomes from International Workshop on Thermoactive Geotechnical Systems for Near-Surface Geothermal Energy: from research to practice. *The Journal of the Deep Foundations Institute*, 8 (2), 59–73. doi: 10.1179/1937525514Y.0000000005
- Olgun, C., G., Ozudogru, T., Y., Arson, C., F. (2014c). Thermo-mechanical radial expansion of heat exchanger piles and possible effects on contact pressures at pile–soil interface. *Geotechnique Letters*, 000, 1–9. http://dx.doi.org/10.1680/geolett.14.00018
- Omer, A., M., (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 344–371. doi:10.1016/j.rser.2006.10.003
- Peron, H., Laloui, L., Knellwolf, C., Nuth, M., Silvani, C. (2010). Geotechnical Design of Heat Exchanger Piles. *GSHP Association Research Seminar Current and Future Research Into Ground Source Energy, January 21*. National Energy Centre, Milton Keynes, United Kingdom.
- Peron, H., Knellwolf, C., Laloui, L. (2011). A method for the geotechnical design of heat exchanger piles. *Geo-Frontiers*.
- Preene, M., Powrie, W. (2009). Ground energy systems from analysis to geotechnical design. *Geotechnique*, 59 (3), 261–271. doi: 10.1680/geot.2009.59.3.261
- Rotta Loria A., F., Gunawan, A., Shi, C., Laloui, L., Ng, C., W., W. (2015). Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 1, 1–15. http://dx.doi.org/10.1016/j.gete.2015.03.002

- Saggu, R., Chakraborty, T. (2014). Cyclic Thermo-Mechanical Analysis of Energy Piles in Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 321–342. doi: 10.1007/s10706-014-9798-8
- Salciarini, D., Ronchi, F., Cattoni, F., Tamagnini, C. (2014). Thermomechanical Effects Induced by Energy Piles Operation in a Small Piled Raft. *International Journal of Geomechanics*. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000375
- Self, S., J., Reddy, B., V., Rosen, M., A., (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341–348. doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.048
- Singh, R., M., Bouazza, A., Wang, B., Haberfield, C., H., Baycan, S., Carden, Y. (2015). Thermal and Thermo-Mechanical Response of a Geothermal Energy Pile, *World Geothermal Congress, 19–25 April*. Melbourne, Australia.
- Suryatriyastuti, M., E., Burlon, S., Mroueh, H. (2015). On the understanding of cyclic interaction mechanisms in an energy pile group. *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. doi: 10.1002/nag.2382
- Wang, B., Bouazza, A., Singh, R., M., Barry-Macaulay, D. (2013). Field investigation of a geothermal energy pile Initial observations. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris.
- Wang, W., Regueiro, R., A., McCartney, J., S. (2015). Coupled Axisymmetric Thermo-Poro-Mechanical Finite Element Analysis of Energy Foundation Centrifuge Experiments in Partially Saturated Silt. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 373–388. doi: 10.1007/s10706-014-9801-4
- Wood, C., J., Liu, H., Riffat, S., B. (2009). Use of energy piles in a residential building, and effects on ground temperature and heat pump efficiency. *Geotechnique*, 59 (3), 287–290. doi: 10.1680/geot.2009.59.3.287
- Yavari, N., Tang, A., M., Pereira, J., M., Hassen, G. (2014). Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modeling. *Acta Geotechnica*, 9, 385–398. doi: 10.1007/s11440-014-0310-7
- Zarella, A., De Carli, M., Galgaro, A. (2013). Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, 61, 301–310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.011>

Διαδίκτυο

www.climate.gov

www.econews.gr

www.nasa.gov



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125607