

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο Εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ολοκληρώνονται οι σπουδές μου ως προπτυχιακός φοιτητής.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον λέκτορα κύριο Ευάγγελο Γιακουμή για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και για τη συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Κ. Ρακόπουλο και τον αναπληρωτή καθηγητή κύριο Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Η διδασκαλία τους μου κίνησε το ενδιαφέρον για την περαιτέρω ενασχόλησή μου με τη μελέτη των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης.

Σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και όλα τα μέλη της οικογένειάς μου, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν και με ενθάρρυναν με κάθε τρόπο σ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας Συμβόλων.....	4
1. Εισαγωγή.....	7
2. Μετάδοση Θερμότητας.....	10
2.1. Ροή θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο διαμέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου.....	12
2.2. Ροή θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο διαμέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου και της μόνωσης	17
2.2.1. Πρόβλημα αγωγής θερμότητας Μόνιμης Κατάστασης.....	19
2.2.2. Πρόβλημα αγωγής θερμότητας Χρονικά Μεταβαλλόμενο.....	20
3. Μονωτικά Υλικά Εμβολοφόρων ΜΕΚ.....	23
3.1. Partially Stabilized Zirconia ή Plasma Sprayed Zirconia – PSZ.....	24
3.2. Silicon Nitride – SN.....	31
4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων – Διαγραμμάτων.....	39
4.1. Θερμοκρασία αερίων $T_{gas}[K]$ συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.....	43
4.2. Στιγμιαία σταθερά μετάδοσης θερμότητας αερίου $h_g[W/m^2K]$ συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.....	51
4.3. Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου $\dot{Q}[J/sec]$ συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.....	59
4.4. Θερμοκρασιακή ταλάντωση στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου βάθος $s=0$, Wall Temperature Swing $[K]$ συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.....	67

4.5. Θερμοκρασιακή ταλάντωση εσωτερικά του τοιχώματος του κυλίνδρου, από βάθος $s=0$ μέχρι βάθος $s=10\text{mm}$, Wall Temperature Swing [K] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.....	76
4.6. Επίδραση του πάχους μονωτικού υλικού στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα MWM TbRHS 518S.....	97
Βιβλιογραφία.....	106

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
a	Σταθερά	-
A	Επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας	m ²
A _p	Παράπλευρη επιφάνεια εμβόλου	m ²
b	Σταθερά	-
b _e	Ειδική κατανάλωση καυσίμου	g/kWh
c	Σταθερά	W/m ² K ⁴
c _w	Θερμική ικανότητα τοιχώματος κυλίνδρου	J/kgK
D	Διάμετρος εμβόλου	m
h _c	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ψυκτικού μέσου	W/m ² K
h _g	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας αερίου	W/m ² K
\bar{h}_g	Μέση τιμή συντελεστή μετάδοσης θερμότητας αερίου	W/m ² K
k	Σταθερά	W/mK
k _g	Συντελεστής συναγωγής	W/mK
k _{ins}	Θερμική αγωγιμότητα μόνωσης	W/mK
k _w	Θερμική αγωγιμότητα τοιχώματος κυλίνδρου	W/mK
ℓ	Μήκος διωστήρα	m
n _{tc}	Ταχύτητα περιστροφής υπερπληρωτή	rpm
p _{repr}	Πίεση υπερπλήρωσης	bar
\bar{p}_e	Μέση πραγματική πίεση	bar
p _{max}	Μέγιστη πίεση αερίου στο θάλαμο καύσης	bar
\dot{Q}	Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας (θερμοροή) στο τοίχωμα του κυλίνδρου	J/s
r	Ακτίνα στροφάλου	m
Re	Αριθμός Reynolds	-
S _{ins}	Πάχος μόνωσης	m
S _w	Πάχος τοιχώματος κυλίνδρου	m
T _c	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου	K
T _{max}	Μέγιστη θερμοκρασία αερίου στο θάλαμο καύσης	K

T_p	Χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία	K
$T_{p,g}$	Χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία αερίου καύσης	K
$T_{p,w}$	Χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου	K
T_{gas} ή T_g	Θερμοκρασία αερίου	K
T_w	Θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου	K
$T_{w,g}$	Θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης	K
$\bar{T}_{w,g}$	Μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης	K
$T_{w,c}$	Θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του ψυκτικού μέσου	K
$\bar{T}_{w,c}$	Μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του ψυκτικού μέσου	K
$\bar{T}_{w,m}$	Μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου ανάμεσα στο υλικό της μόνωσης και το χυτοσίδηρο	K
x	Μετατόπιση εμβόλου	m
α	Θερμική διαπερατότητα	m^2/s
α_w	Θερμική διαπερατότητα τοιχώματος κυλίνδρου	m^2/s
η_e	Πραγματικός (ωφέλιμος) βαθμός απόδοσης	-
η_l	Βαθμός πλήρωσης	-
μ_g	Δυναμικό ιξώδες	Pa·s
σ	Σταθερά Stefan-Boltzman	$W/m^2 K^4$
ρ_w	Πυκνότητα τοιχώματος κυλίνδρου	kg/m^3
φ	Γωνία στροφάλου	$^\circ$
Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-

Αρκτικόλεξα	Επεξήγηση
LHR	Low Heat Rejection Engine
NO _x	Οξείδια του αζώτου
PSZ	Partially Stabilized Zirconia ή Plasma Sprayed Zirconia
SN	Silicon Nitride
TZP	Tetragonal Zirconia Polycrystal
ΑΝΣ	Άνω Νεκρό Σημείο
ΚΝΣ	Κάτω Νεκρό Σημείο
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
4-Χ	Τετράχρονο

[1]

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημασία της μετάδοσης θερμότητας στα τοιχώματα του κυλίνδρου μιας Μηχανής Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) έχει αναγνωρισθεί από τα πρώιμα στάδια της εξέλιξής της. Αποτελέσματα από πολλές θεωρητικές και πειραματικές ερευνητικές προσπάθειες πάνω σε αυτόν τον τομέα έχουν παρουσιασθεί στη διεθνή βιβλιογραφία κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Όμως, είναι αναγνωρισμένο ότι το πρόβλημα είναι αρκετά δύσκολο και πολλές πλευρές του δεν έχουν μελετηθεί διεξοδικά μέχρι σήμερα.

Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον για τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης έχει ιδιαίτερα αναβαθμιστεί, λόγω της καίριας σημασίας, μεταξύ άλλων θεμάτων, των επιτυχών προσομοιώσεων των θερμοδυναμικών κύκλων και των ερευνών των θερμικών φορτίσεων σε διάφορες περιοχές μέσα στον θάλαμο καύσης. Η μετάδοση θερμότητας στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθώς τα σχετικά φαινόμενα είναι μεταβατικά, τρισδιάστατα και υπόκεινται σε γρήγορες ταλαντώσεις της πίεσης των

αερίων μέσα στον κύλινδρο και της θερμοκρασίας, ενώ τα κινούμενα όρια του θαλάμου καύσης κάνουν το φαινόμενο ακόμα πιο σύνθετο.

Οι εναλλαγές της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης μπορούν να χωρισθούν σε δυο κύριες κατηγορίες:

- A) Τις *μακροπρόθεσμες* (long-term), αποτέλεσμα της μακροκλίμακας (τάξη δευτερολέπτων) των μη-περιοδικών εναλλαγών της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ή/και του φορτίου.
- B) Τις *βραχυπρόθεσμες* (short-term), αποτέλεσμα της διακύμανσης της πίεσης των αερίων και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια ενός χρόνου του κινητήρα, έχοντας χρονική περίοδο τάξης ms.

Σε αντίθεση με τις μακροπρόθεσμες, οι βραχυπρόθεσμες εναλλαγές της θερμοκρασίας αναπτύσσονται πλήρως κατά τη διάρκεια κάθε χρόνου λειτουργίας του κινητήρα.

Την ίδια στιγμή, νέες απαιτήσεις προστίθενται στο σχεδιασμό των σημερινών κινητήρων diesel, κυρίως όσο αναφορά σε θέματα ελεγχόμενης ανάφλεξης νέων καυσίμων, μείωσης των εκπομπών καυσαερίων και τη χρησιμοποίηση κεραμικών υλικών εσωτερικά των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης στις επονομαζόμενες *Χαμηλής Θερμικής Απόρριψης* MEK (**Low Heat Rejection Engine, LHR**). Όλα αυτά τα σημαντικά θέματα συνδέονται άμεσα με τις λεπτομέρειες του μεταβατικού κύκλου μετάδοσης θερμότητας. Ιδιαίτερα, η εξέλιξη της *Χαμηλής Θερμικής Απόρριψης* ή «αδιαβατικής» MEK diesel, απαιτεί κατάλληλη επιλογή ή εξέλιξη νέων υλικών, ένα γεγονός το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με την εκτενή τους μελέτη στη μετάδοση θερμότητας.

Ο αντικειμενικός στόχος ενός *Χαμηλής Θερμικής Απόρριψης* κυλίνδρου ή κινητήρα MEK είναι η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών από τα τοιχώματά του, εκμηδενίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ανάγκη ύπαρξης συστήματος ψύξης. Αυτό επιτυγχάνεται με την αυξημένη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του κυλίνδρου, μέσω της μόνωσης τους, καθώς και της μόνωσης της κορώνας του εμβόλου, της κυλινδροκεφαλής ή των βαλβίδων. Θερμοδυναμικά, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας μιας μηχανής, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατή αποδοτικότητα της (κύκλος Carnot). Με αυτή τη διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί

επιπλέον μείωση στην καθυστέρηση ανάφλεξης και σαν επακόλουθο στο θόρυβο καύσης, καθώς επίσης και στην εκπομπή υδρογονανθράκων και άλλων ρύπων. Την ίδια στιγμή παρατηρείται αύξηση της ενέργειας των καυσαερίων, η οποία μπορεί να ανακτηθεί χρησιμοποιώντας ένα είδος υπερπληρωτή. Ένα σημαντικό θέμα εδώ είναι η μείωση του βαθμού πλήρωσης (η), η οποία επηρεάζει άμεσα την αποδιδόμενη ισχύ, καθώς και η αύξηση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου (NO_x). Χειροτέρευση της καύσης καθώς και των ιδιοτήτων του λιπαντικού λαδιού έχουν επίσης αναφερθεί λόγω του αυξημένου επιπέδου της μόνωσης.

Για την θεωρητική μελέτη της μετάδοσης θερμότητας εσωτερικά μιας «αδιαβατικής» MEK, χρησιμοποιήθηκε ένας κινητήρας diesel **MWM TbRHS 518S**, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο MEK της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και αναπτύχθηκε επίσης κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Για τη μόνωση του συγκεκριμένου κινητήρα χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη μονωτικών σε διάφορα πάχη μόνωσης:

- 1) Silicon Nitride (SN)
- 2) Partially Stabilized Zirconia (PSZ).

Η μελέτη της ροής θερμότητας εσωτερικά του κινητήρα ξεκινάει από το εσωτερικό του κυλίνδρου, όπου είναι ο θάλαμος καύσης και η θερμή πλευρά των αερίων καύσης, συνεχίζει διαμέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου (με ή χωρίς μόνωση) και καταλήγει στην πλευρά του ψυκτικού μέσου. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή και ακτινοβολία στο εσωτερικό του κυλίνδρου, με αγωγή στο τοίχωμα του κυλίνδρου και τελικά με συναγωγή στην πλευρά του ψυκτικού μέσου.

Η ανάλυση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα γίνει με τη μορφή πολλαπλών διαγραμμάτων στο κεφάλαιο 4.

[2]

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η μετάδοση θερμότητας στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης πραγματοποιείται με *συναγωγή και ακτινοβολία* στο εσωτερικό του κυλίνδρου, με *αγωγή* στο τοίχωμα του κυλίνδρου και τελικά με *συναγωγή* στην πλευρά του ψυκτικού μέσου.

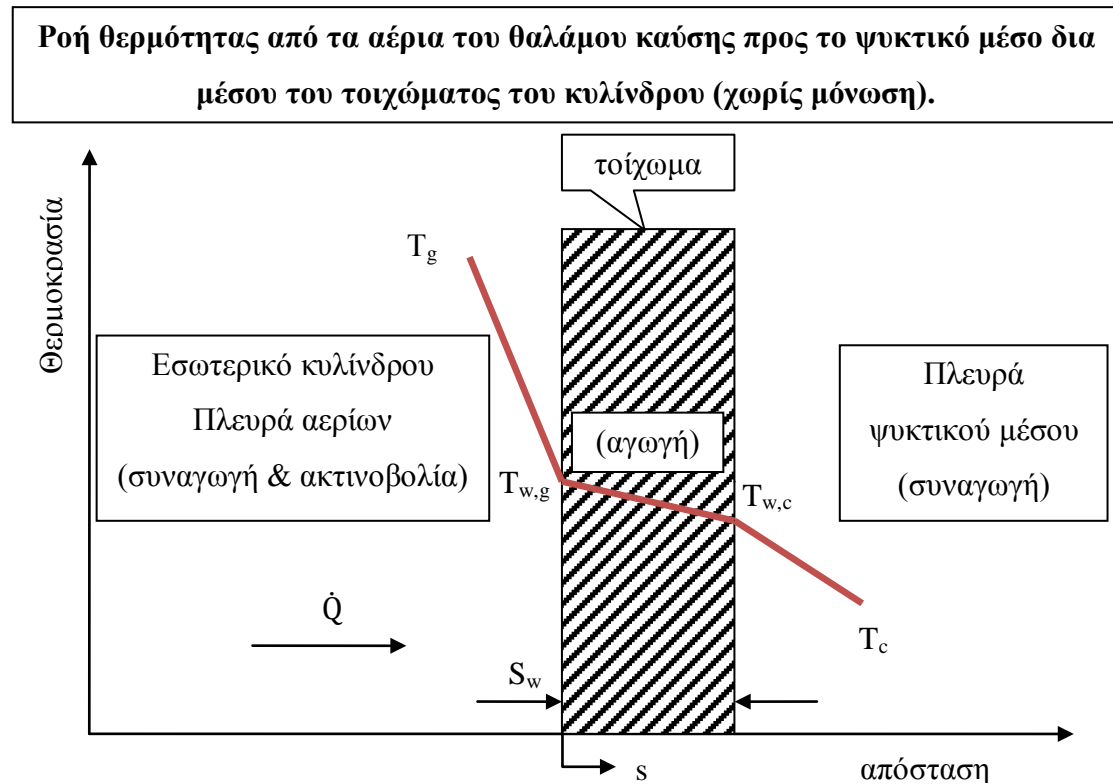
Η *μετάδοση θερμότητας με αγωγή* βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάστασή του. Στα μέταλλα η ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση των ηλεκτρονίων, ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση των μορίων. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός μό ν που οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες απ' ότι στα αέρια.

Η *μετάδοση θερμότητας με συναγωγή* εμφανίζεται μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας ενός σώματος όταν έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Κατά τη συναγωγή

θερμότητας εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η συναγωγή είναι ένας μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας ο οποίος οφείλεται στον συνδυασμό της αγωγής και της κίνησης του ρευστού.

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και μερικά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα συγχρόνως όμως, μπορούν ν' απορροφήσουν μέρος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν άλλα σώματα. Στην ακτινοβολία εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας και ενώ στην αγωγή και στη συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για τη μετάδοση θερμότητας, στην ακτινοβολία δεν συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό.

2.1. Ροή Θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο δια μέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου.



Σχήμα 2.1.

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ αερίων και τοιχώματος κυλίνδρου πραγματοποιείται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας \dot{Q} στα τοιχώματα του κυλίνδρου προσομοιώνεται με την παρακάτω τύπου εξίσωση:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = A \cdot h_g (T_g - T_{w,g}) \quad (2.1)$$

Η επιφάνεια A μετάδοσης θερμότητας ισούται με:

$$A = 2(\pi D^2/4) + A_p \quad (2.2)$$

όπου:

h_g : η στιγμιαία σταθερά μετάδοσης θερμότητας

T_g : στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία αερίου

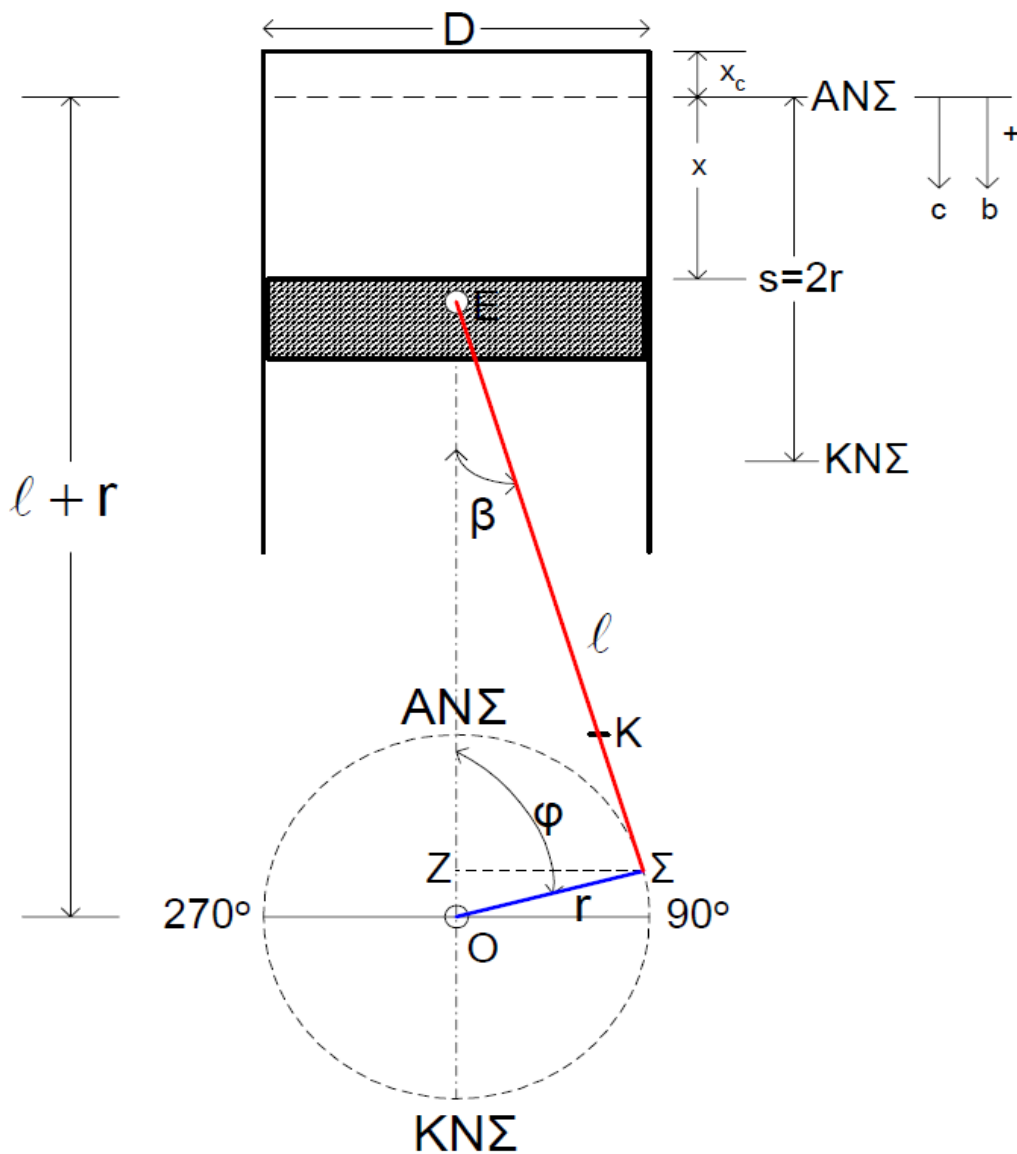
$T_{w,g}$: στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης

A_p : η παράπλευρη επιφάνεια του εμβόλου η οποία ισούται με

$$A_p = \pi D x \quad (2.3)$$

D : η διάμετρος του εμβόλου

x : η μετατόπιση του εμβόλου (Σχήμα 2.2.)



Κινηματικός μηχανισμός Εμβόλου – Διωστήρα – Στροφάλου

Σχήμα 2.2.

Από το Σχήμα 2.2. υπολογίζονται τα μεγέθη:

ℓ : μήκος διωστήρα

r : ακτίνα τροφάλου

D : διάμετρος εμβόλου

x : μετατόπιση εμβόλου

$$\lambda = r / \ell \quad (2.4)$$

$$x = x(\varphi) = r(1 - \cos\varphi) + \ell(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\varphi}) \quad (2.5)$$

Για τον υπολογισμό της στιγμιαίας σταθεράς μετάδοσης θερμότητας, h_g , χρησιμοποιούμε τη σχέση του **Annand**:

$$\frac{dQ}{dt} = A \left[a \frac{k_g}{D} Re^b (T_g - T_{w,g}) + c(T_g^4 - T_{w,g}^4) \right] = Ah_g(T_g - T_{w,g}) \quad (2.6)$$

όπου:

a, b, c είναι σταθερές που υπολογίζονται μετά από πειράματα σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Τυπικές τιμές των σταθερών αυτών για ένα μεγάλο εύρος μηχανών είναι:

$$0,06 < a < 0,76$$

$$0,54 < b < 0,90$$

$$c = 0,57\sigma \quad (2.7)$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ η σταθερά Stefan-Boltzman.} \quad (2.8)$$

$c = 0$ κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και της εναλλαγής των αερίων.

$$k_g = 3,17 \cdot 10^{-4} T_g^{0,772} \text{ είναι ο συντελεστής συναγωγής.} \quad (2.9)$$

$Re = \rho_g u_{char} L_{char} / \mu_g$ ο αριθμός Reynolds ο οποίος υπολογίζεται με ένα χαρακτηριστικό μήκος ίσο με την διάμετρο D του εμβόλου και μια χαρακτηριστική ταχύτητα ίση με τη μέση ταχύτητα του εμβόλου, ή προκύπτει από ένα k-ε υπομοντέλο τύρβης. (2.10)

$$\mu_g = 3,3 \cdot 10^{-7} T_g^{0,7} / (1 + 0,027\Phi) \text{ το δυναμικό ιξώδες.} \quad (2.11)$$

Φ : λόγος ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα.

T_g : στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία αερίου

$T_{w,g}$: στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης

A : επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της σχέσης του Annand είναι ότι περιέχει ένα ξεχωριστό όρο για την ακτινοβολία. Ωστόσο, η χρήση της μέσης θερμοκρασίας αερίου, αντί της πραγματικής μη ομογενούς κατανομής της θερμοκρασίας εσωτερικά του κυλίνδρου, περιορίζει τα οφέλη από αυτό το πλεονέκτημα (ο όρος της ακτινοβολίας στην σχέση του Annand μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία υψωμένη στην τέταρτη δύναμη).

Για την μελέτη της μετάδοσης θερμότητας μέσα στο τοίχωμα του κυλίνδρου με αγωγή, ακόμα και για την απλή περίπτωση όπου μια ομοιόμορφη θερμοκρασία τοιχώματος θεωρείται για όλες τις επιφάνειες του κυλίνδρου, πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμική αδράνεια του τοιχώματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, που βασίζεται στο ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο μοντελοποιεί την κατανομή της θερμοκρασίας από την πλευρά των αερίων διαμέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου μέχρι την πλευρά του ψυκτικού μέσου. Με αυτή τη μεθοδολογία, το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου, η θερμική του αγωγιμότητα και η θερμική διαπερατότητα λαμβάνονται υπόψη. Για τη μετάδοση θερμότητας εσωτερικά του τοιχώματος, η μονοδιάστατη, σταθερή αγωγή θερμότητας εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

όπου:

$\alpha_w = k_w / (\rho_w c_w)$ η θερμική διαπερατότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

ρ_w : η πυκνότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

c_w : η συγκεκριμένη θερμική του ικανότητα

Εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες και στις δύο πλευρές του τοιχώματος του κυλίνδρου (πλευρά αερίων και πλευρά ψυκτικού μέσου), προκύπτει η παρακάτω σχέση για τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας τετράχρονου (4-X) κινητήρα (720° γωνίας στροφάλου):

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \frac{dQ}{d\varphi} d\varphi = A \frac{k_w}{S_w} (\bar{T}_{w,g} - \bar{T}_{w,c}) = Ah_c (\bar{T}_{w,c} - T_c) \quad (2.13)$$

όπου:

A : επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας

$dQ/d\varphi$: η ροή θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου

S_w : το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου

k_w : η θερμική του αγωγιμότητα

$\bar{T}_{w,g}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του αερίου καύσης

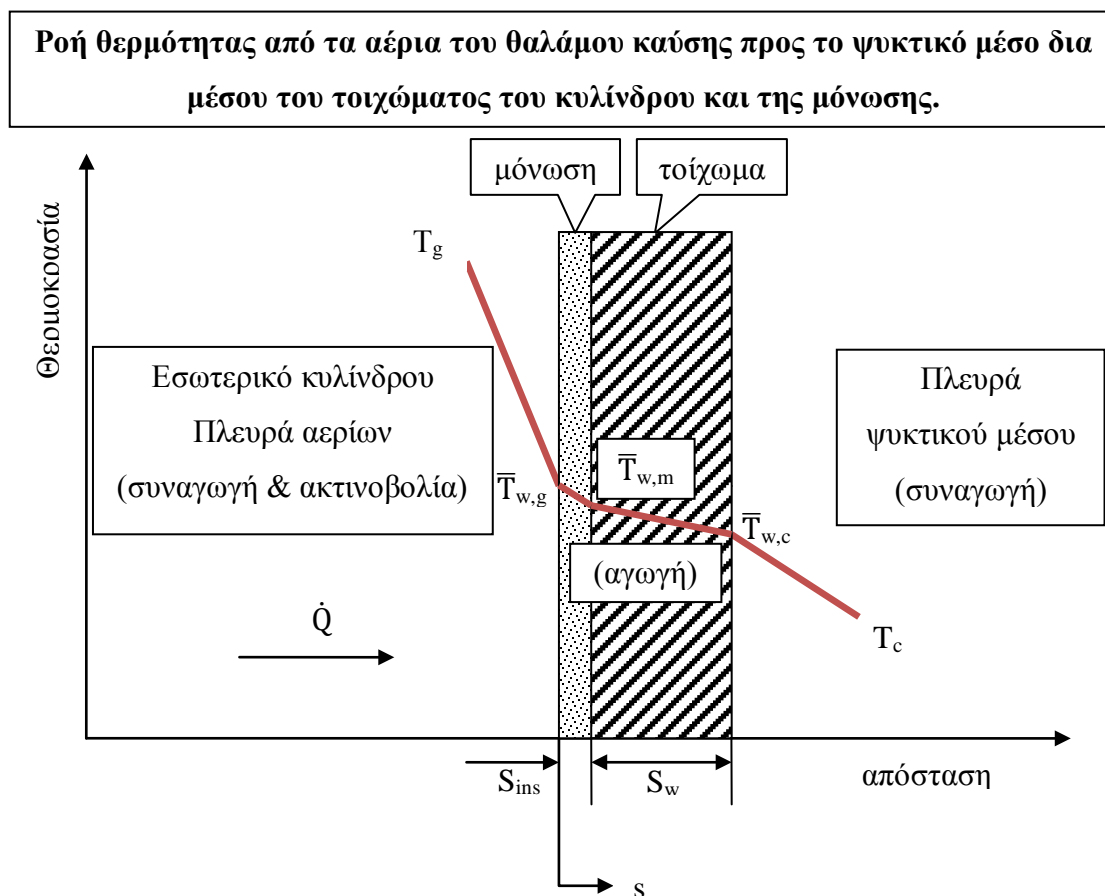
$\bar{T}_{w,c}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του ψυκτικού μέσου

h_c : η σταθερά μετάδοσης θερμότητας από την εξωτερική πλευρά του τοιχώματος του κυλίνδρου με θερμοκρασία $\bar{T}_{w,c}$ στο ψυκτικό μέσο

T_c : θερμοκρασία ψυκτικού μέσου.

Η εξίσωση (2.13) λύνεται για τις δύο άγνωστες θερμοκρασίες του τοιχώματος του κυλίνδρου $\bar{T}_{w,g}$ και $\bar{T}_{w,c}$.

2.2. Ροή θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο δια μέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου και της μόνωσης.



Σχήμα 2.3.

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας \dot{Q} από τα αέρια στο τοίχωμα του κυλίνδρου, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια αρμονική συνάρτηση του χρόνου με περίοδο ενός κύκλου λειτουργίας της μηχανής. Σαν αποτέλεσμα αυτού, περιοδικά θερμοκρασιακά κύματα διαδίδονται στη δομή των τοιχωμάτων του κυλίνδρου, τα οποία εν τούτοις ήδη σβήνουν σε μια μικρή απόσταση λίγων χιλιοστών [mm] από την εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος, πέρα από την οποία η διάδοση της θερμοκρασίας είναι σε σταθερή κατάσταση (steady-state).

Για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας μέσω μιας συγκεκριμένης θέσης του τοιχώματος του θαλάμου καύσης κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου

λειτουργίας του κινητήρα, η μη μόνιμη εξίσωση αγωγής θερμότητας πρέπει να επιλυθεί εφαρμόζοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Η ολική θερμοκρασία, σταθερής κατάστασης \bar{T}_w συν την χρονικά μεταβαλλόμενη T_p σε οποιοδήποτε θέση s μέσα στο τοίχωμα, πρέπει να ικανοποιεί την μη μόνιμη, μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.14)$$

όπου:

$\alpha_w = k_w / (\rho_w c_w)$ η θερμική διαπερατότητα

ρ_w : η πυκνότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

c_w : η συγκεκριμένη θερμική του ικανότητα

Η λύση αυτής της (2.14) επιτυγχάνεται διαχωρίζοντας το πρόβλημα σε δύο μέρη. Το ένα είναι αυτό της μόνιμης κατάστασης (steady-state), ενώ το άλλο είναι το χρονικά μεταβαλλόμενο (time-periodic).

2.2.1. Πρόβλημα Αγωγής Θερμότητας Μόνιμης Κατάστασης.

Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες σε όλες τις πλευρές του τοιχώματος (πλευρά αερίων, πλευρά ψυκτικού και στο τέλος της πλευράς της μόνωσης), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση, για τη γενική περίπτωση όπου υπάρχει στρώμα μόνωσης (PSZ ή SN) με αναφορά στο Σχήμα 2.2 (πρόκειται για επέκταση της σχέσης 2.13):

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \frac{dQ}{d\varphi} d\varphi = A \frac{k_{ins}}{S_{ins}} (\bar{T}_{w,g} - \bar{T}_{w,m}) = A \frac{k_w}{S_w} (\bar{T}_{w,m} - \bar{T}_{w,c}) = Ah_c (\bar{T}_{w,c} - T_c) \quad (2.15)$$

όπου:

A : επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας

$dQ/d\varphi$: η ροή θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου

S_{ins} : το πάχος του στρώματος της μόνωσης

k_{ins} : η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης

S_w : το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου

k_w : η θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

$\bar{T}_{w,g}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του αερίου καύσης

$\bar{T}_{w,c}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του ψυκτικού μέσου

$\bar{T}_{w,m}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου ανάμεσα στο υλικό της μόνωσης και το χυτοσίδηρο

h_c : η σταθερά μετάδοσης θερμότητας από την εξωτερική πλευρά του τοιχώματος του κυλίνδρου με θερμοκρασία $\bar{T}_{w,c}$ στο ψυκτικό μέσο.

T_c : θερμοκρασία ψυκτικού μέσου.

Η (2.15) λύνεται για τις τρεις άγνωστες θερμοκρασίες του τοιχώματος του κυλίνδρου:

$\bar{T}_{w,g}$, $\bar{T}_{w,m}$, $\bar{T}_{w,c}$.

2.2.2. Πρόβλημα Αγωγής Θερμότητας Χρονικά Μεταβαλλόμενο.

Ο χρονικός όρος $T_p(s,t)$ σε οποιαδήποτε θέση s μέσα στο τοίχωμα και οποιαδήποτε στιγμή t , θα ικανοποιεί την μη μόνιμη μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας μέσα σε μια παράλληλη πλάκα, έχοντας σταθερά θερμικής διαπερατότητα α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

Αυτή η διαφορική εξίσωση μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων *Fourier*. Η (2.16) υπόκειται στην οριακή συνθήκη της πλευράς του τοιχώματος η οποία είναι εκτεθειμένη στα αέρια του θαλάμου καύσης $s=0$, όπου η θερμοκρασία των αερίων μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο:

$$-k_{ins} \left[\frac{\partial T_p}{\partial x} \right]_{s=0} = \bar{h}_g (T_p - T_{pg}) \quad (2.17)$$

Ο χρονικά περιοδικός όρος της θερμοκρασίας των αερίων $T_{pg}(t)$ μπορεί ν' αναπτυχθεί σε σειρά *Fourier*, με τον ακόλουθο τρόπο:

$$T_{pg}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) \right] \quad (2.18)$$

όπου τ_0 είναι η χρονική περίοδος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης, η οποία για έναν τετράχρονο κινητήρα αντιστοιχεί σε μια συχνότητα, η οποία είναι η μισή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Για τη θερμοκρασία του τοιχώματος έχουμε:

$$T_{pw} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\xi_n x)}{\sqrt{1 + 2\zeta_n + 2\zeta_n^2}} \left[C_n \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t - \xi_n x - \theta_n - \delta_n\right) \right] \quad (2.19)$$

όπου οι ακόλουθες ποσότητες ισχύουν για τις σχέσεις 2.18 και 2.19 ($k_{ins} \equiv k_w$ για την περίπτωση τοιχώματος κυλίνδρου χωρίς την ύπαρξη μόνωσης):

$$\begin{aligned}
 C_n &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \\
 A_n &= \frac{2}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T_g(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) dt \\
 B_n &= \frac{2}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T_g(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) dt \\
 A_0 &= \bar{T}_g = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T_g(t) dt
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_n &= \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \\
 \xi_n &= \sqrt{\frac{\pi n}{\alpha \tau_0}} \\
 \theta_n &= \tan^{-1}\left(\frac{1}{1 + (1/\zeta_n)}\right) \\
 \zeta_n &= \xi_n \left(\frac{k_{ins}}{h}\right) = \sqrt{\frac{\pi n k_{ins}^2}{\alpha \tau_0 h^2}}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

ο όρος:

$$C_n \cos(\xi_n x) = C_n \cos \left[\left(\sqrt{\frac{\pi n}{\alpha \tau_0}} \right) x \right] \quad (2.22)$$

η (2.19) αντιπροσωπεύει ένα συνημιτονοειδές κύμα με εύρος C_n και μήκος κύματος x_0 , το οποίο υπολογίζεται από τον όρο:

$$\left(\sqrt{\frac{\pi n}{\alpha \tau_0}} \right) x_0 = 2\pi \quad \text{με } n = 1 \quad (2.23)$$

$$x_0 = \sqrt{\pi \alpha \tau_0} \quad (2.24)$$

Επιπλέον η μέση τιμή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από τα αέρια στο τοίχωμα του κυλίνδρου δίνεται από την σχέση:

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\varphi \quad (2.25)$$

[3]

**ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΜΕΚ**

3.1. Partially Stabilized Zirconia ή Plasma Sprayed Zirconia – PSZ



Σκόνη Zirconia

Εικόνα 3.1.1.

Η **Zirconia** ή **Zirconium dioxide** [ZrO_2] είναι ιδιαίτερα γνωστή ανάμεσα στα κεραμικά υλικά ως ιδιαίτερα σκληρή και ανθεκτική στο σπάσιμο σε θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον επιτρέπει το άριστο τελείωμα της επιφάνειας κατά την κατεργασία και τη δυνατότητα να δημιουργηθεί μια αιχμηρή άκρη.

Αν και διατηρεί πολλές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης στη διάβρωση ακόμα και σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζει αλλαγές στη δομή της, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν τη χρήση της μέχρι ίσως τους 500 °C. Επίσης γίνεται ηλεκτρικά αγωγίμη όταν προσεγγίζεται αυτή η θερμοκρασία.

Αναμειγνύεται συνήθως με **MgO** (οξείδιο του μαγνησίου), **CaO** (οξείδιο του ασβεστίου), **Yttria** (Y_2O_3), ή **Ce₂O₃** (οξείδιο του δημητρίου), σαν *σταθεροποιητές* προκειμένου να επιτευχθεί *σκλήρυνση κατά τον μετασχηματισμό* (transformation toughening). Η έκταση του μετασχηματισμού μπορεί να ελεγχθεί από το ποσοστό πρόσμιξης των παραπάνω σταθεροποιητών ώστε να επιτευχθεί ισορροπία στην ανθεκτικότητα ενάντια στην απώλεια δύναμης.

Διάφορες μορφές της Zirconia είναι:

- Καθαρή Zirconia
- Partially Stabilized Zirconia [PSZ]
- Tetragonal Zirconia Polycrystal [TZP]

Η **καθαρή Zirconia** έχει *μονοκλινική* κρυσταλλική δομή σε θερμοκρασία δωματίου, η οποία μετασχηματίζεται σε *τετραγωνική* και κυβική καθώς η θερμοκρασία αυξάνει. Η αύξηση του όγκου που προκαλείται καθώς η κρυσταλλική δομή της Zirconia μετασχηματίζεται από την κυβική στην τετραγωνική και στην μονοκλινική δομή (Σχήμα 3.1.1.), προκαλεί πολύ μεγάλες τάσεις με αποτέλεσμα η καθαρή Zirconia να ραγίζει κατά την διάρκεια της ψύξης από τις υψηλές στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Διάφορα οξείδια προστίθενται στην Zirconia για να σταθεροποιήσουν τις τετραγωνικές ή/και τις κυβικές φάσεις (Σχήμα 3.1.1.) όπως:

- οξείδιο του μαγνησίου [MgO]
- οξείδιο του ασβεστίου [CaO]
- οξείδιο yttrium ή Yttria [Y₂O₃]
- οξείδιο του δημητρίου [Ce₂O₃]

Η Zirconia είναι πολύ χρήσιμη στην '*σταθεροποιημένη (stabilized)*' κατάστασή της. Σε μερικές περιπτώσεις η τετραγωνική φάση (Σχήμα 3.1.1.) μπορεί να είναι μεταστατική (μεταβλητή). Αν επαρκής ποσότητα από την μεταστατική τετραγωνική φάση είναι παρούσα, τότε μια εφαρμοσμένη τάση (πίεση), που ενισχύεται από τη συγκέντρωση τάσεων σε μια ρωγμή στο άκρο, μπορεί να προκαλέσει την μετατροπή της τετραγωνικής δομής σε μονοκλινική (Σχήμα 3.1.1.), με ακόλουθη αύξηση του όγκου. Αυτός ο μετασχηματισμός φάσης μπορεί έπειτα να βάλει τη ρωγμή σε συμπίεση, κάτι που καθυστερεί την αύξησή της και ενισχύει την ανθεκτικότητα του σπασίματος. Αυτός ο μηχανισμός είναι γνωστός ως *μετασχηματισμός σκλήρυνσης (transformation toughening)* και επεκτείνει σημαντικά την αξιοπιστία και την διάρκεια ζωής των προϊόντων που κατασκευάζονται με βάση την σταθεροποιημένη (stabilized) Zirconia.

Ο *μετασχηματισμός σκλήρυνσης (transformation toughening)* προέκυψε από την υπόθεση ότι η Zirconia υποβάλλεται σε διάφορους μετασχηματισμούς δομής και φάσης μεταξύ των θερμοκρασιών περιβάλλοντος και των θερμοκρασιών συμπύκνωσης (φλόγας) 1000 °C – 1500 °C (Σχήμα 3.1.2.).

Η Zirconia έχει μια μονοκλινική κρυσταλλική δομή μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και τους 950 °C. Πάνω από αυτή την κρίσιμη θερμοκρασία, η δομή της μετατρέπεται σε τετραγωνική (Σχήμα 3.1.1.). Αυτός ο μετασχηματισμός συνοδεύεται από μείωση όγκου περίπου 1% κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και ισοδύναμη αύξηση όγκου κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Σε ακόμα υψηλότερη θερμοκρασία η κρυσταλλική δομή της Zirconia αλλάζει από τετραγωνική σε κυβική (Σχήμα 3.1.1.). Με τις κατάλληλες χημικές προσθήκες και θερμική επεξεργασία, μια μικροδομή μπορεί να σχηματισθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης, που αποτελείται από μικροσκοπικούς κρυστάλλους τετραγωνικής δομής μέσα στα άτομα κυβικής κρυσταλλικής δομής της Zirconia. Κανονικά η τετραγωνική δομή θα μετασχηματιζόταν σε μονοκλινική δομή κατά τη διάρκεια της ψύξης, αλλά πρέπει να διογκωθεί για να γίνει αυτό. Ωστόσο, η υψηλή αντοχή της περιβάλλουσας κυβικής κρυσταλλικής δομής αποτρέπει αυτή τη διόγκωση. Έτσι η τετραγωνική δομή διατηρείται σε μια ασταθή κατάσταση καθ' όλη τη διάρκεια της ψύξης, μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, κάθε μικροσκοπικός κρύσταλλος τετραγωνικής δομής, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε άτομα κυβικής δομής (Σχήμα 3.1.1.), είναι υπό πίεση και μοιάζει σαν ένα μπαλόνι που βρίσκεται εσωτερικά ενός πολύ μικρού κιβωτίου, το οποίο το έχει γεμίσει και πιέζει για ν' απελευθερωθεί. Μόλις το κιβώτιο ανοίξει, τότε το μπαλόνι μπορεί να διογκωθεί στον όγκο ισορροπίας του και να προεξέχει από το κουτί. Το ίδιο πράγμα συμβαίνει για κάθε μικροκρύσταλλο τετραγωνικής δομής είτε όταν μια ρωγμή προσπαθεί να διαμορφωθεί είτε όταν κάποιος προσπαθεί να σπάσει το κεραμικό υλικό με την εφαρμογή ενός φορτίου. Η ρωγμή είναι ανάλογη του ανοίγματος του κουτιού. Οι μικροκρύσταλλοι τετραγωνικής δομής που βρίσκονται κοντά στο μέτωπο του σπασίματος μπορούν να διογκωθούν και να μετατραπούν πίσω στην αρχική θερμοδυναμικά σταθερή μονοκλινική δομή τους (Σχήμα 3.1.1., 3.1.2.). Αυτή η διόγκωση πιέζει τη ρωγμή και την εμποδίζει να επεκταθεί. Αυτός είναι ο φυσικός μηχανισμός που είναι αρμόδιος για το μηχανικό φαινόμενο του **μετασχηματισμού σκλήρυνσης** (transformation toughening).

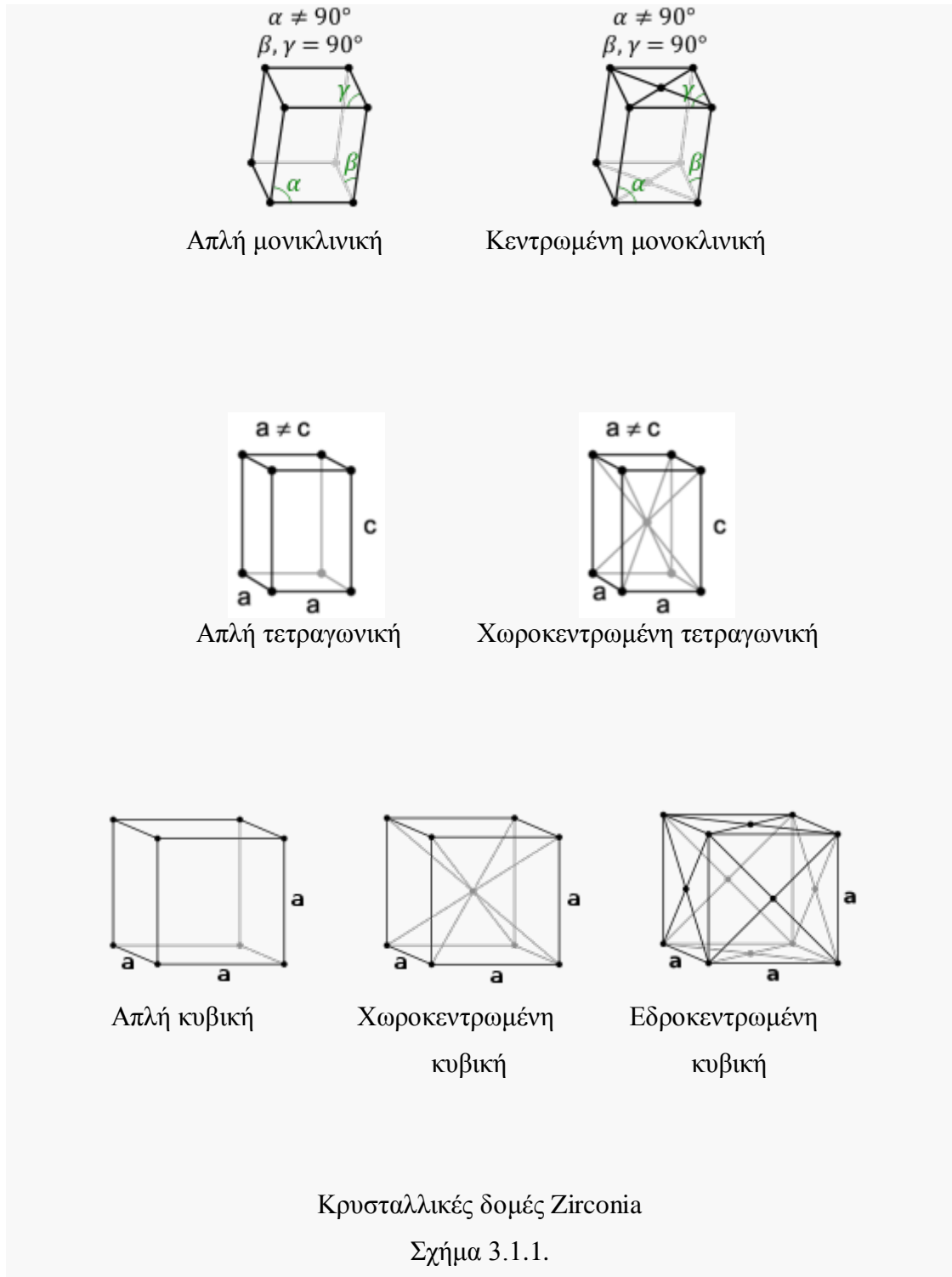
Από τον μετασχηματισμό σκλήρυνσης (transformation toughening) ουσιαστικά αναπτύχθηκαν 2 διαφορετικά είδη Zirconia.

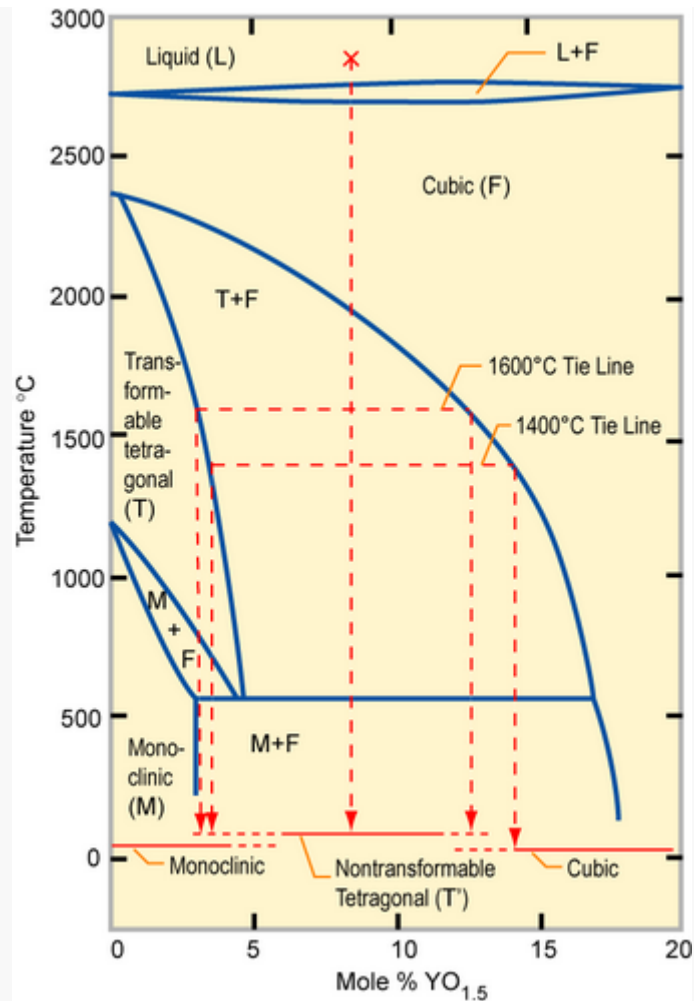
Αυτό που προέκυψε από την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω ονομάζεται **Partially Stabilized Zirconia – PSZ**. Είναι Zirconia [ZrO_2] με περίπου **10% MgO** για σταθεροποιητή, έχει κρεμ χρώμα και διακρίνεται για την υψηλή σκληρότητά της, διατηρώντας την ιδιότητα αυτή και σε υψηλές ακόμα θερμοκρασίες. Έχει μικρότερο κόστος σε σχέση με τα υπόλοιπα κεραμικά της οικογένειας.

Η δεύτερη μορφή αποτελείται από κρυστάλλους που διατηρούνται σε τετραγωνική δομή (Σχήμα 3.1.1.) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να μπορούν να μετασχηματιστούν όλοι αντί μόνο μερικών της προηγούμενης περίπτωσης. Αυτό το υλικό ονομάζεται **Tetragonal Zirconia Polycrystal – TZP**. Είναι Zirconia [ZrO_2] με περίπου **3% Yttria [Y_2O_3]** για σταθεροποιητή. Έχει την υψηλότερη σκληρότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά αυτό μειώνεται σημαντικά μεταξύ 200 °C και 500 °C (Σχήμα 3.1.2.).

Και οι δύο τύποι αναφέρονται διότι ο καθένας έχει διαφορετικές ιδιότητες, οπότε είναι προτιμότερος από τον άλλο σε συγκεκριμένα εφαρμογή.

Ο μετασχηματισμός σκλήρυνσης (transformation toughening) είναι ένα σημαντικότατο επιστημονικό επίτευγμα για την δημιουργία υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας κατά του σπασίματος κεραμικών υλικών. Για πρώτη φορά, είναι διαθέσιμο ένα κεραμικό υλικό, το οποίο διαθέτει έναν εσωτερικό μηχανισμό κατά της διάδοσης των ρωγμών και του σπασίματος. Μια ρωγή κανονικά επεκτείνεται στο κεραμικό υλικό με λίγη όμως παρεμπόδιση, με συνέπεια τελικά το σπάσιμό του και την ολοκληρωτική αστοχία του. Τα κεραμικά που προκύπτουν όμως μέσω της διαδικασίας της σκλήρυνσης μετασχηματισμού, εμφανίζουν ανθεκτικότητα κατά του σπασίματος ή αντίσταση κατά της διάδοσης των ρωγμών, που είναι 3 έως 6 φορές υψηλότερη από την καθαρή Zirconia και τα περισσότερα άλλα κεραμικά υλικά.





Διάγραμμα φάσεων της Zirconia

Σχήμα 3.1.2.

Η **Zirconia** χρησιμοποιείται ως πυρίμαχο υλικό, σαν μόνωση, λειαντικό, σαν βερνίκι σε σμάλτο και κεραμικά. Η σταθεροποιημένη Zirconia χρησιμοποιείται στους αισθητήρες οξυγόνου (αισθητήρες – λ) και σαν μεμβράνη στις κυψέλες καυσίμου, επειδή έχει την δυνατότητα να επιτρέπει στα ιόντα οξυγόνου να κινούνται ελεύθερα μέσω της κρυσταλλικής δομής της στις υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, μαζί με μια χαμηλή ηλεκτρονική αγωγιμότητα, την έχουν κάνει ένα από τα πιο χρήσιμα ηλεκτροκεραμικά (electroceramics). Έχει σημαντική διηλεκτρική σταθερά – k , που ερευνάται για τις πιθανές εφαρμογές της ως μονωτής στις ναυοηλεκτρονικές συσκευές τρανζίστορ στο μέλλον. Ακόμη χρησιμοποιείται στην κατασκευή οδοντικών αποκαταστάσεων, όπως οι κορώνες και οι γέφυρες, οι οποίες στη συνέχεια επενδύονται από συμβατική πορσελάνη.

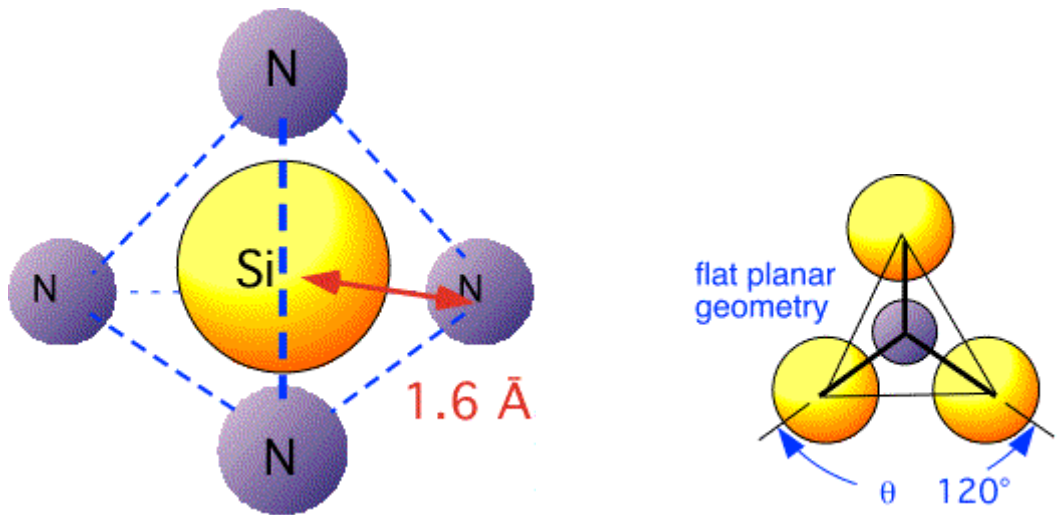
Η **PSZ** έχει επίσης πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και χρησιμοποιείται σαν πυρίμαχη εσωτερική επένδυση των αεροσυράγγων στην αεροδιαστημική βιομηχανία και ως αντιθερμική επίστρωση σε αεροπλάνα. Επίσης χρησιμοποιείται πειραματικά σε θερμαινόμενα τμήματα MEK diesel σαν αντιθερμική επένδυση τοιχωμάτων κυλίνδρων, εμβόλων και βαλβίδων, ώστε να επιτρέπει την λειτουργία τους σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες. Από το 2004, πολλές έρευνες βρίσκονται σε εξέλιξη για να βελτιώσουν την ποιότητα και τη διάρκεια ζωής αυτών των επιστρωμάτων.

Partially Stabilized Zirconia - PSZ		
Χημικός Τύπος: ZrO₂ – 10% MgO		
Ιδιότητες	Τιμή	Μονάδες (SI)
Πυκνότητα	5.6 x10 ³	kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	350	GPa
Αντοχή σε Κάμψη	545	MPa
Αντοχή σε Θλίψη	1700	MPa
Ανθεκτικότητα Σπασίματος	6	MPa·m ^{1/2}
Σκληρότητα	1100	HV
Θερμική Διαστολή (20 °C)	10 x10 ⁻⁶	°C ⁻¹
Τυπική θερμική αγωγιμότητα	2.5	W/mK
Ικανότητα Αποθήκευσης Θερμότητας	400	J/kgK
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας	1000	°C
Διηλεκτρική Σταθερά	6	kV/mm

Ιδιότητες PSZ

Πίνακας 3.1.1.

3.2 Silicon Nitride – SN



Silicon Nitride (Si_3N_4)

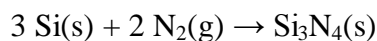
Σχήμα 3.2.1.

Το **Silicon Nitride** [Si_3N_4] (νιτρίδιο του πυριτίου) παρήχθη αρχικά το 1857 από τους Henri Etienne Sainte-Claire Deville και Friedrich Wohler, αλλά η ενεργός εμπορικά παραγωγή του ξεκίνησε κατά τη δεκαετία του 1950 ως μια αναζήτηση για πλήρη πυκνά, υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας υλικά. Στη φύση, το νιτρίδιο του πυριτίου (Silicon Nitride, Si_3N_4) εντοπίστηκε τη δεκαετία του 1990 σε μικροσκοπικές συγκεντρώσεις σε μετεωρίτες και ονομάστηκε ως *nierite* από τον αμερικανό φυσικό Alfred O. C. Nier. Ένας πρωταρχικός στόχος για την ανάπτυξη του ήταν η αντικατάσταση των μετάλλων από κεραμικά υλικά στις προηγμένες στροβιλομηχανές

με σκοπό να επιτευχθεί υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας και καλύτερη απόδοση. Αν και ο απόλυτος στόχος μιας κεραμικής ΜΕΚ δεν έχει ακόμα επιτευχθεί, το νιτρίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές όπως τμήματα κινητήριων μηχανών, ρουλεμάν και εργαλεία κοπής. Το νιτρίδιο του πυριτίου έχει καλύτερες δυνατότητες στις υψηλές θερμοκρασίες από τα περισσότερα μέταλλα, συνδυάζοντας τη διατήρηση της υψηλής αντοχής του και την αντίσταση κατά του ερπυσμού με την αντίσταση κατά της οξειδωσης. Επιπλέον ο χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του δίνει καλή αντίσταση κατά της απότομης εναλλαγής της θερμοκρασίας και της αντίστοιχης θερμικής καταπόνησης σε σύγκριση με τα περισσότερα κεραμικά υλικά (Σχήμα 3.2.3.).

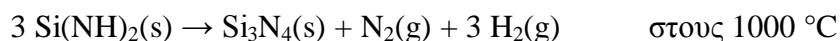
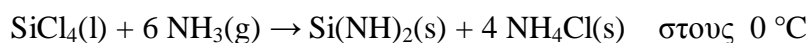
Υπάρχουν 3 τρόποι παραγωγής νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4):

1^{ος} τρόπος παραγωγής: Το νιτρίδιο του πυριτίου μπορεί να ληφθεί από την άμεση αντίδραση του πυριτίου με το άζωτο σε θερμοκρασίες μεταξύ 1300 °C και 1400 °C:



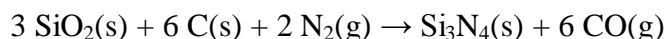
αυτή ήταν η πρώτη μεγάλης κλίμακας μέθοδος παραγωγής του νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) σε σκόνη και αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1950. Όμως το προϊόν ήταν χαμηλής ποιότητας.

2ος τρόπος παραγωγής: διπλή αντίδραση σύνθεσης.



αυτή η διαδικασία οδηγεί στην παραγωγή άμορφου νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4). Το προϊόν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία με άζωτο στους 1400 °C με 1500 °C για να μετατραπεί σε κρυσταλλική σκόνη. Αυτός είναι τώρα ο δεύτερος πιο σημαντικός τρόπος παραγωγής νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) για εμπορική χρήση.

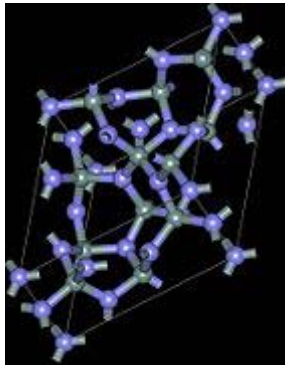
3ος τρόπος παραγωγής στους 1400 °C με 1450 °C:



αυτή η διαδικασία ήταν και η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) σε σκόνη και τώρα θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός από πλευράς κόστους για την βιομηχανική παραγωγή Si_3N_4 υψηλής ποιότητας.

Το καθαρό νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) είναι δύσκολο να παραχθεί ως μαζικό υλικό. Δεν συμπυκνώνεται εύκολα και δεν μπορεί να θερμανθεί πάνω από τους 1850 °C, το οποίο είναι κάτω από το σημείο τήξης του (σημείο τήξης 1900 °C), καθώς διασπάται σε πυρίτιο και άζωτο. Γι' αυτό το λόγο η εφαρμογή των συμβατικών τεχνικών συμπύκνωσης είναι προβληματική. Πυκνό νιτρίδιο του πυριτίου μπορεί να δημιουργηθεί μόνο με τη χρήση έμμεσων μεθόδων. Η σύνδεση των επιμέρους συστατικών για την δημιουργία σκόνης νιτρίδιου του πυριτίου μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μέσω της προσθήκης χημικών ουσιών. Αυτές οι χημικές ουσίες είναι γνωστές σαν βοηθητικά συμπύκνωσης και συνήθως προκαλούν έναν βαθμό υγρής συμπυκνωμένης φάσης. Μια καθαρότερη εναλλακτική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί το θερμικό πλάσμα που δημιουργείται από το τους παλμούς του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της συμπιεσμένης σκόνης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παραχθεί πυκνό νιτρίδιο του πυριτίου σε θερμοκρασίες 1500 °C έως 1700 °C.

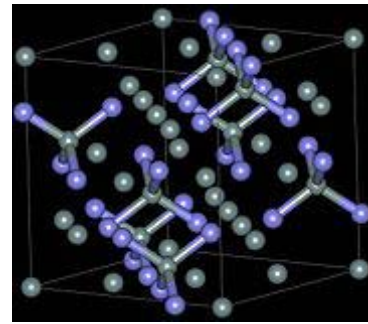
Υπάρχουν 3 κρυσταλλικές δομές του νιτρίδιου του πυριτίου (Silicon Nitride, Si_3N_4) γνωστές ως α, β και γ φάσεις. Η α φάση έχει τριγωνική δομή, η β φάση εξαγωνική δομή και η γ φάση κυβική δομή (Σχήμα 3.2.2.).



τριγωνική α - Si_3N_4



εξαγωνική β - Si_3N_4



κυβική γ - Si_3N_4

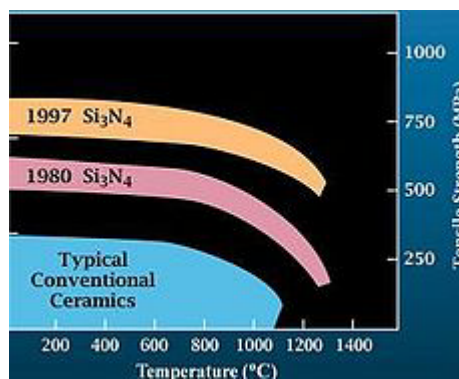
Άτομα με μπλε χρώμα – Άζωτο

Άτομα με γκρι χρώμα – Πυρίτιο

Κρυσταλλικές δομές του Si_3N_4

Σχήμα 3.2.2.

Οι α και β φάσεις είναι οι πιο γνωστές και συνηθισμένες μορφές του νιτρίδιου του πυριτίου και μπορούν να παραχθούν υπό φυσιολογικές συνθήκες πίεσης. Η γ φάση όμως μπορεί να συντεθεί μόνο κάτω από υψηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και έχει σκληρότητα 35 GPa (Σχήμα 3.2.3.).



Αντοχή του νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) σε δυναμική καταπόνηση συναρτήσεται της θερμοκρασίας, σύγκριση του με συμβατικά κεραμικά υλικά και η εξέλιξη στις ιδιότητες του με το πέρασμα των χρόνων.

Σχήμα 3.2.3.

Το νιτρίδιο του πυριτίου (Silicon Nitride, Si_3N_4) χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές λόγω των ακόλουθων ιδιοτήτων του:

- Χαμηλή πυκνότητα
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Άριστη αντοχή σε θερμική καταπόνηση και ακραίες εναλλαγές της θερμοκρασίας
- Άριστη αντοχή στη διάβρωση
- Ανθεκτικότητα στο σπάσιμο
- Αντοχή σε μηχανική καταπόνηση και ερπυσμό
- Αντίσταση κατά της οξείδωσης

Μερικές από τις πιο γνωστές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται το νιτρίδιο του πυριτίου είναι στα τμήματα των MEK και στους στροβιλοσυμπιεστές, στα ρουλεμάν (τέτοια ρουλεμάν διαθέτουν οι διαστημικοί δορυφόροι της NASA), στη κοπή μετάλλων, στη διαμόρφωση εργαλείων και στον χειρισμό καυτού μετάλλου. Λεπτά φιλμ από νιτρίδιο του πυριτίου αποτελούν δημοφιλές μονωτικό στρώμα στα ηλεκτρονικά υπολογιστών με βάση το πυρίτιο (Σχήμα 3.2.4.).

Η μεγαλύτερη αγορά για τα τμήματα από νιτρίδιο του πυριτίου των MEK (diesel και otto) είναι στο θάλαμο καύσης και στα τριβόμενα μέρη. Η ανάπτυξη και εξέλιξη τους αποδείχτηκε ένας δυσκολότερος και πιο σύνθετος στόχος απ' ό,τι αρχικά υπολογιζόταν. Ο παράγοντας του κόστους και τα σοβαρά τεχνολογικά προβλήματα της μαζικής παραγωγής σύνθετων κεραμικών τμημάτων έχουν περιορίσει την ανάπτυξη, αλλά το υλικό έχει επίσης αντιμετωπιστεί με σχεδιαστικό συντηρητισμό και δυσπιστία σχετικά με την αντοχή των κεραμικών τμημάτων. Εξαρτήματα MEK κατασκευασμένα από νιτρίδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται και στους κινητήρες αυτοκινήτων καθώς και φορτηγών για εφαρμογές όπου οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες δεν είναι πολύ υψηλές και οι συνέπειες της αστοχίας του υλικού δεν είναι καταστροφικές (Σχήμα 3.2.4.).



Ακτινικός ρότορας στροβιλομηχανής



Ρουλεμάν



Προωθητής νιτριδίου του πυριτίου
αριστερά: τοποθετημένος στο πεδίο δοκιμών
δεξιά: υπό δοκιμή με τα προωθητήρια H₂/O₂

Σχήμα 3.2.4.

Κινητήρες diesel:

- προθερμαντήρες για γρήγορη εκκίνηση.
- κινητήρες έμμεσης έγχυσης για γρηγορότερη εκκίνηση και χαμηλότερο θόρυβο καύσης.
- στροβιλο-υπερπληρωτές (διαμέτρου 10 cm περίπου) για μειωμένη υστέρηση κατά την επιτάχυνση (λόγω ελαφρύτερης κατασκευής) και άρα μειωμένες εκπομπές καυσαερίων.

Κινητήρες otto:

- σύστημα ωστηρίου - ζυγώθρου βαλβίδων για μειωμένη φθορά.
- στροβιλο-υπερπληρωτές (διαμέτρου 5 cm περίπου) για μειωμένη υστέρηση κατά την επιτάχυνση (λόγω ελαφρύτερης κατασκευής) και άρα μειωμένες εκπομπές καυσαερίων.
- βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου για γρηγορότερη επιτάχυνση.

Τα περισσότερα από αυτά τα τμήματα των MEK κατασκευάζονται στην Ιαπωνία και στις ΗΠΑ.

Μελλοντικά, απαιτείται σημαντική αύξηση στη χρήση, αν το νιτρίδιο του πυριτίου πρόκειται να βρει μια θέση ανάμεσα στα σημαντικά βιομηχανικά υλικά. Για να γίνει αυτό πραγματικότητα πρέπει να υπάρξει μείωση στο κόστος παραγωγής μαζί με βελτιωμένες ιδιότητες του υλικού και αξιοπιστία. Η τεχνολογία των MEK είναι η περιοχή που πιθανό να επωφεληθεί περισσότερο από αυτή την εξέλιξη καθώς μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και μειωμένες εκπομπές καυσαερίων γίνονται ακόμα πιο ισχυροί παράγοντες. Παραδόξως, το υλικό πρέπει να χρησιμοποιηθεί ευρέως στις στροβιλομηχανές (ο αρχικός λόγος για την ανάπτυξη του υλικού), κυρίως γιατί μικρού και μεσαίου μεγέθους στροβιλομηχανές αναμένεται να έχουν ευρεία εφαρμογή.

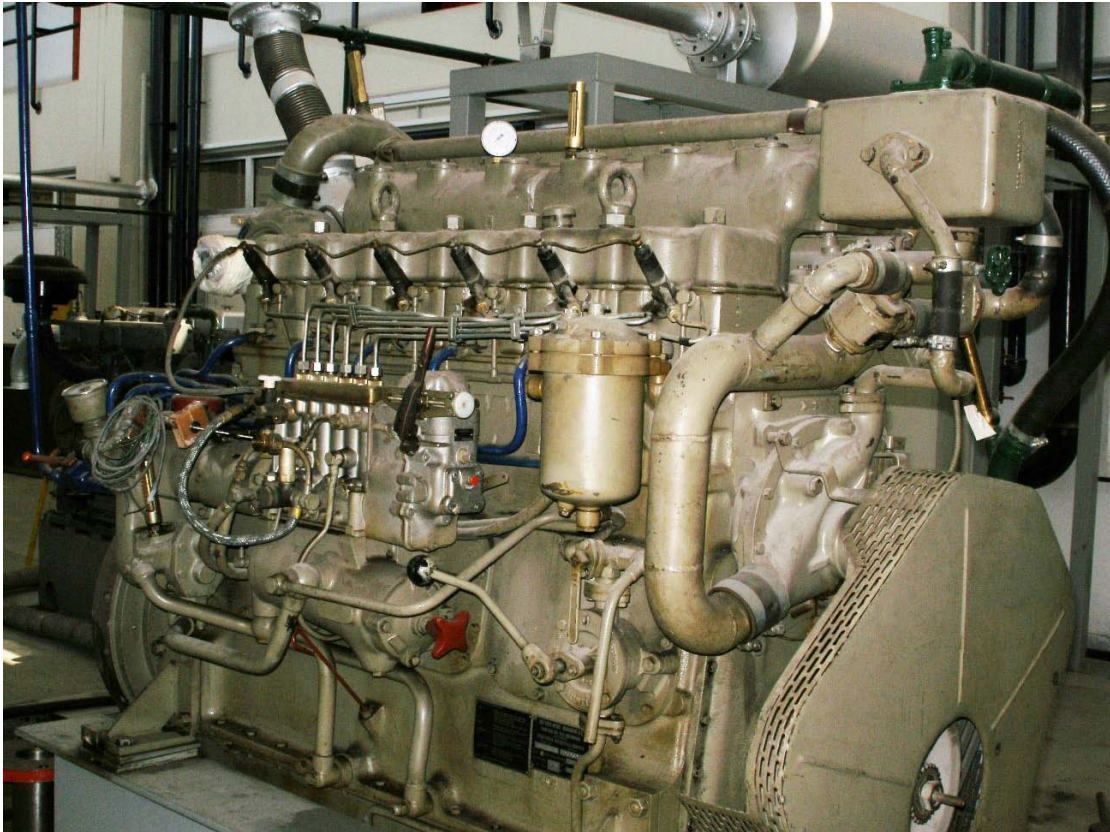
Silicon Nitride – SN		
Χημικός Τύπος: Si₃N₄		
Ιδιότητες	Τιμή	Μονάδες (SI)
Πυκνότητα	3.3 x10 ³	kg/m ³
Πορώδες	0	%
Χρώμα	γκρι (σκόνη)	—
Αντοχή σε Κάμψη	690 - 830	MPa
Συντελεστής Ελαστικότητας	310	GPa
Λόγος Poisson	0.24 - 0.27	—
Σκληρότητα	1450 - 1580	HV
Ανθεκτικότητα Σπασίματος	5.7 - 6.1	MPa·m ^{1/2}
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας	1000	°C
Σημείο Τήξης	1900	°C
Τυπική θερμική Αγωγιμότητα	30	W/mK
Θερμική Διαστολή (20 °C)	3.3 x10 ⁻⁶	°C ⁻¹

Ιδιότητες SN
Πίνακας 3.2.1.

[4]

**ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

Για την υπολογιστική μελέτη του φαινομένου μετάδοσης θερμότητας εσωτερικά μιας «αδιαβατικής» Μηχανής Εσωτερικής Καύσης, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από έναν κινητήρα diesel τύπου **MWM T6RHS 518S** (Πίνακας 4.1.), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο MEK της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (Σχήμα 4.1.).



Άποψη του κινητήρα MWM TbRHS 518S

Σχήμα 4.1.

Για την εσωτερική μόνωση του κινητήρα, όπως προαναφέρθηκε, θεωρήθηκαν δύο μονωτικά υλικά:

- 1) Silicon Nitride (SN)
- 2) Partially Stabilized Zirconia (PSZ).

Οι υπολογισμοί που έγιναν στον κινητήρα τύπου MWM TbRHS 518S (Πίνακας 4.1.) για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων, αρχικά επεξεργάστηκαν κατάλληλα σε κώδικα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ο οποίος αναπτύχθηκε στο εργαστήριο MEK της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.

Χαρακτηριστικά κινητήρα MWM T6RHS 518S	
Τύπος	6 κύλινδροι Τετράχρονος (4-X) Υπερπληρωμένος με ψύξη του αέρα μετά την συμπίεση σε ψυγείο αέρα-νερού Υδρόψυκτος Καύσιμο diesel
Εύρος λειτουργίας	1000-1500 rpm
Διάμετρος / Διαδρομή	140 mm /180 mm
Μέγιστη ισχύς	236kW @ 1500rpm
Μέγιστη ροπή	1520Nm @ 1250rpm
Υπερπληρωτής	KKK M4B 754/345
Αντλία καυσίμου	BOSCH PE 6P 120 A 320 RS 153

Στοιχεία κινητήρα

Πίνακας 4.1.

Η ανάλυση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα γίνει με τη μορφή πολλαπλών διαγραμμάτων με χρήση των προγραμμάτων Grapher και Excel. Ανάλογα με το αν υπάρχει μόνωση ή όχι, καθώς και το πάχος αυτής, μπορούμε να διακρίνουμε πέντε περιπτώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2.):

	Υλικό τοιχώματος κυλίνδρου	Μόνωση	Πάχος μόνωσης S [mm]
1	Χυτοσίδηρος (cast iron)	-	-
2	Χυτοσίδηρος (cast iron)	PSZ	1,0
3	Χυτοσίδηρος (cast iron)	PSZ	1,5
4	Χυτοσίδηρος (cast iron)	SN	2,0
5	Χυτοσίδηρος (cast iron)	SN	4,0

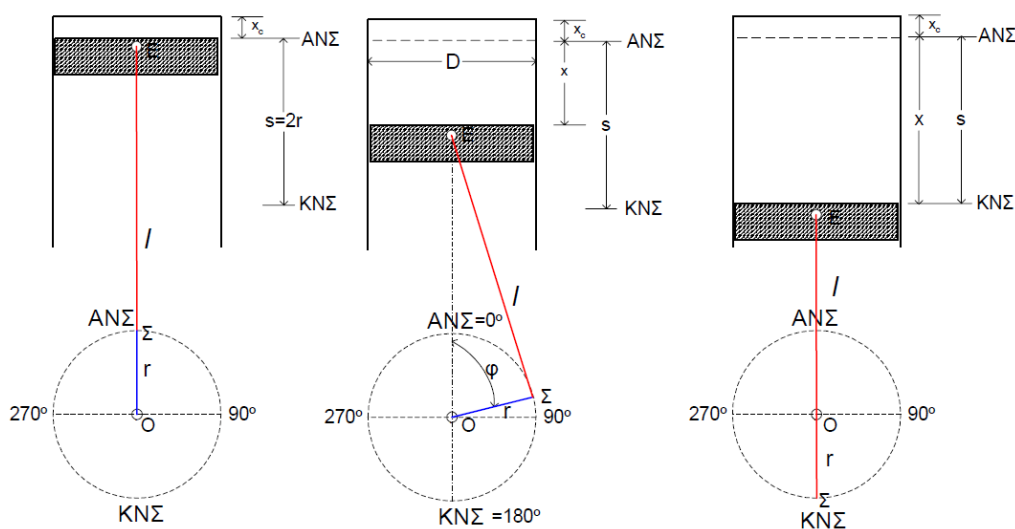
Διαφορετικές περιπτώσεις μονωτικών

Πίνακας 4.2.

Τα μεγέθη που εξετάζονται και παρουσιάζονται στα διαγράμματα για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων είναι:

- Θερμοκρασία αερίων, $[T_{\text{gas}}]$
- Ταλάντωση θερμοκρασίας τοιχώματος κυλίνδρου, [Wall Temperature Swing]
- Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, $[h_g]$
- Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου (θερμοροή), $[\dot{Q}]$
- Μέση πραγματική πίεση, $[\bar{p}_e]$
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου, $[\dot{b}_e]$
- Πραγματικός (ωφέλιμος) βαθμός απόδοσης, $[\eta_e]$
- Μέγιστη πίεση αερίου στο θάλαμο καύσης, $[p_{\text{max}}]$
- Μέγιστη θερμοκρασία αερίου στο θάλαμο καύσης, $[T_{\text{max}}]$
- Πίεση υπερπλήρωσης, $[p_{\text{cpr}}]$
- Ταχύτητα περιστροφής υπερπληρωτή, $[n_{\text{tc}}]$

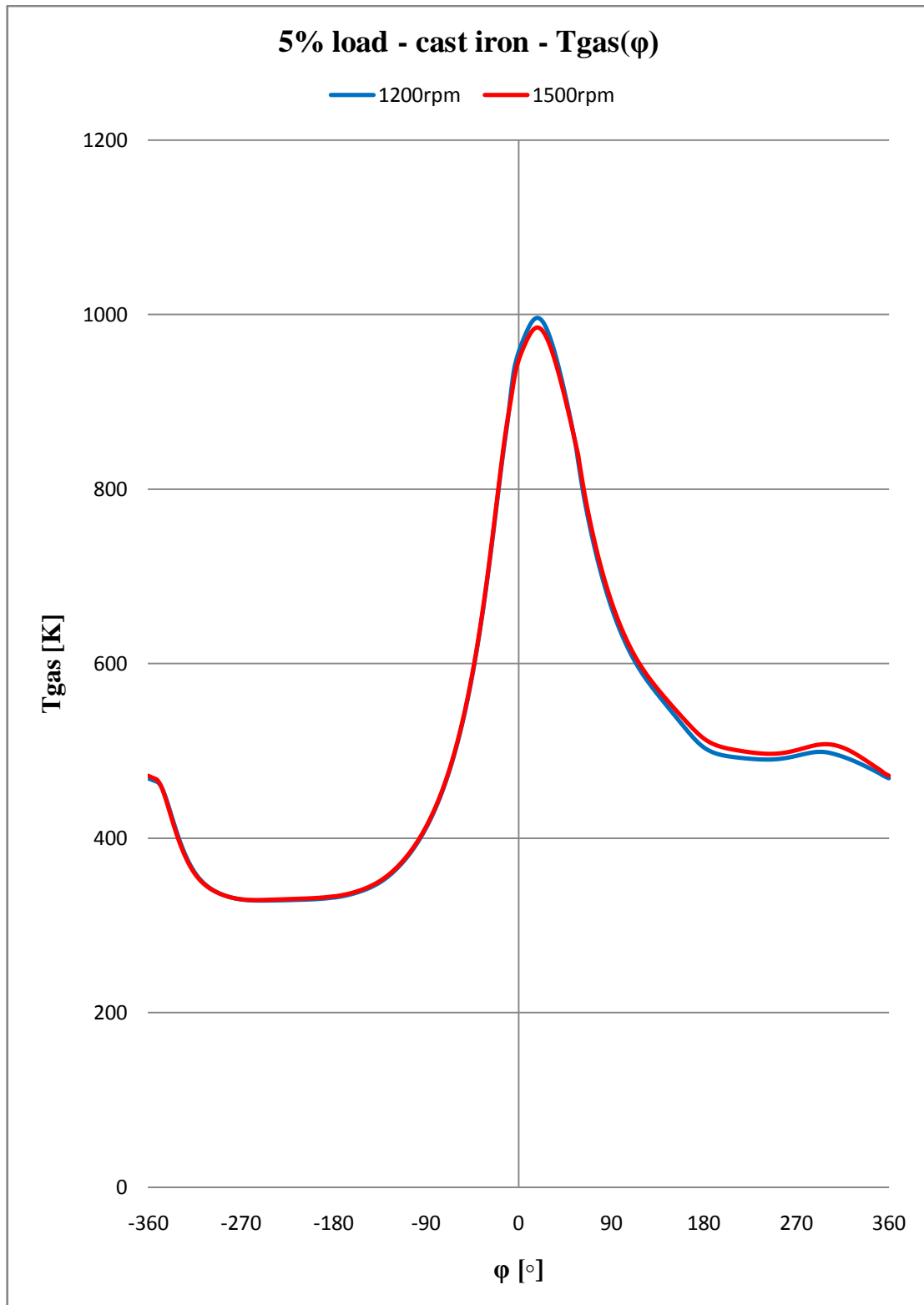
Σε όλα τα παρακάτω διαγράμματα, οι θ^0 γωνίες στροφάλου αντιστοιχούν στο ‘θερμό’ Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) (Σχήμα 4.2).



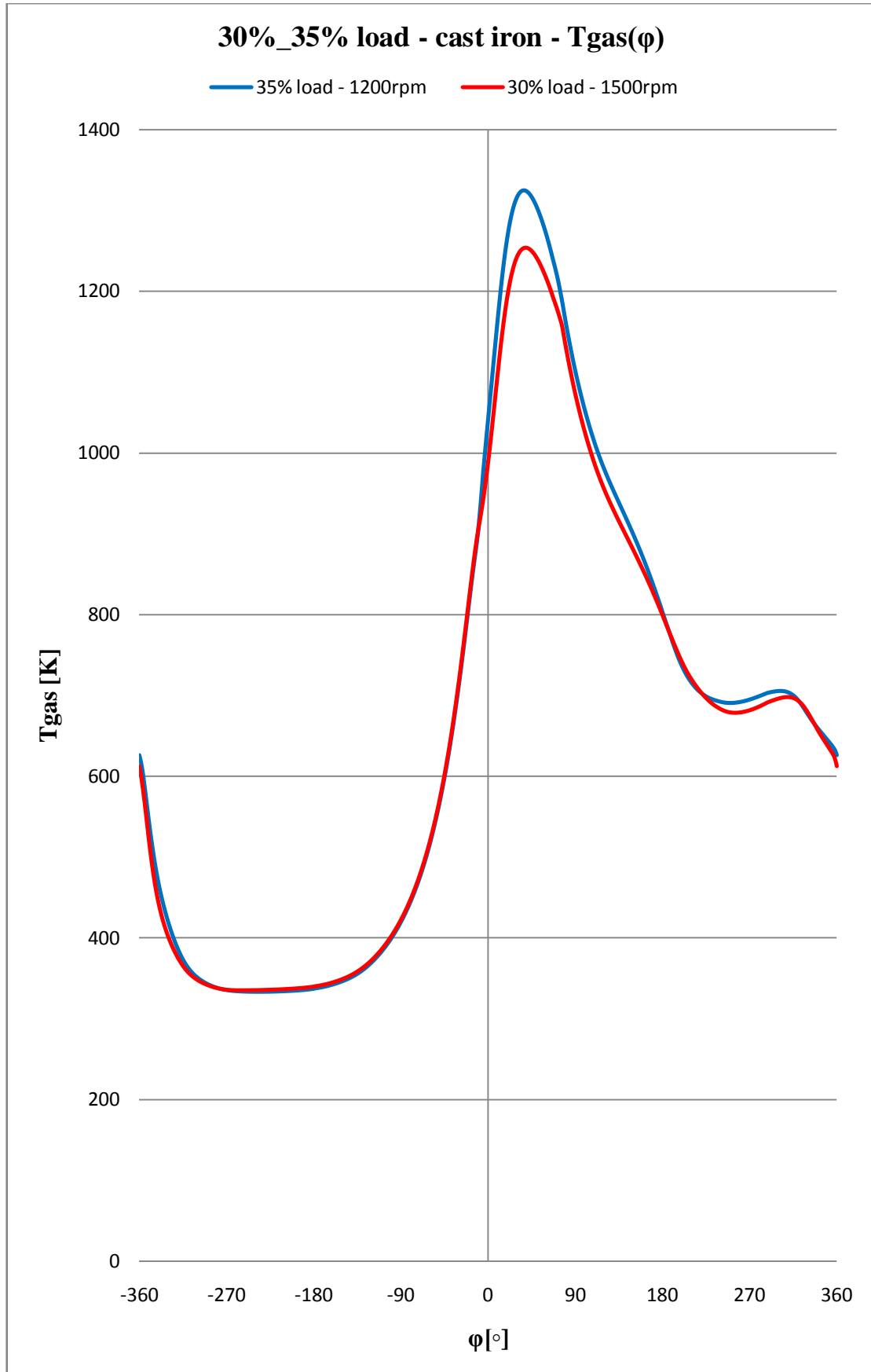
Θέσεις κινηματικού μηχανισμού Εμβόλου – Διωστήρα – Στροφάλου

Σχήμα 4.2

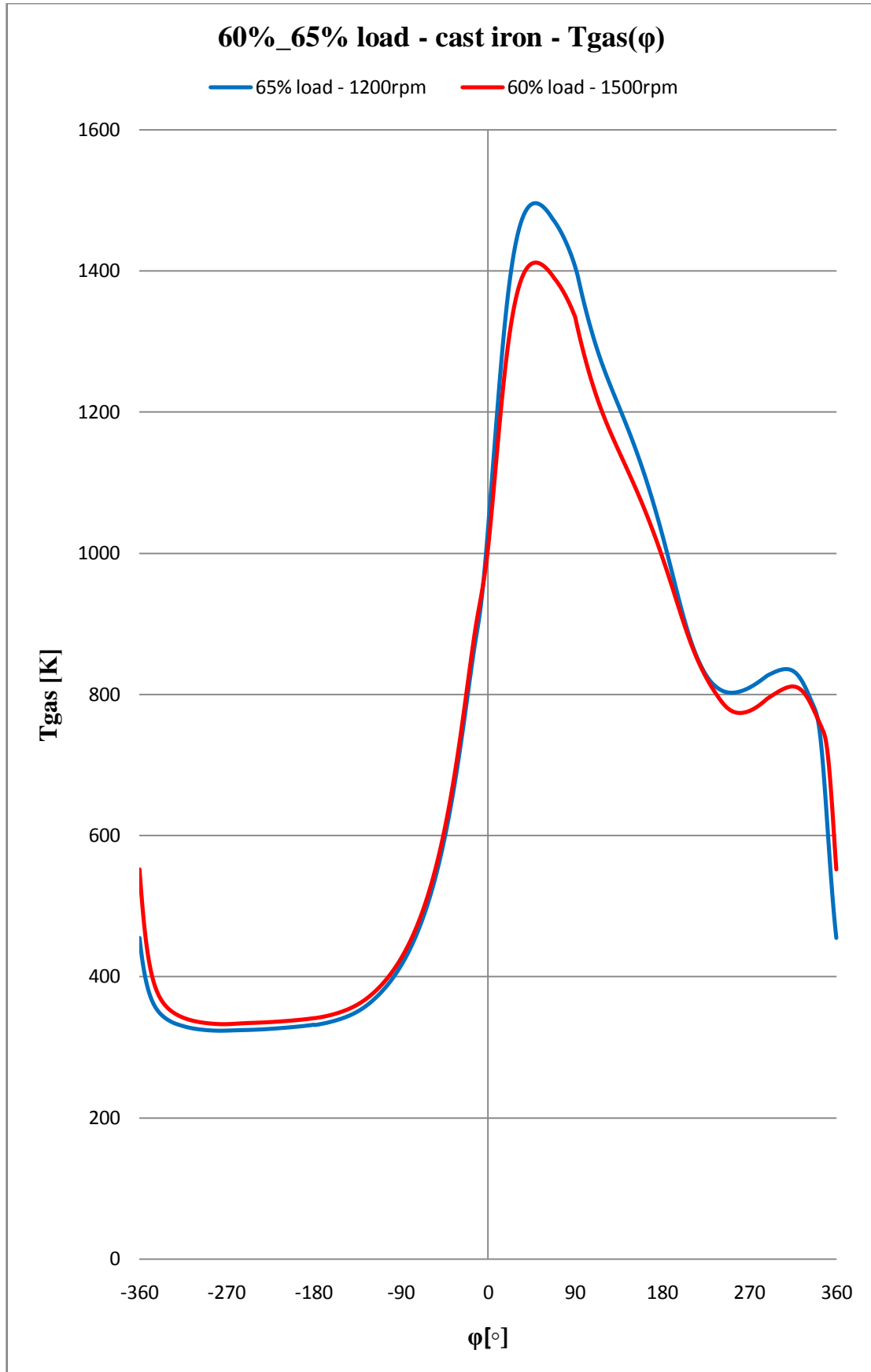
4.1. Θερμοκρασία αερίων $T_{gas}[K]$ συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.



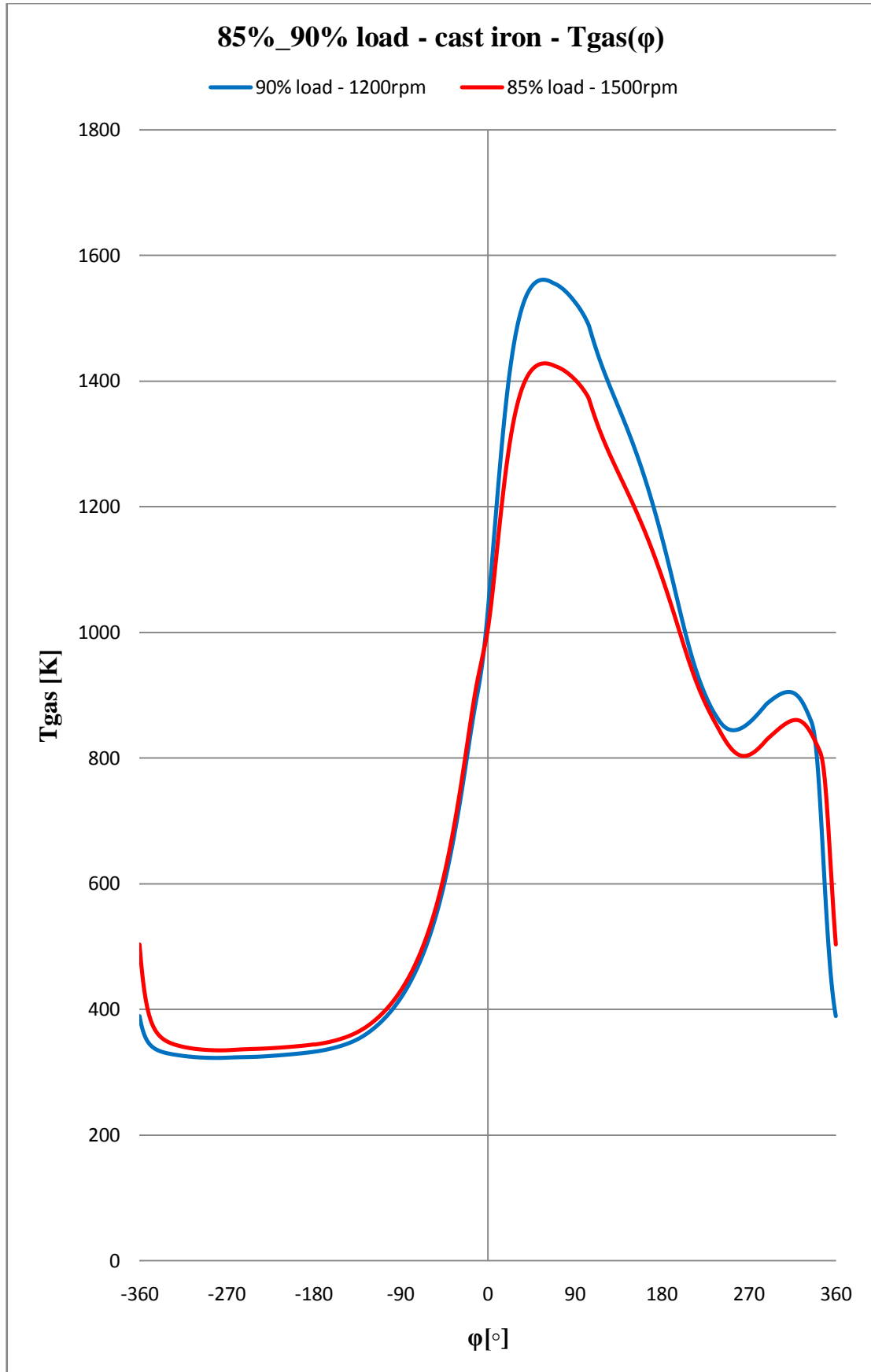
Διάγραμμα 4.1.1.



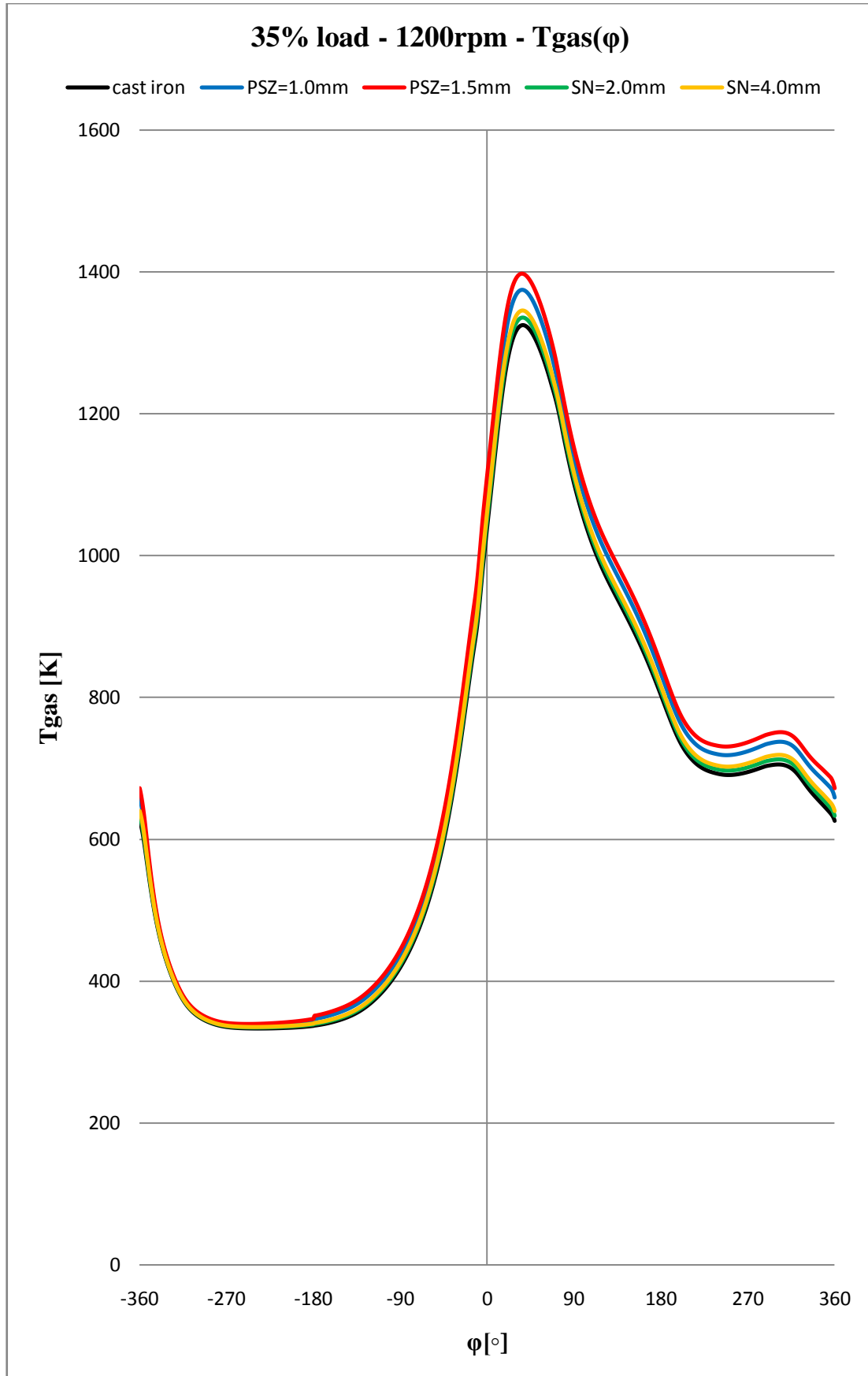
Διάγραμμα 4.1.2.



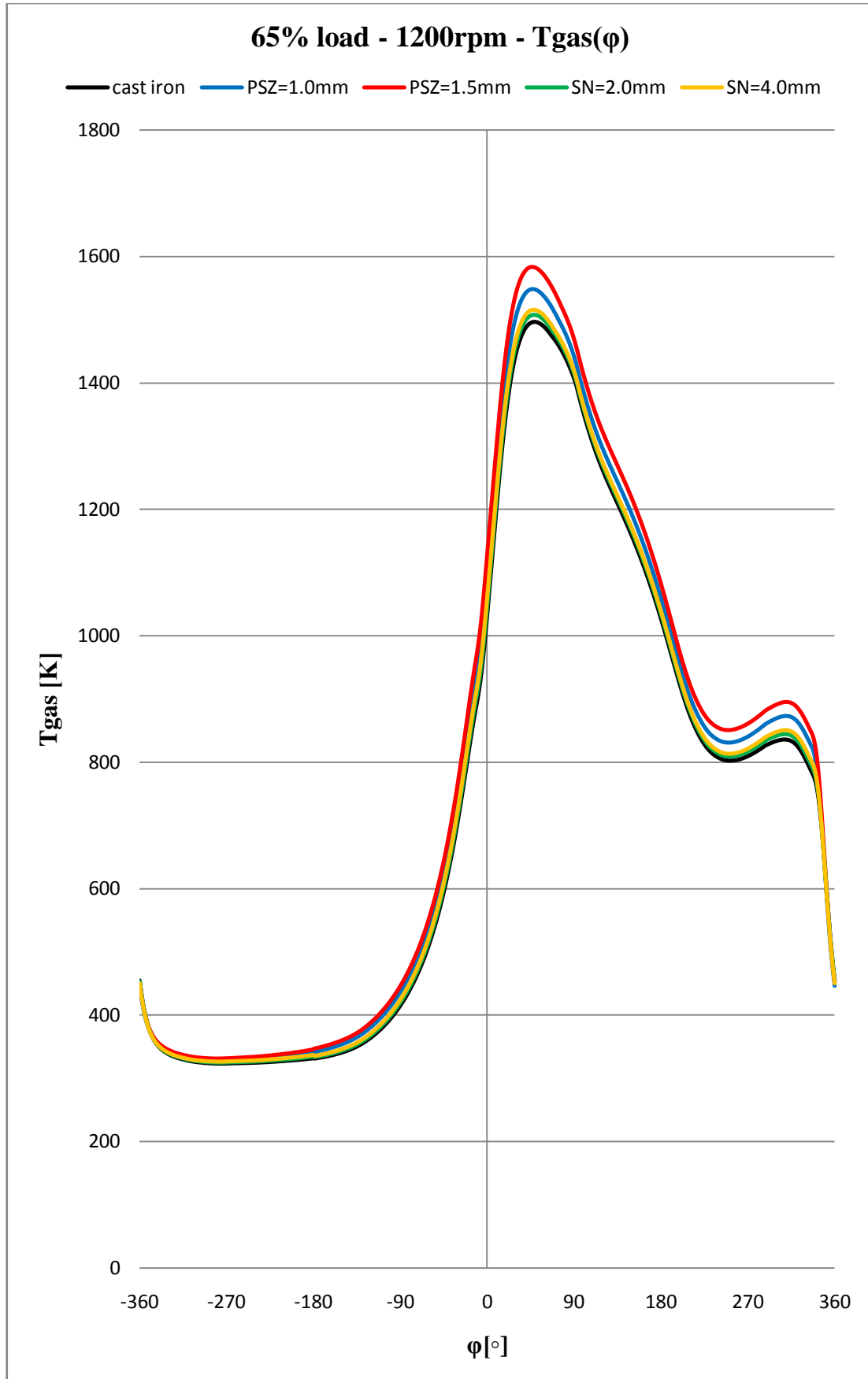
Διάγραμμα 4.1.3.



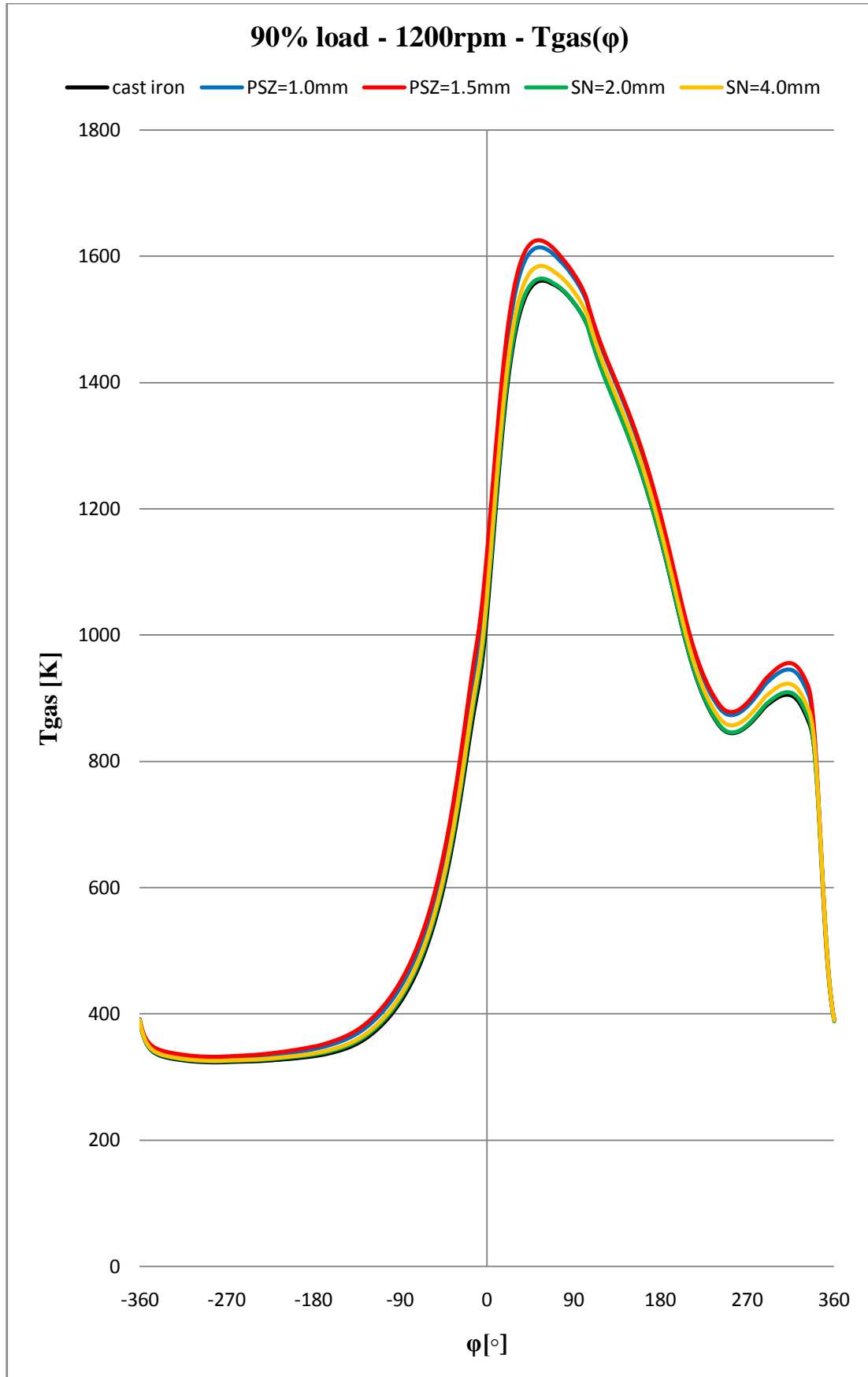
Διάγραμμα 4.1.4.



Διάγραμμα 4.1.5.



Διάγραμμα 4.1.6.

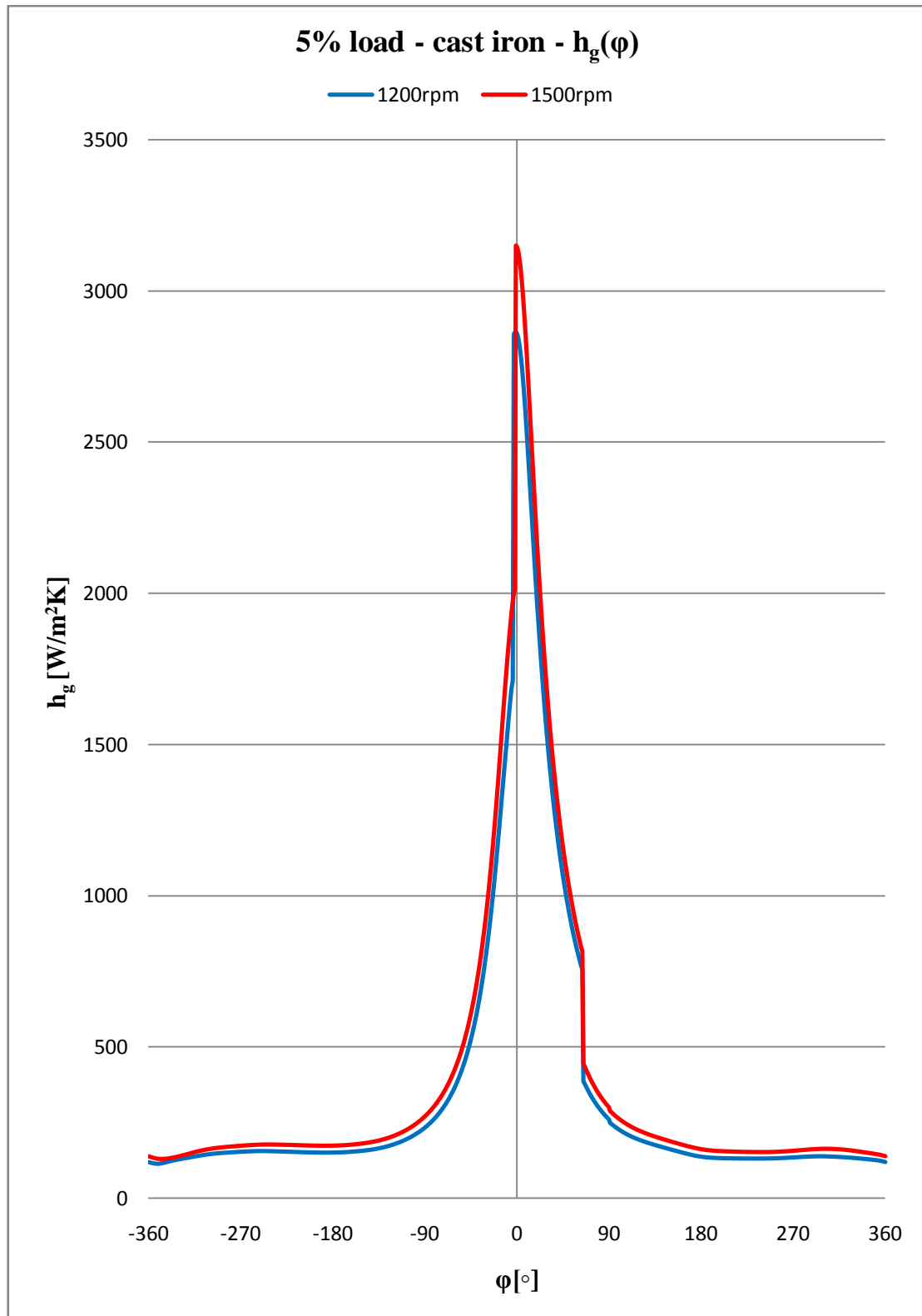


Διάγραμμα 4.1.7.

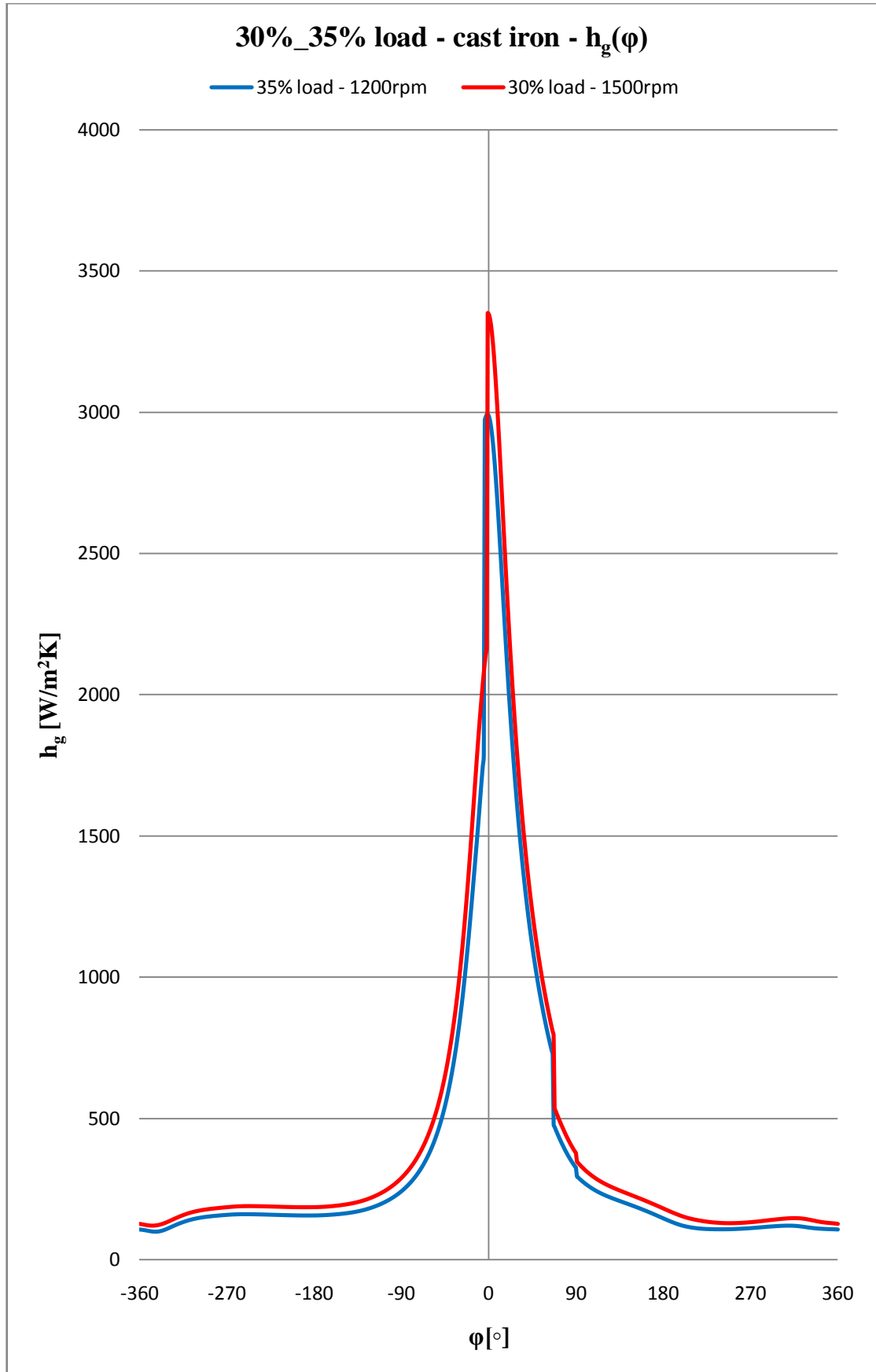
Διαγράμματα παραγράφου 4.1. (Δ.4.1.1. – Δ.4.1.7.) - $T_{\text{gas}}(\varphi)$

Από τα διαγράμματα αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας αερίου στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης [T_{gas}] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου [φ]. Η συνάρτηση αυτή είναι περιοδική, όπως και η λειτουργία του κινητήρα σε μόνιμη κατάσταση. Η ελάχιστη θερμοκρασία είναι η ίδια (~ 350 K) και φυσικά αντιστοιχεί στη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο θάλαμο καύσης κατά τη διάρκεια της εισαγωγής. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνει απότομα κατά την φάση της συμπίεσης και παίρνει τη μέγιστη τιμή της λίγες μοίρες μετά το άνω νεκρό σημείο ($\varphi = 0^0$) κατά την καύση του μίγματος. Επίσης παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας των αερίων (από 990 K έως 1620 K) καθώς αυξάνει το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα (από 5% έως 90%), λόγω αύξησης του Φ .

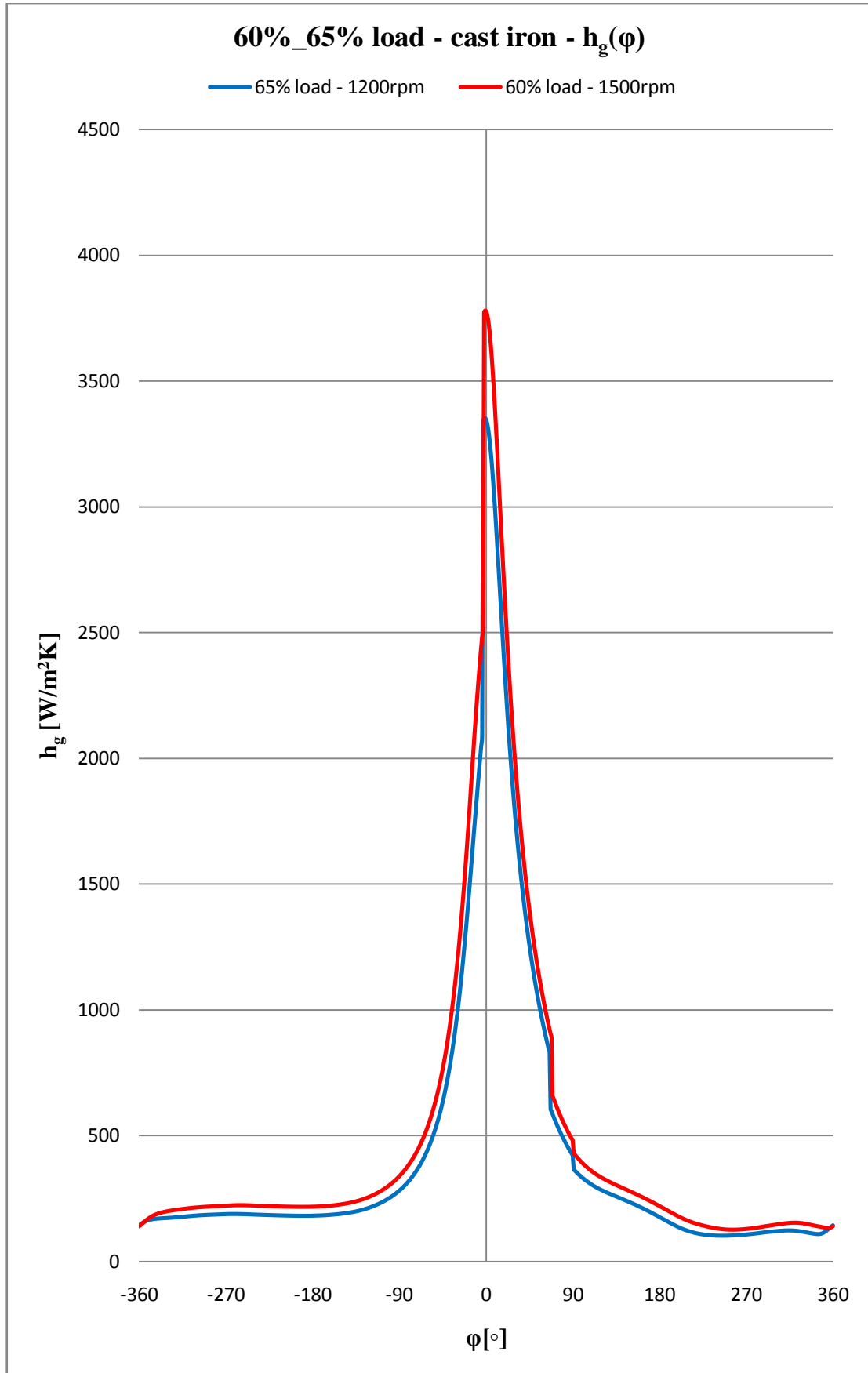
4.2. Στιγμαία σταθερά μετάδοσης θερμότητας αερίου h_g [W/m²K] συναρτήσει της γωνίας στρόφαλου φ] σε διάφορα φορτία.



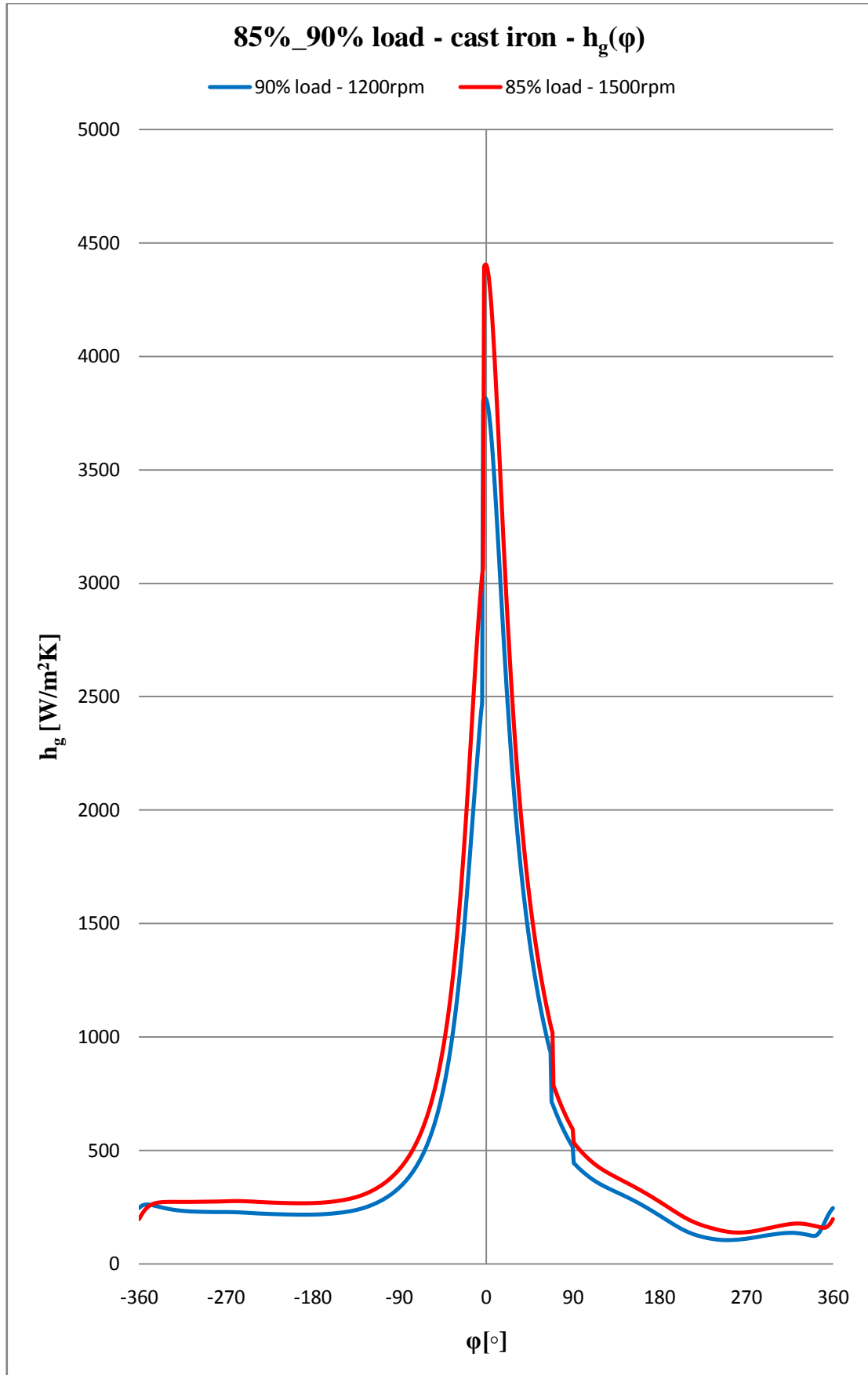
Διάγραμμα 4.2.1.



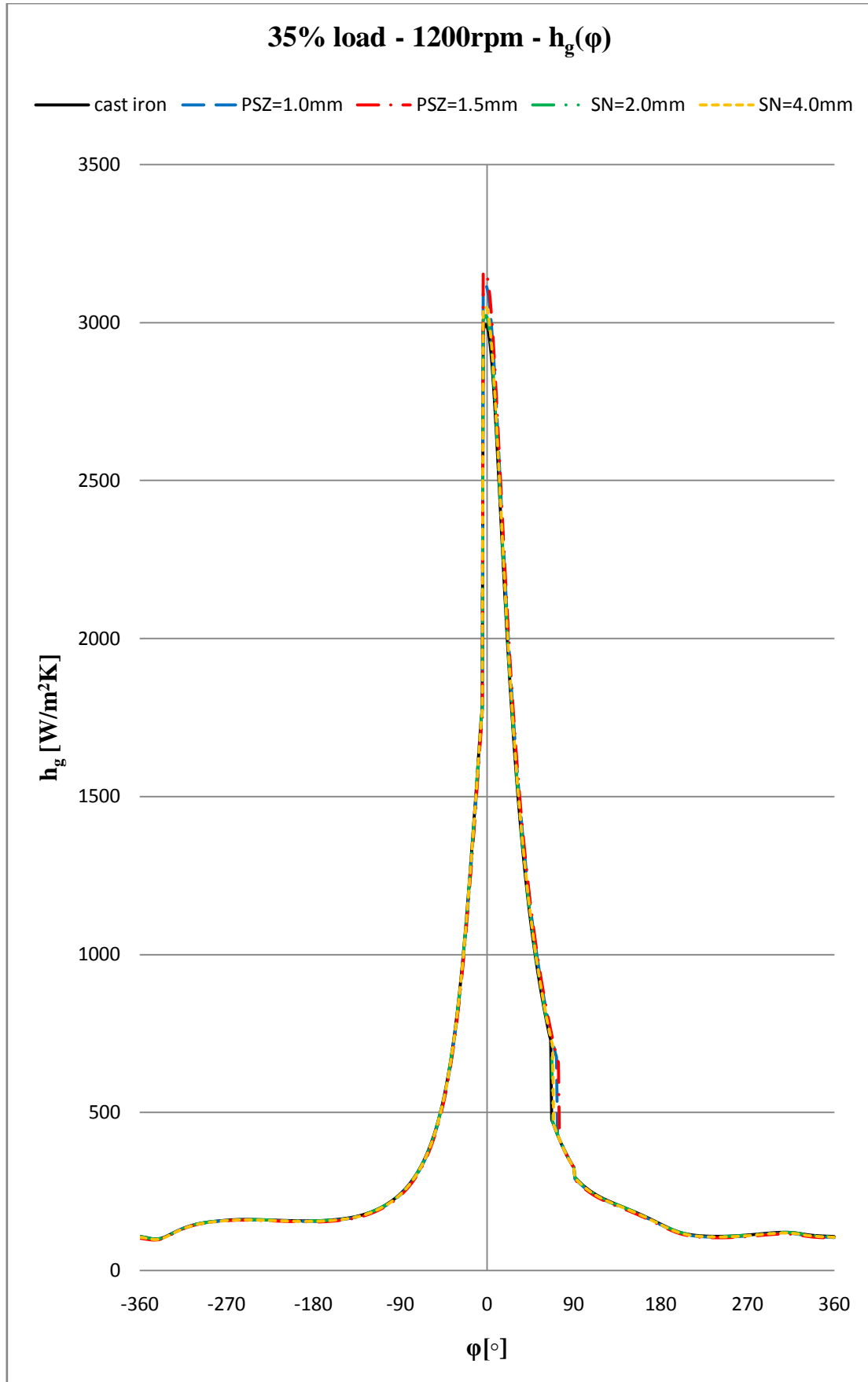
Διάγραμμα 4.2.2.



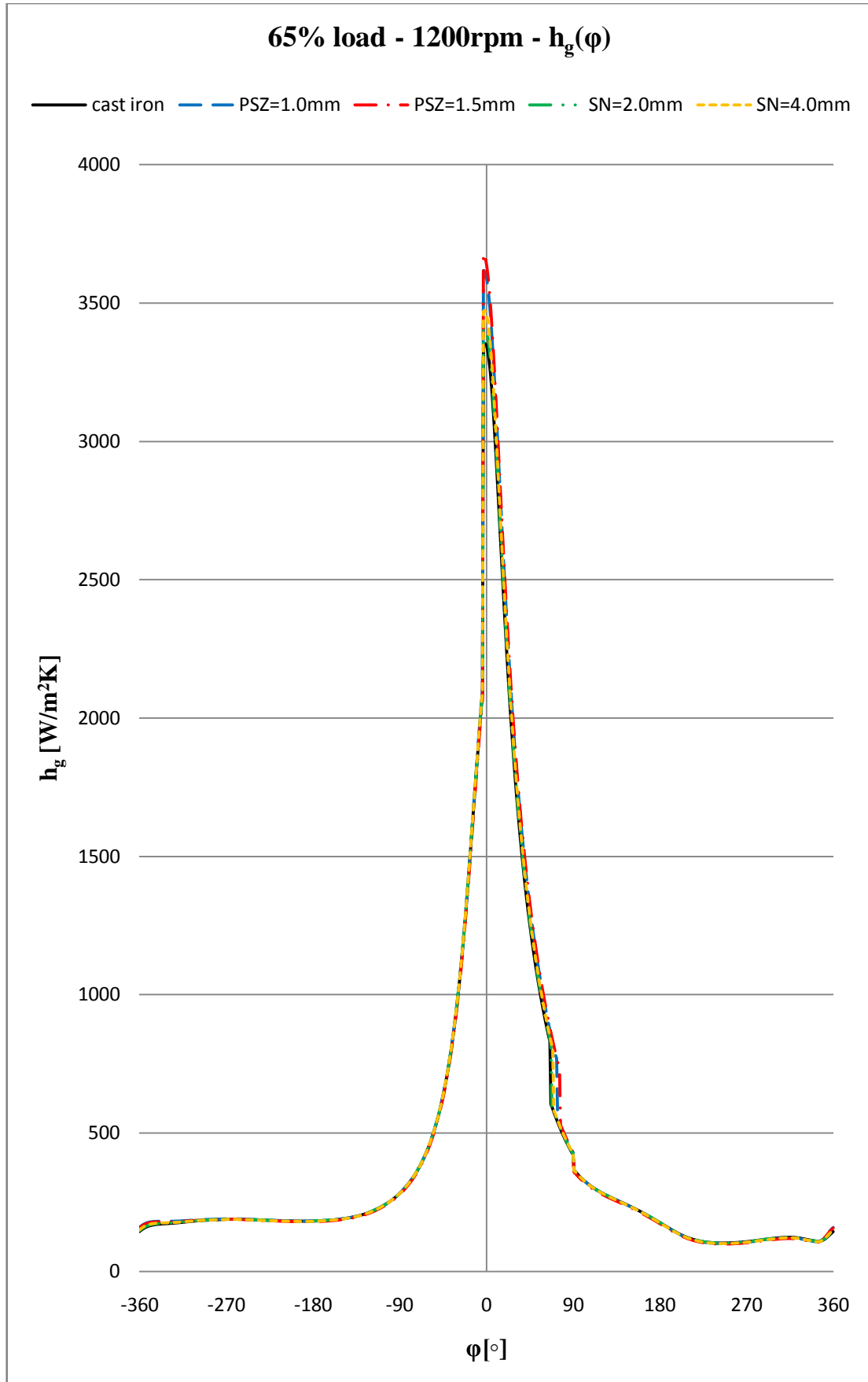
Διάγραμμα 4.2.3.



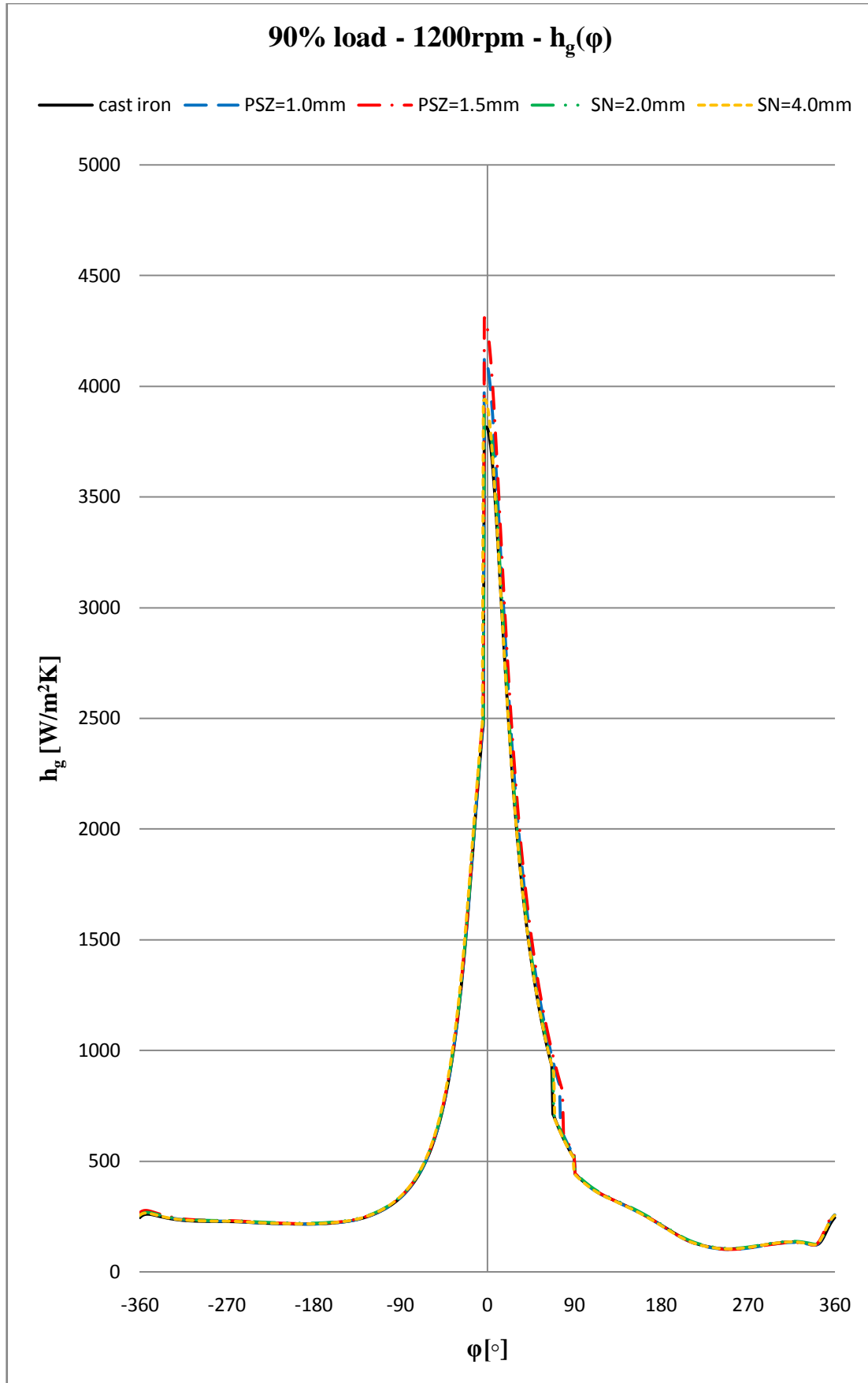
Διάγραμμα 4.2.4.



Διάγραμμα 4.2.5.



Διάγραμμα 4.2.6.

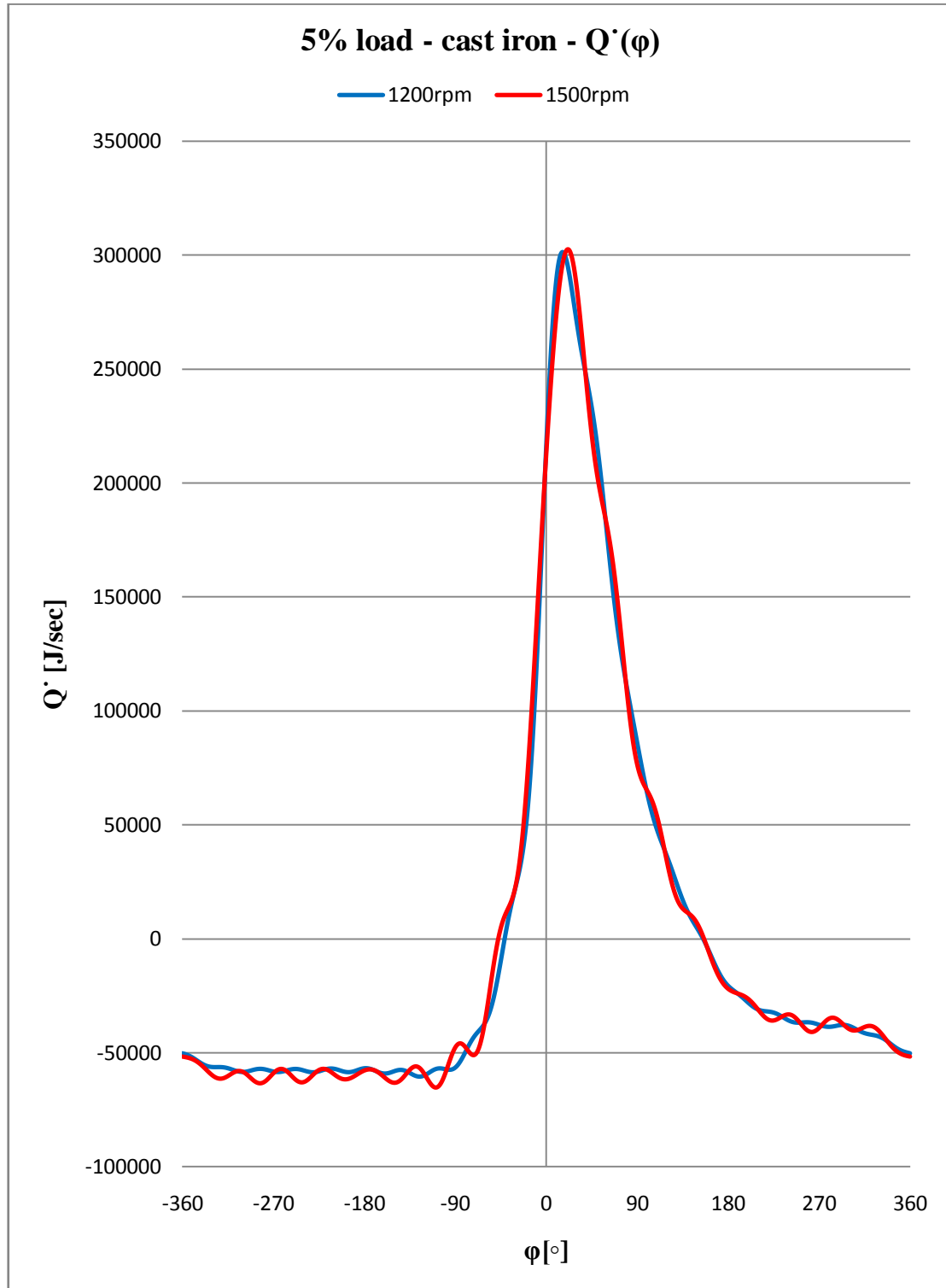


Διάγραμμα 4.2.7.

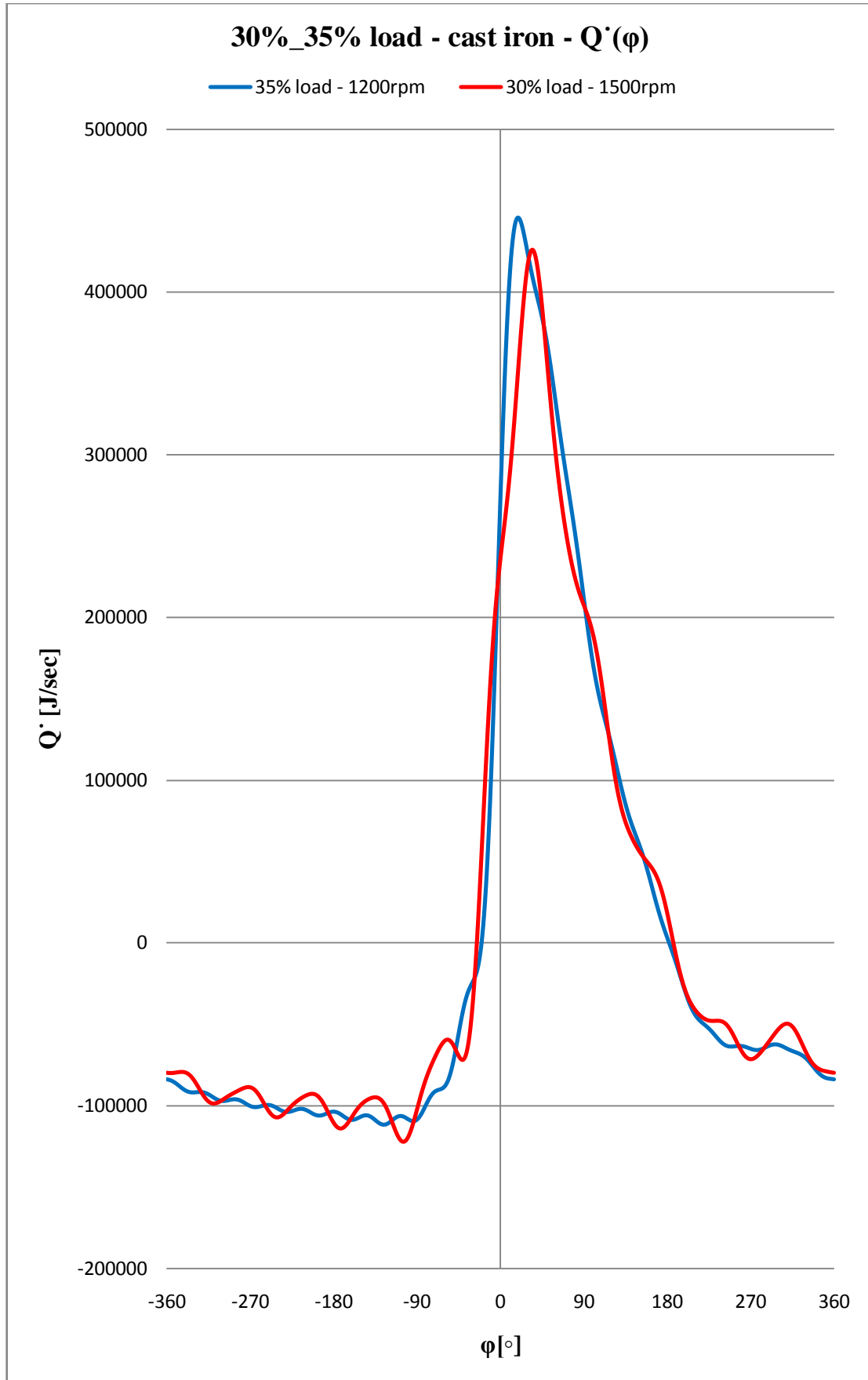
Διαγράμματα παραγράφου 4.2. (Δ.4.2.1. – Δ.4.2.7.) - $h_g(\varphi)$

Από τα διαγράμματα αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της στιγμιαίας σταθεράς μετάδοσης θερμότητας των αερίων στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης [h_g] συναρτήσει της γωνίας στρόφαλο φ [φ]. Η συνάρτηση αυτή είναι περιοδική, όπως και η λειτουργία του κινητήρα. Η ελάχιστη τιμή της είναι η ίδια ($\sim 150 \text{ W/m}^2\text{K}$). Η τιμή της παρουσιάζει μέγιστο στο άνω νεκρό σημείο ($\varphi = 0^\circ$) και εκατέρωθεν του αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται απότομα κατά τη φάση της καύσης του μίγματος. Επίσης παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας σταθεράς μετάδοσης θερμότητας των αερίων (από $3150 \text{ W/m}^2\text{K}$ έως $4400 \text{ W/m}^2\text{K}$) καθώς αυξάνει το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα (από 5 % έως 90 % λόγω αύξησης του Φ).

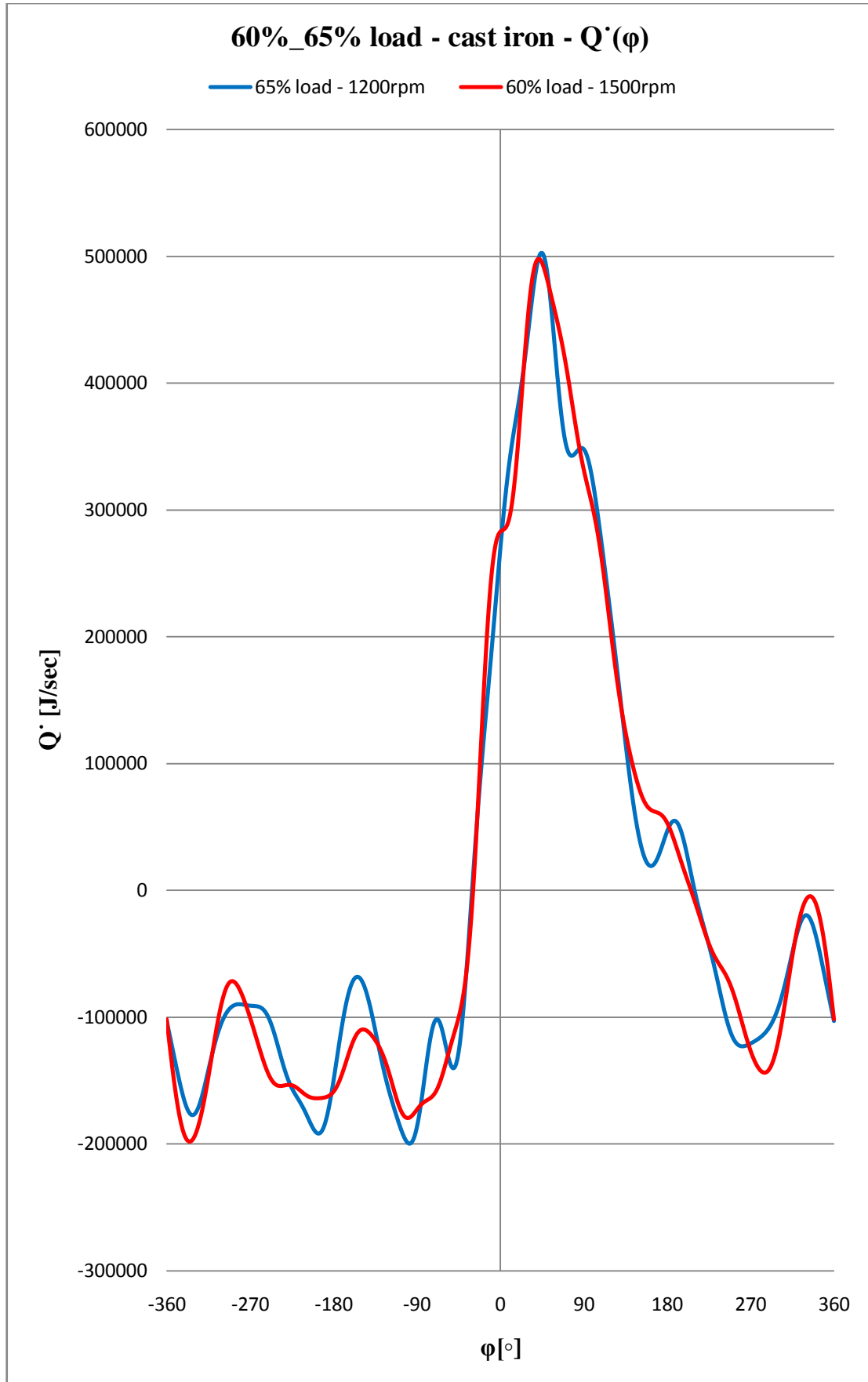
4.3. Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου \dot{Q} [J/sec] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου φ] σε διάφορα φορτία.



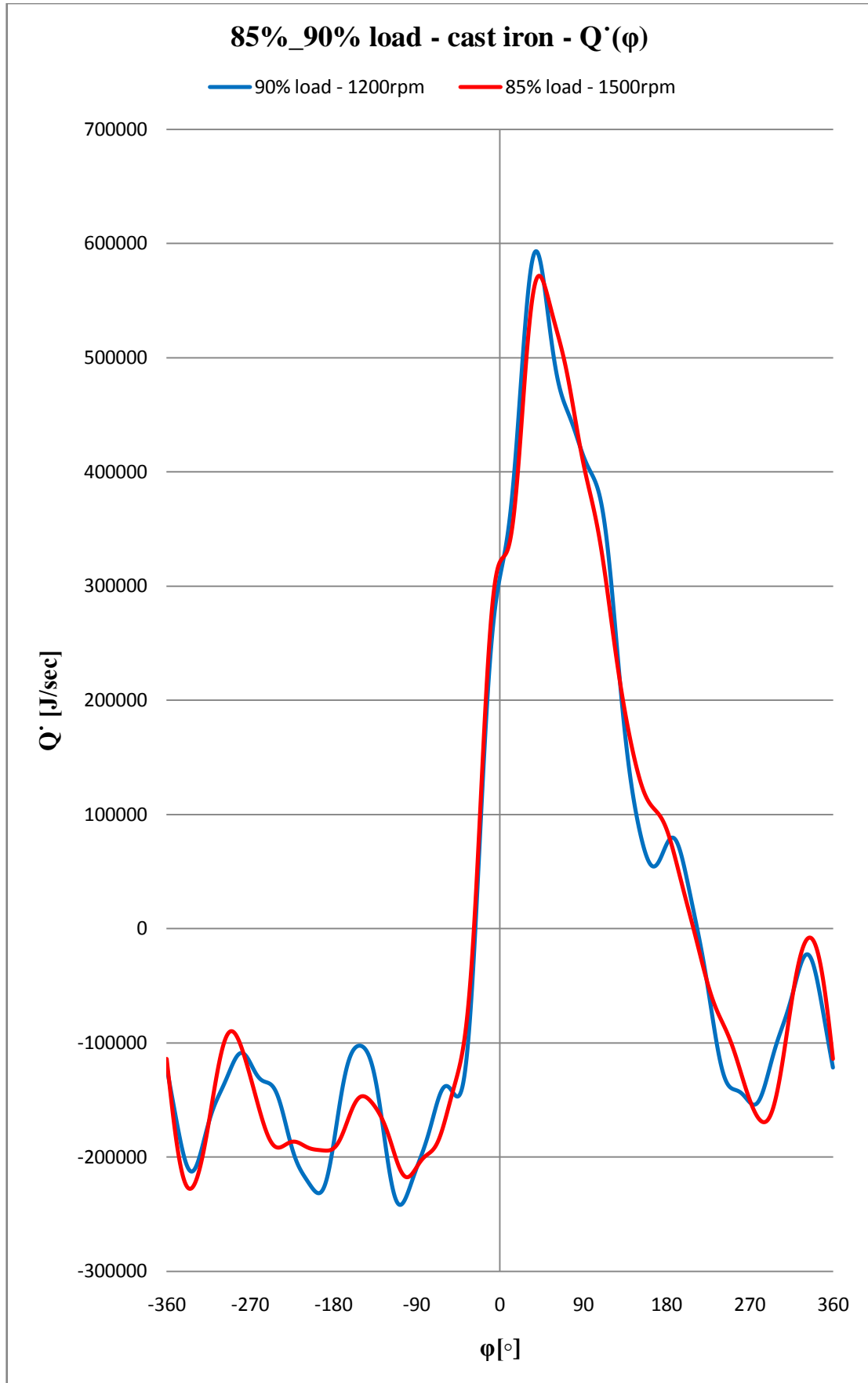
Διάγραμμα 4.3.1.



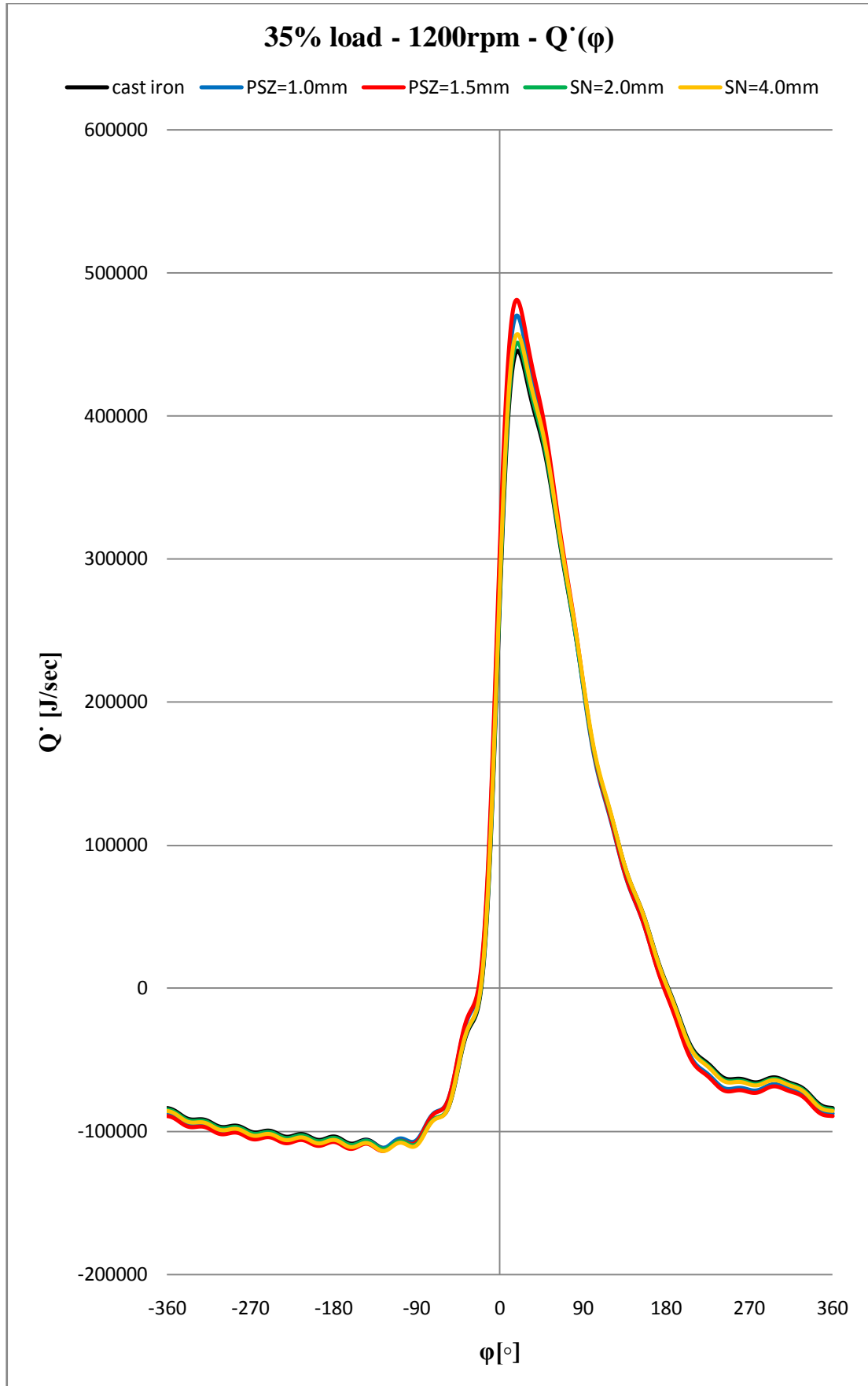
Διάγραμμα 4.3.2.



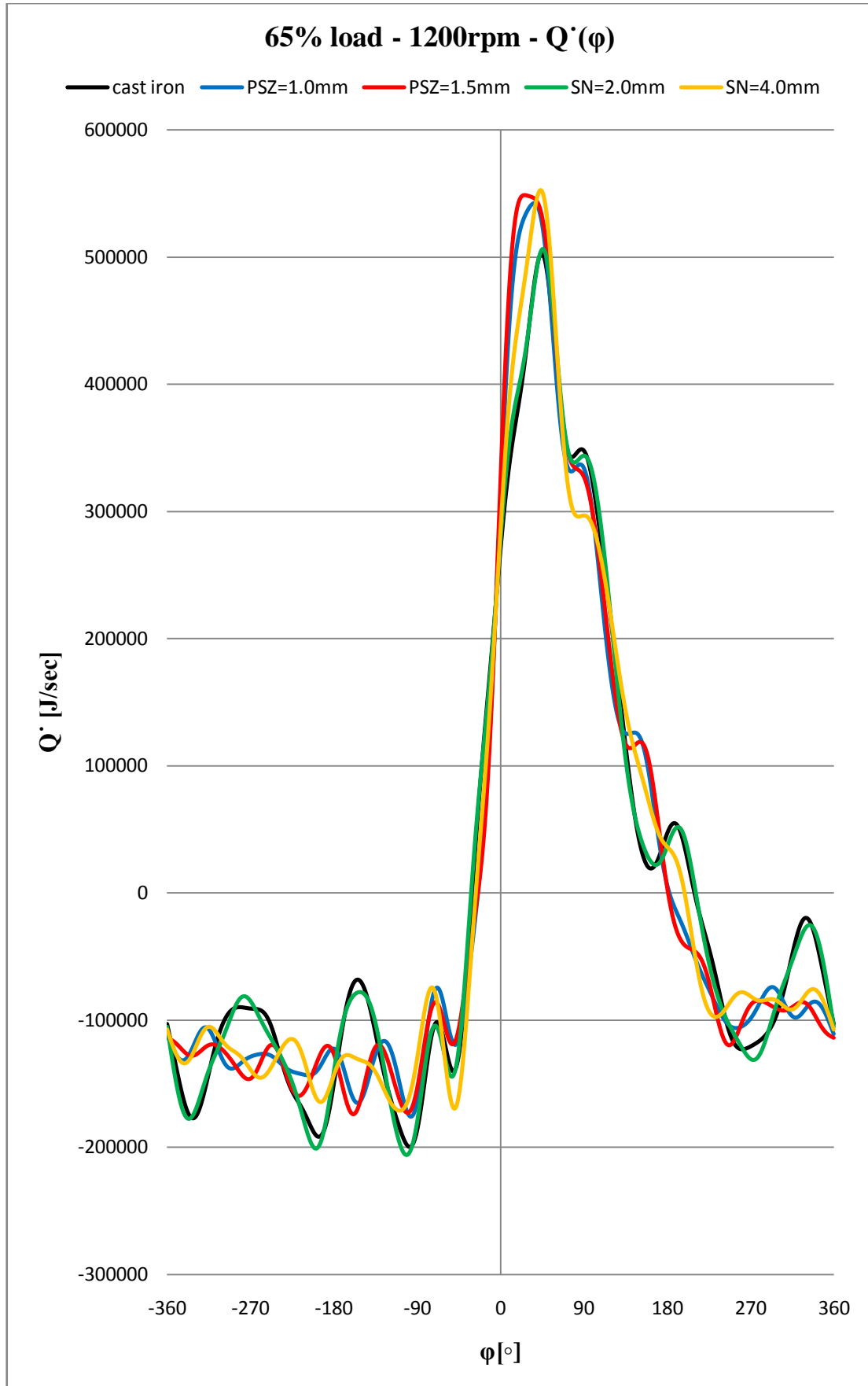
Διάγραμμα 4.3.3.



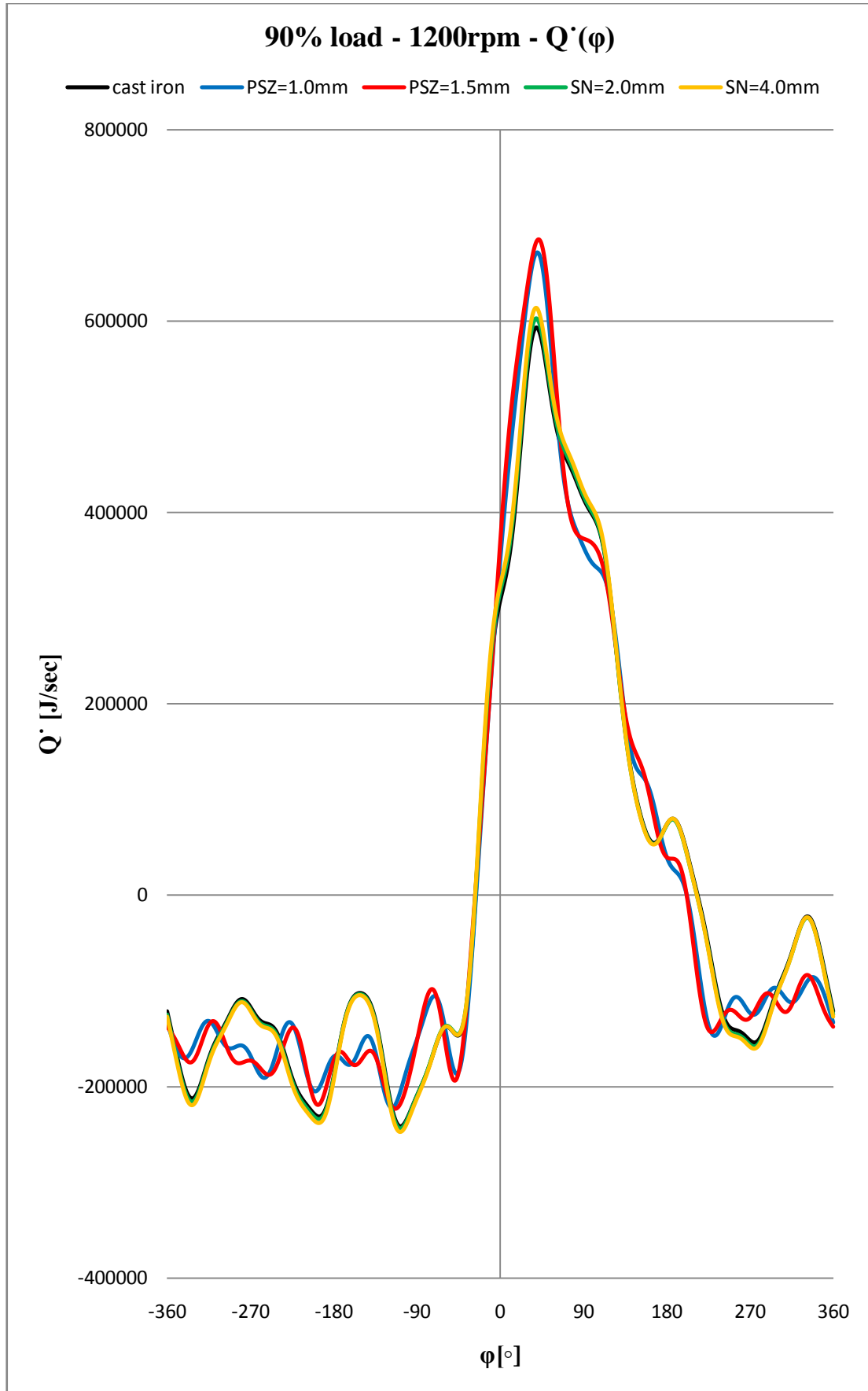
Διάγραμμα 4.3.4.



Διάγραμμα 4.3.5.



Διάγραμμα 4.3.6.

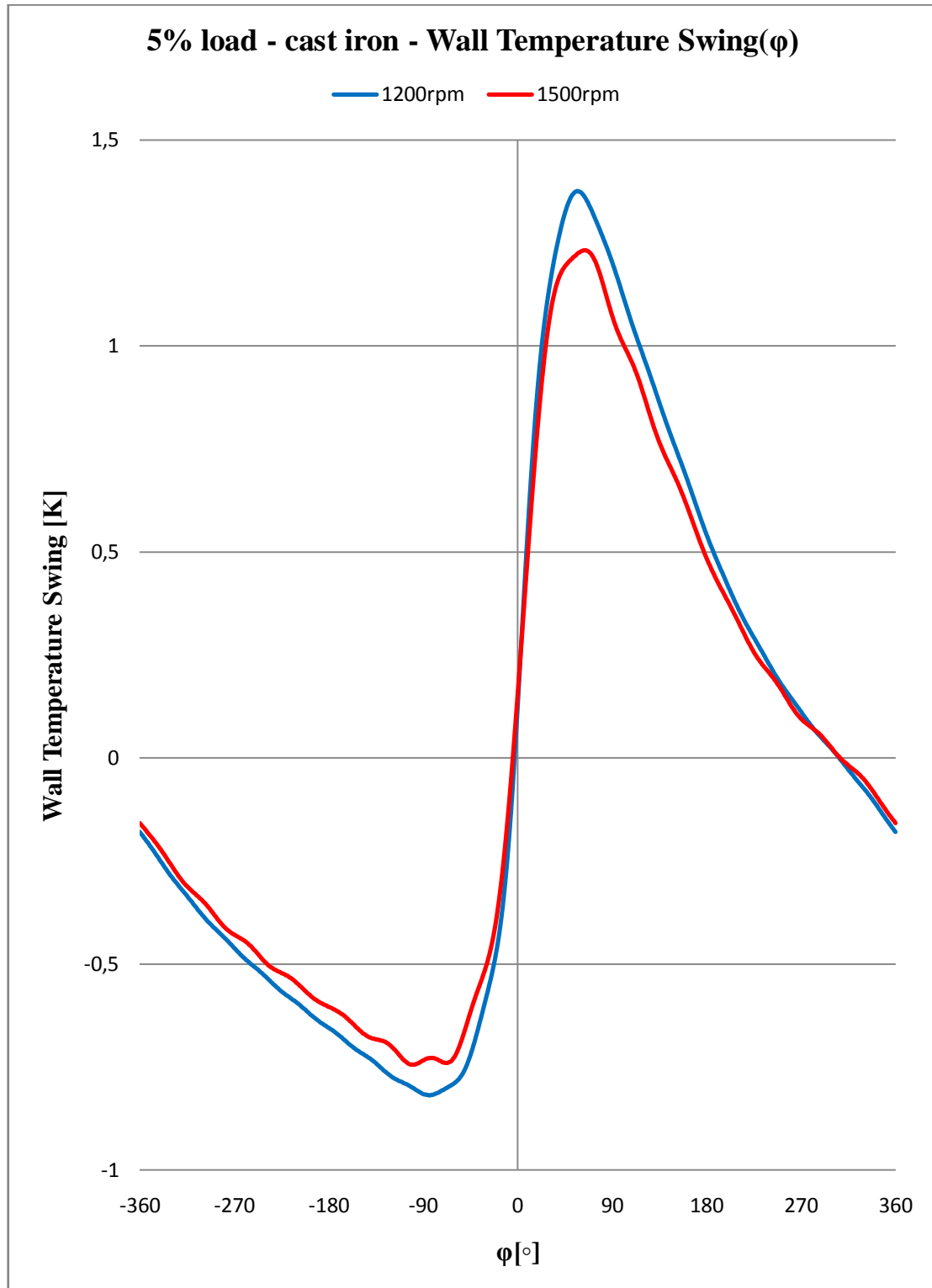


Διάγραμμα 4.3.7.

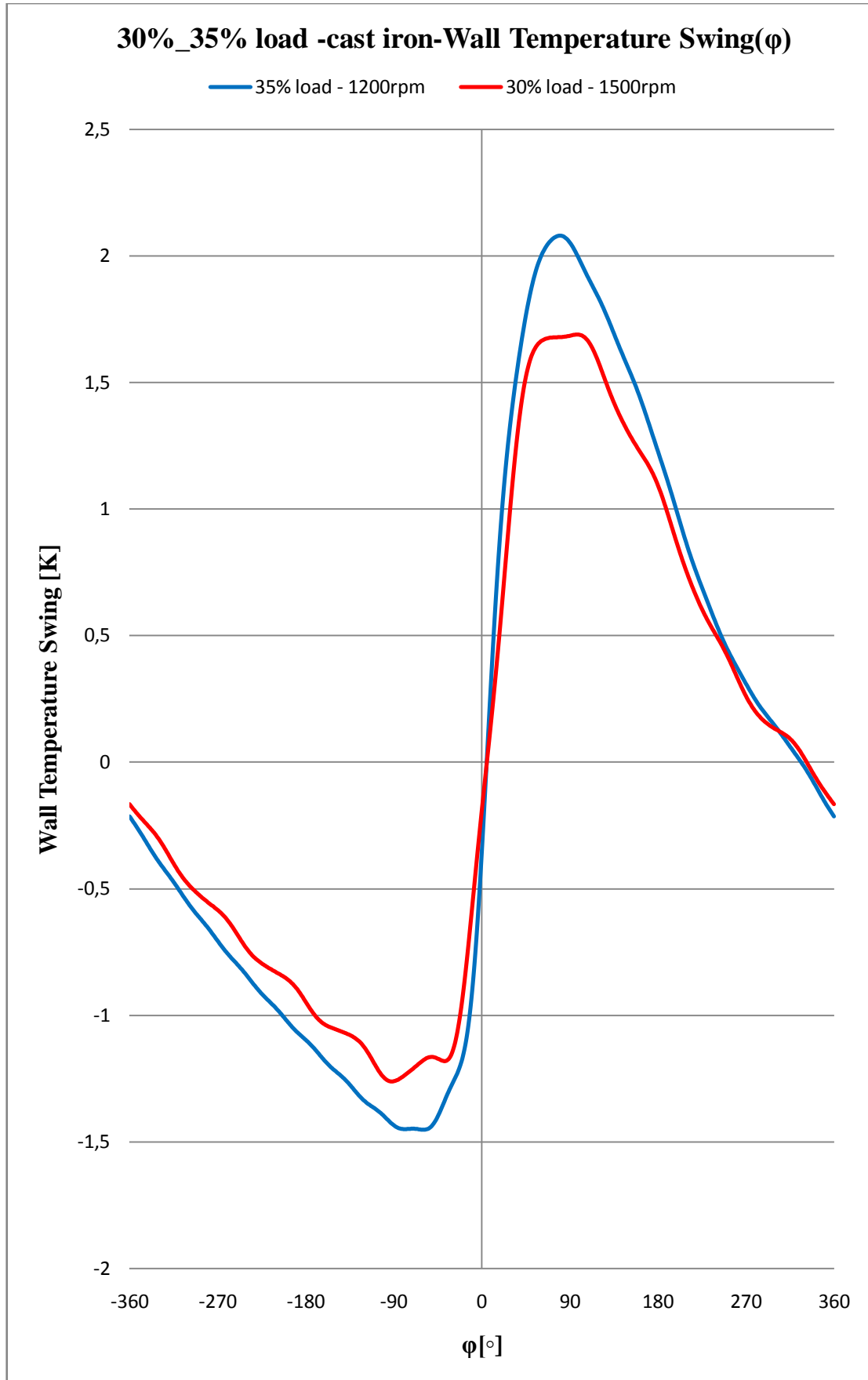
Διαγράμματα παραγράφου 4.3. (Δ.4.3.1. – Δ.4.3.7.) - $\dot{Q}(\varphi)$

Από τα διαγράμματα αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης [\dot{Q}] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου [φ]. Η συνάρτηση αυτή είναι περιοδική, όπως και η λειτουργία του κινητήρα. Οι τιμές της είναι και αρνητικές αλλά και θετικές. Οι αρνητικές τιμές εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της εισαγωγής του αέρα στον θάλαμο καύσης, στο αρχικό τμήμα της συμπίεσης και στην εξαγωγή των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης. Το αρνητικό πρόσημο συμβολίζει την ροή θερμότητας από τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου καύσης προς τα αέρια, τα οποία στη συγκεκριμένη φάση έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία. Οι θετικές τιμές εμφανίζονται στο τελικό τμήμα της συμπίεσης και καθ' όλη τη διάρκεια της εκτόνωσης. Το θετικό πρόσημο συμβολίζει την ροή θερμότητας από τα θερμά αέρια καύσης προς τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης που έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία. Η τιμή του παρουσιάζει μέγιστο λίγες μοίρες μετά το άνω νεκρό σημείο ($\varphi = 0^0$) και εκατέρωθεν του αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται απότομα κατά τη φάση της καύσης του μίγματος, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς τότε παρατηρείται και η μέγιστη θερμοκρασία των αερίων [T_{gas}]. Επίσης παρατηρείται αύξηση των ακρότατων τιμών του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας (*ελάχιστη*: από -55 kJ/sec έως -250 kJ/sec, *μέγιστη*: από 300 kJ/sec έως 700 kJ/sec) καθώς αυξάνει το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα (από 5% έως 90%), λόγω αύξησης του Φ .

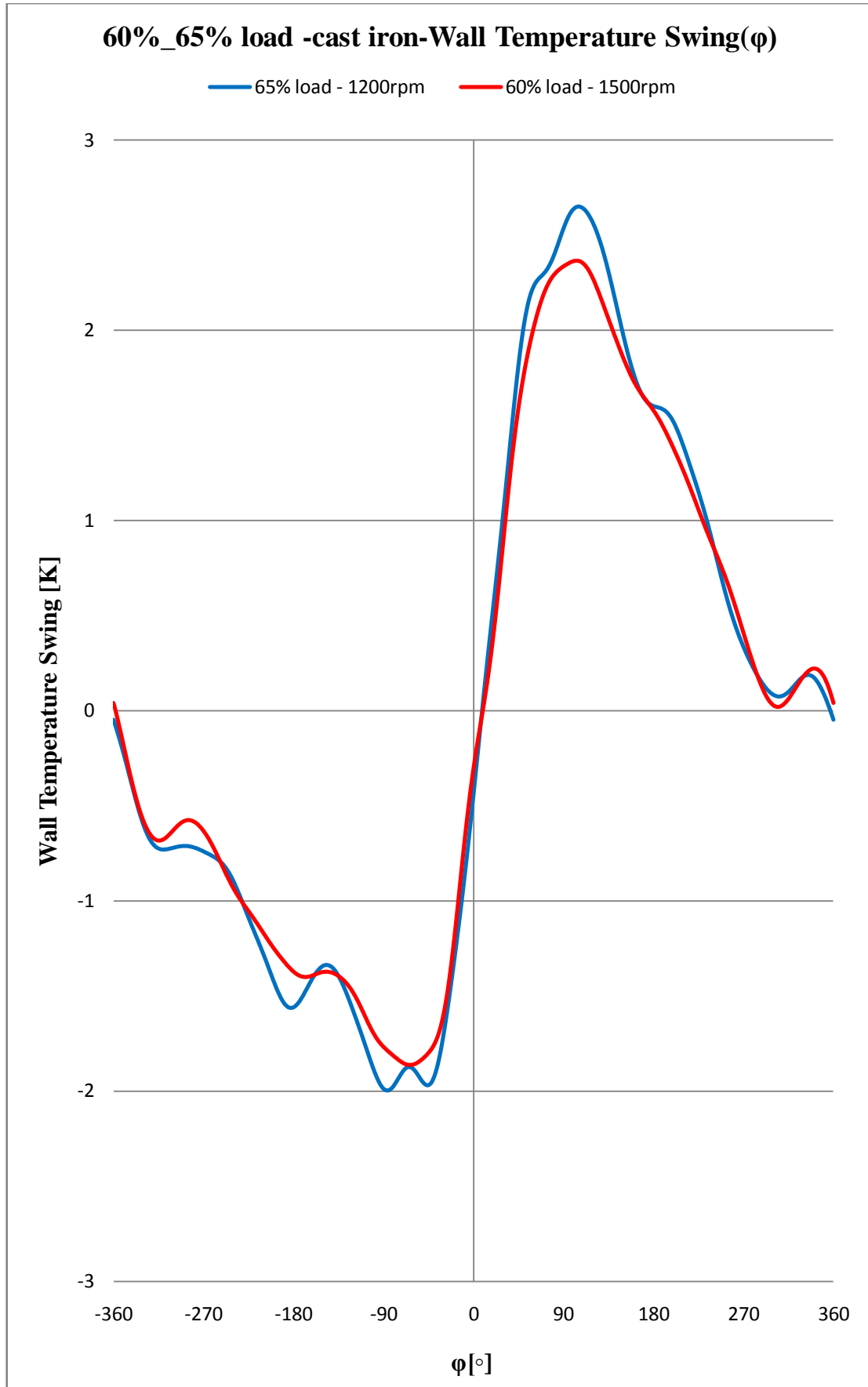
4.4. Θερμοκρασιακή ταλάντωση στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου, βάθος $s=0$, Wall Temperature Swing [K] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου φ σε διάφορα φορτία.



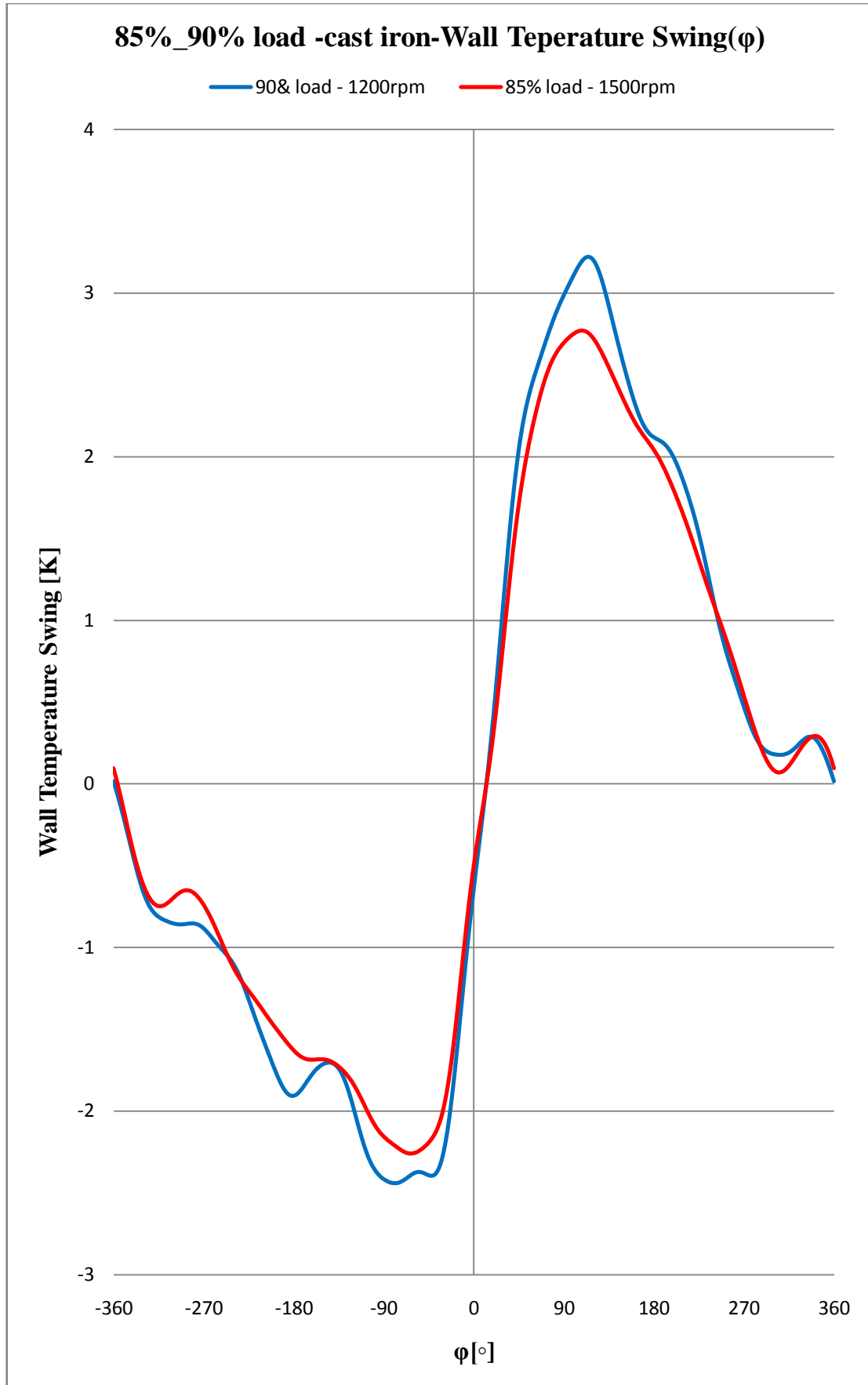
Διάγραμμα 4.4.1.



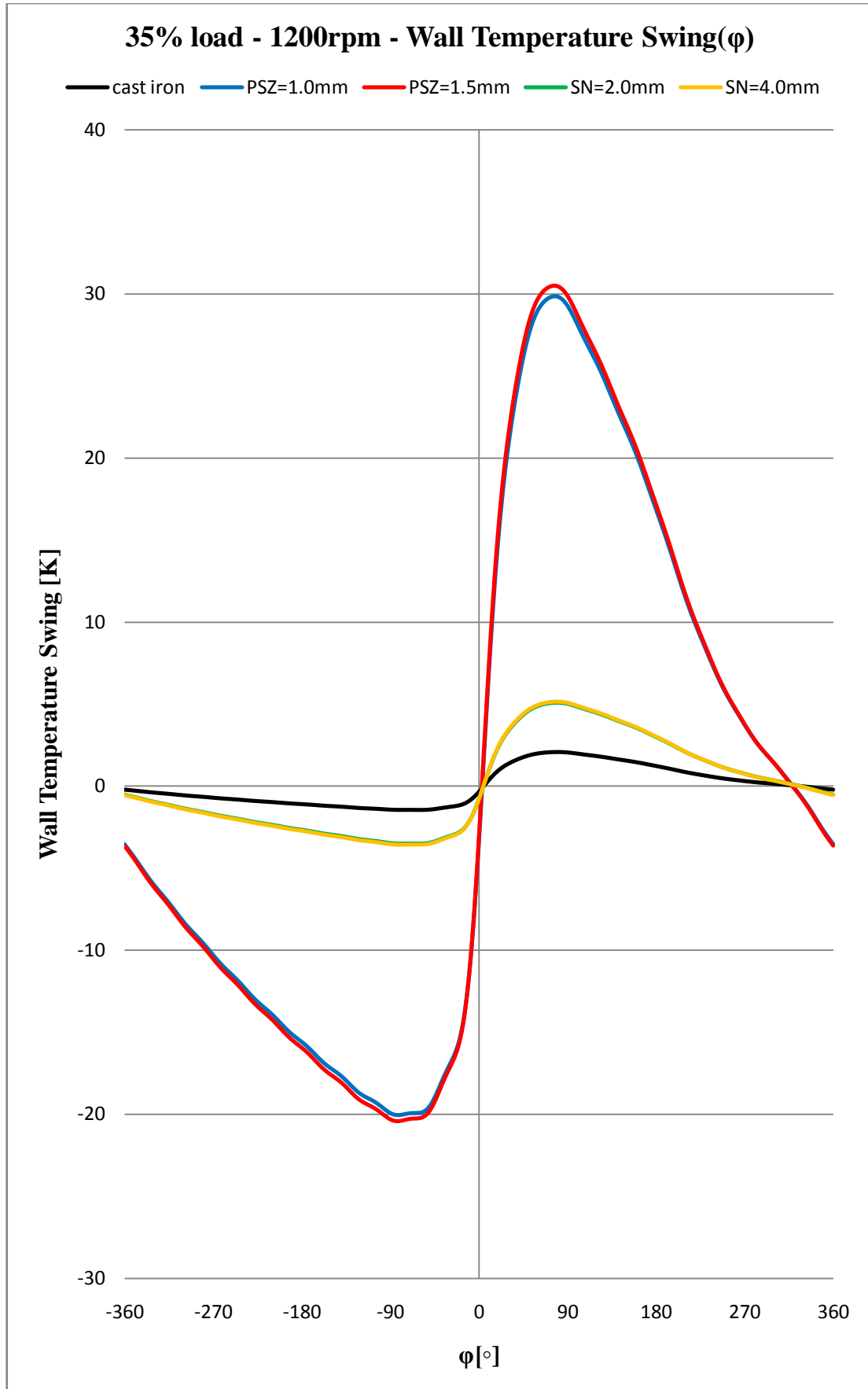
Διάγραμμα 4.4.2.



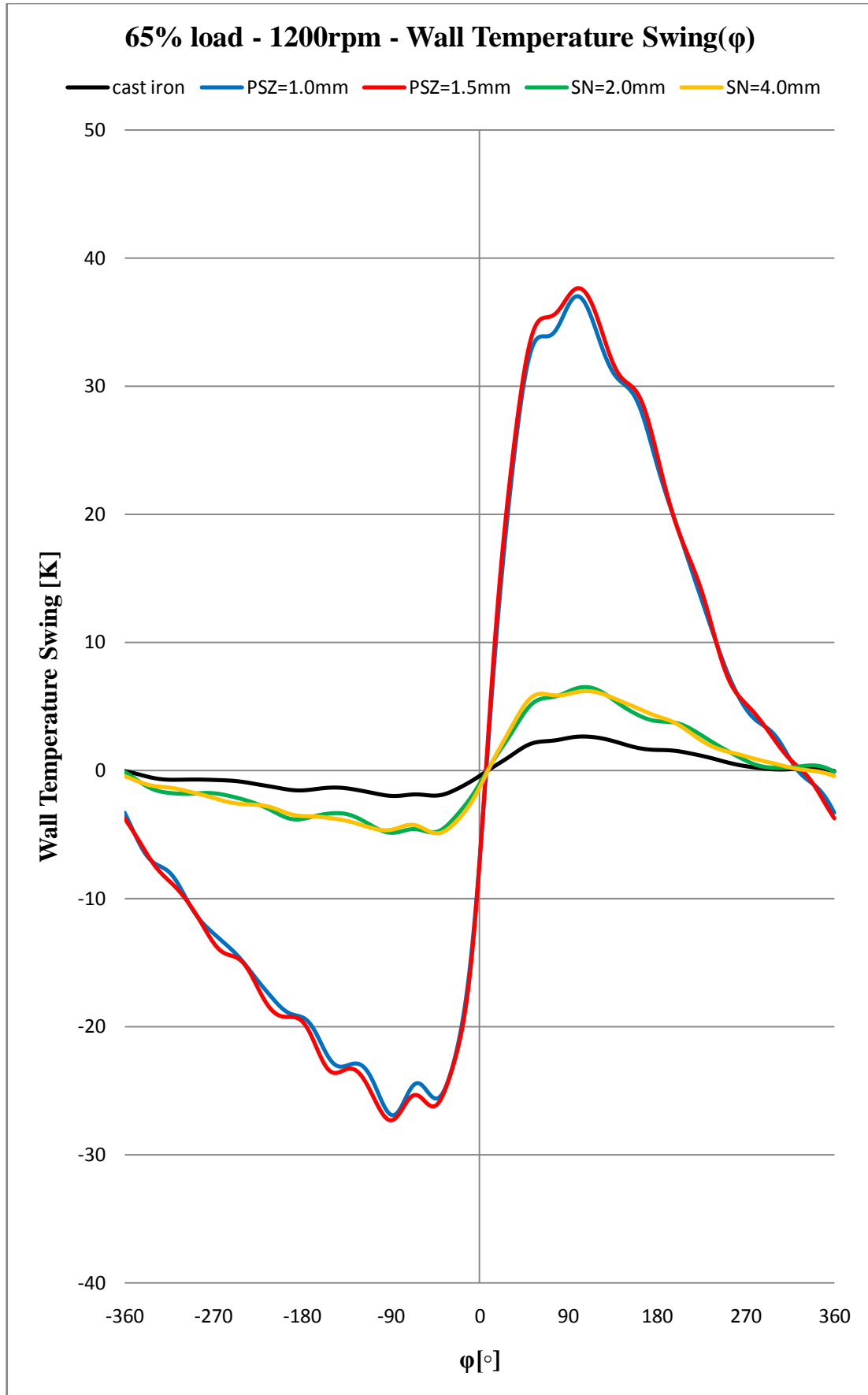
Διάγραμμα 4.4.3.



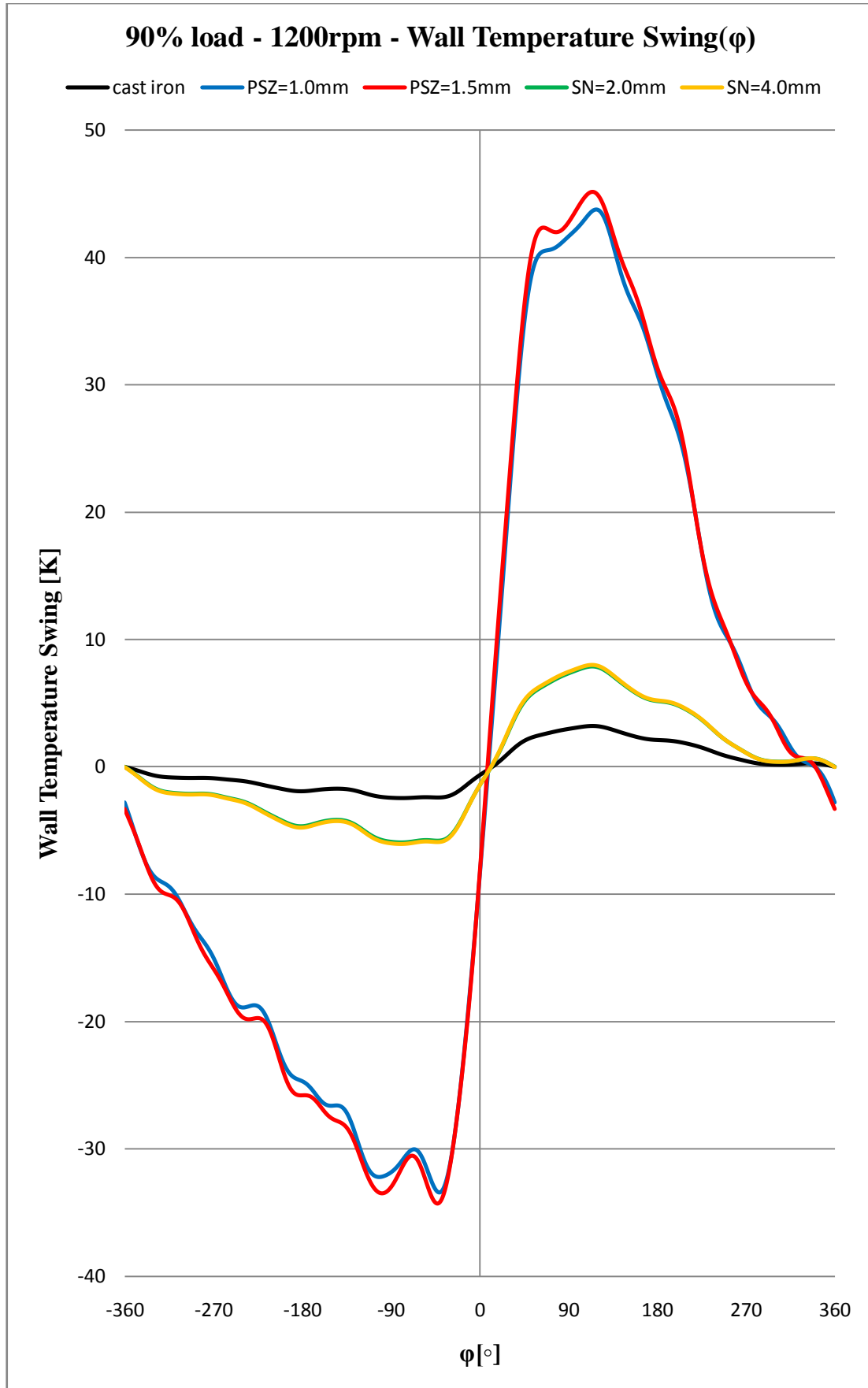
Διάγραμμα 4.4.4.



Διάγραμμα 4.4.5.



Διάγραμμα 4.4.6.



Διάγραμμα 4.4.7.

Διαγράμματα παραγράφου 4.4. (Δ.4.4.1. – Δ.4.4.7.) – Wall Temperature Swing(ϕ)

Από τα διαγράμματα αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου, βάθος $s=0$ [Wall Temperature Swing] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου [ϕ]. Η συνάρτηση αυτή είναι περιοδική, όπως και η λειτουργία του κινητήρα.

[Δ.4.4.1. – Δ.4.4.4.]

Τα διαγράμματα δείχνουν ότι το εύρος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του ίδιου υλικού (στη συγκεκριμένη περίπτωση χυτοσίδηρος, cast iron) αυξάνει με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα, παραμένοντας όμως πάντα σε πολύ χαμηλές τιμές (4 – 5 K), (Πίνακας 4.4.1.).

[Δ.4.4.5. – Δ.4.4.7.]

Τα διαγράμματα δείχνουν ότι το εύρος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του ίδιου υλικού (cast iron, PSZ, SN) αυξάνει με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα (από 5% έως 90%), λόγω αύξησης του Φ . Επίσης η αύξηση στο θερμοκρασιακό εύρος συγκρίνοντας τα υλικά μεταξύ τους ακολουθεί τη σειρά: cast iron, SN, PSZ, με μεγάλη διαφορά μεταξύ της PSZ σε σύγκριση με τα άλλα δύο: cast iron, SN, (Πίνακας 4.4.1.). Αυτό συμβαίνει λόγω των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των μονώσεων (α_w , k_w) οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.2, που στην περίπτωση της PSZ είναι ‘καλύτερες’ από την SN και φυσικά πολύ ‘καλύτερες’ από την απουσία μόνωσης (cast iron).

Υλικό	Θερμοκρασιακό εύρος [K]
cast iron	4 - 5
SN	7 - 12
PSZ	50 - 80

Θερμοκρασιακό εύρος ταλάντωσης

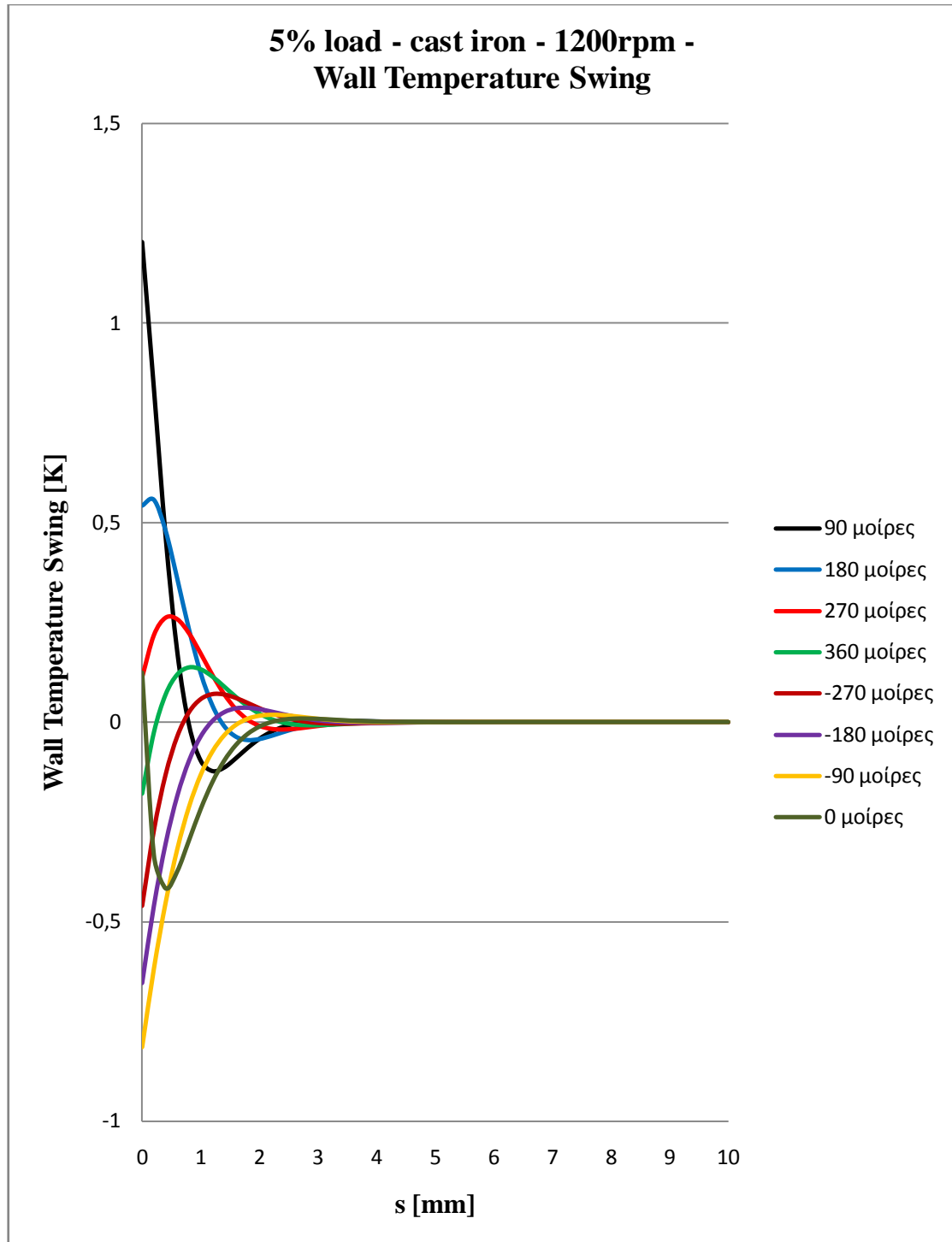
Πίνακας 4.4.1.

Υλικό	Θερμική διαπερατότητα α_w [m^2/s]	Θερμική αγωγιμότητα k_w [W/mK]
cast iron	$14,0 \times 10^{-6}$	54
SN	$2,8 \times 10^{-6}$	10
PSZ	$0,90 \times 10^{-6}$	1

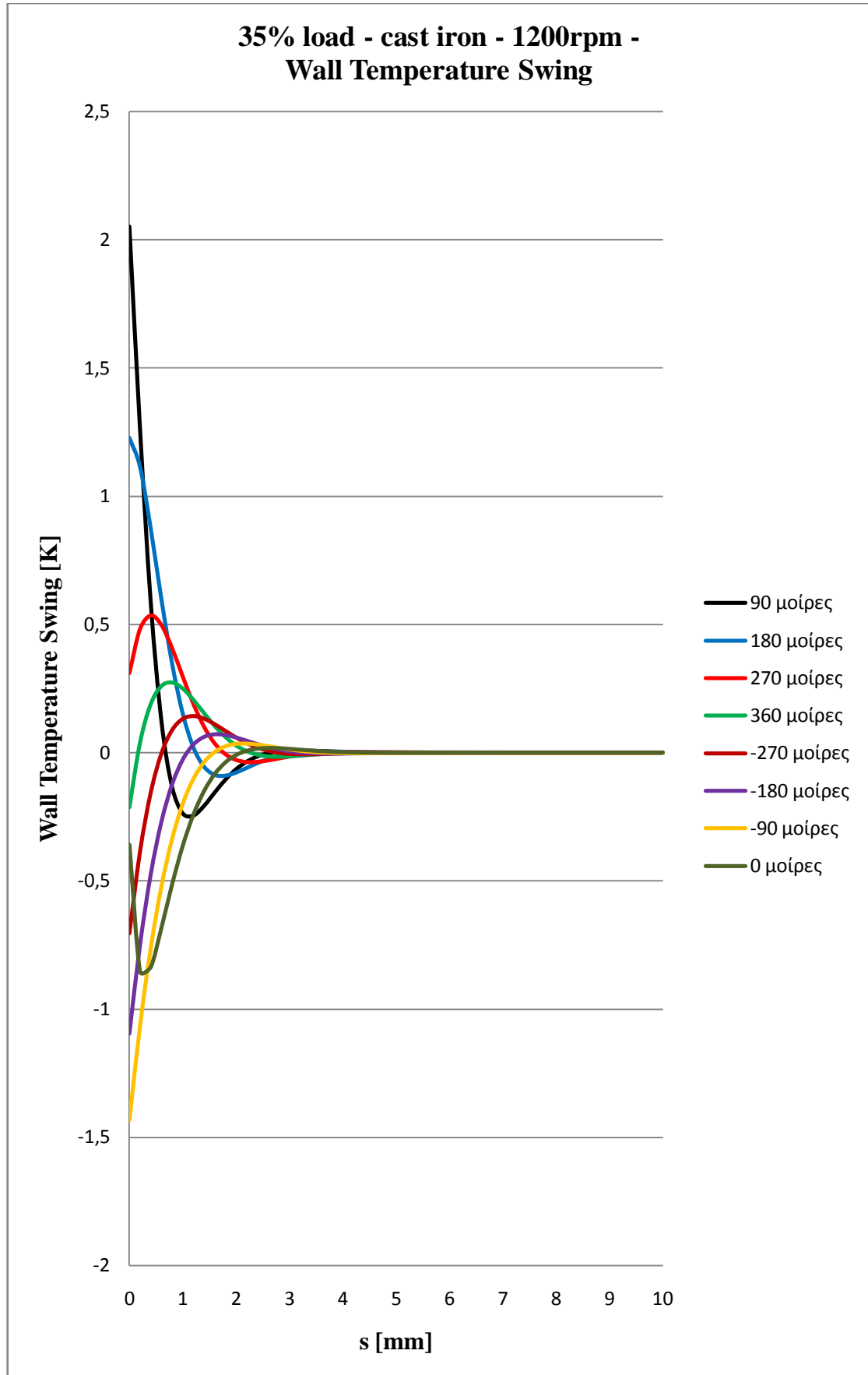
Θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών

Πίνακας 4.4.2.

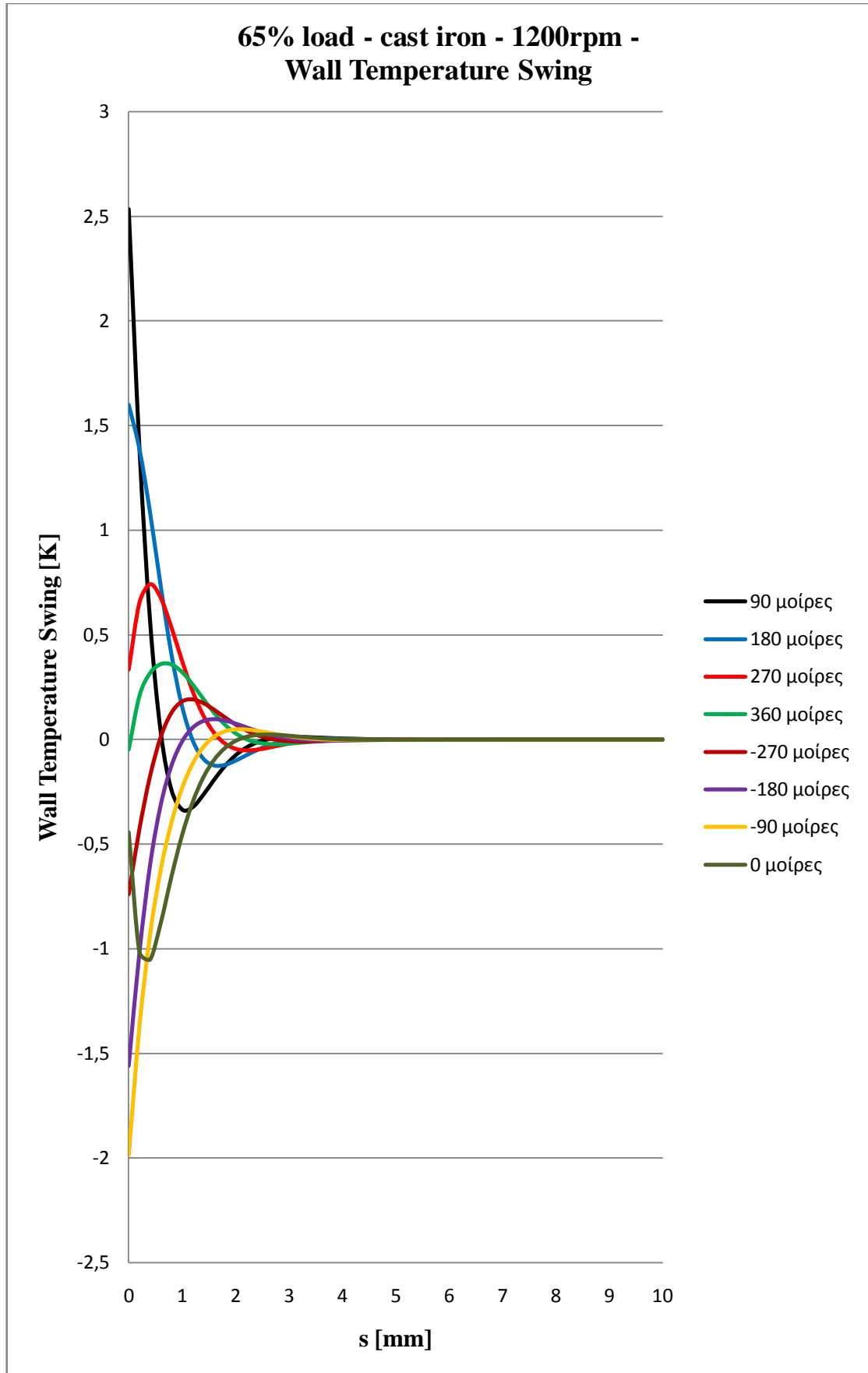
4.5. Θερμοκρασιακή ταλάντωση εσωτερικά του τοιχώματος του κυλίνδρου, από βάθος $s=0$ μέχρι βάθος $s=10\text{mm}$, Wall Temperature Swing [K] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $\varphi[^\circ]$ σε διάφορα φορτία.



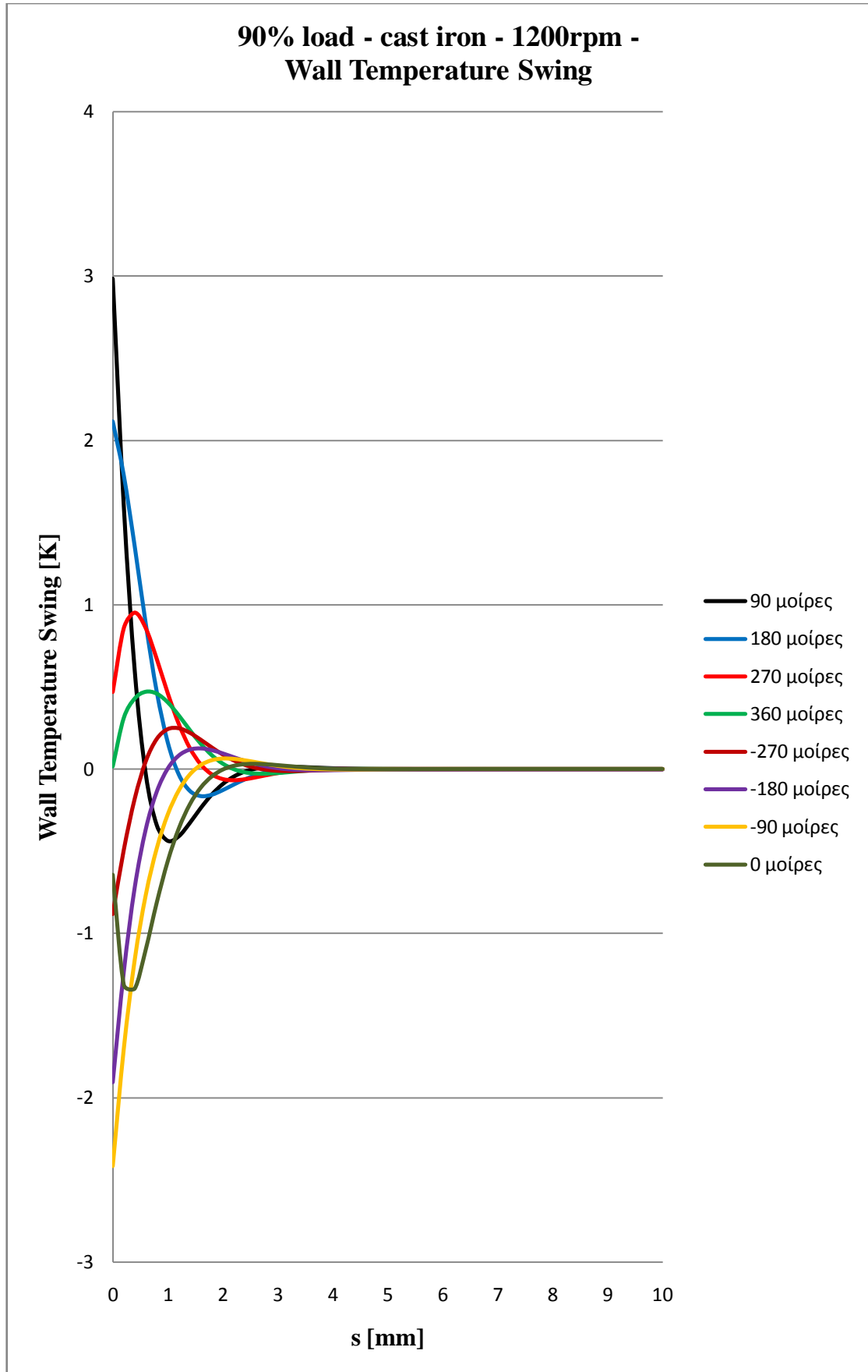
Διάγραμμα 4.5.1.



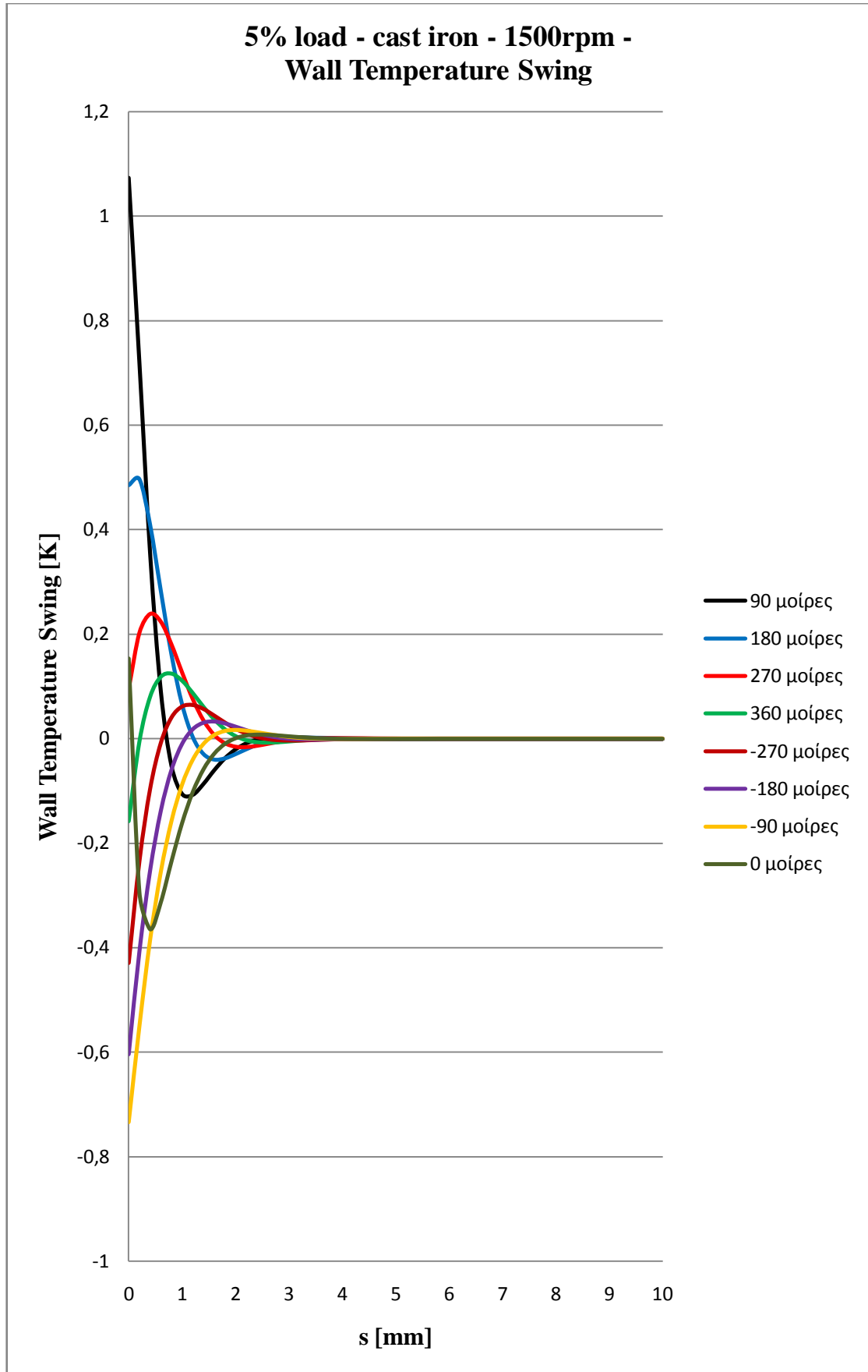
Διάγραμμα 4.5.2.



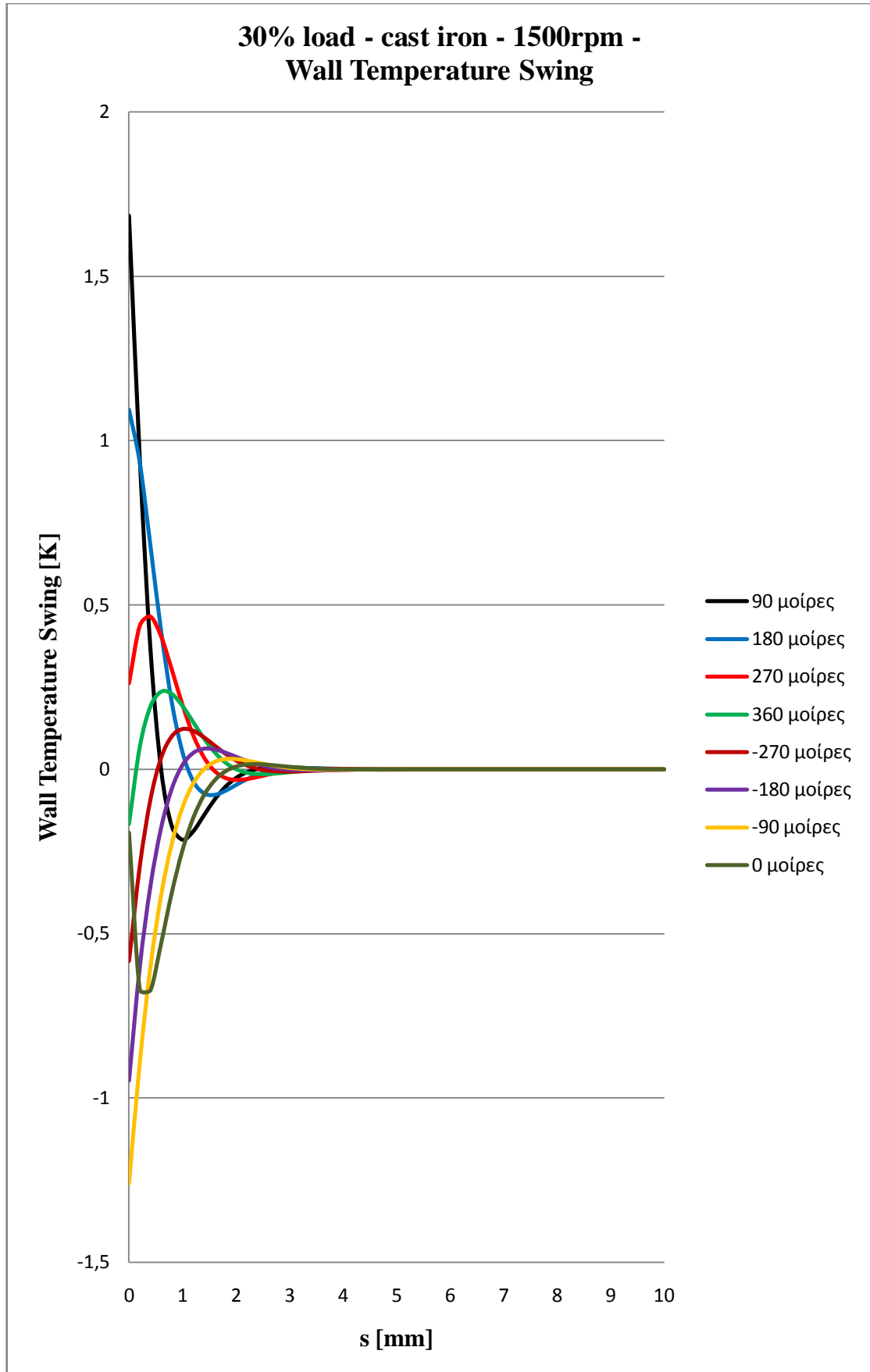
Διάγραμμα 4.5.3.



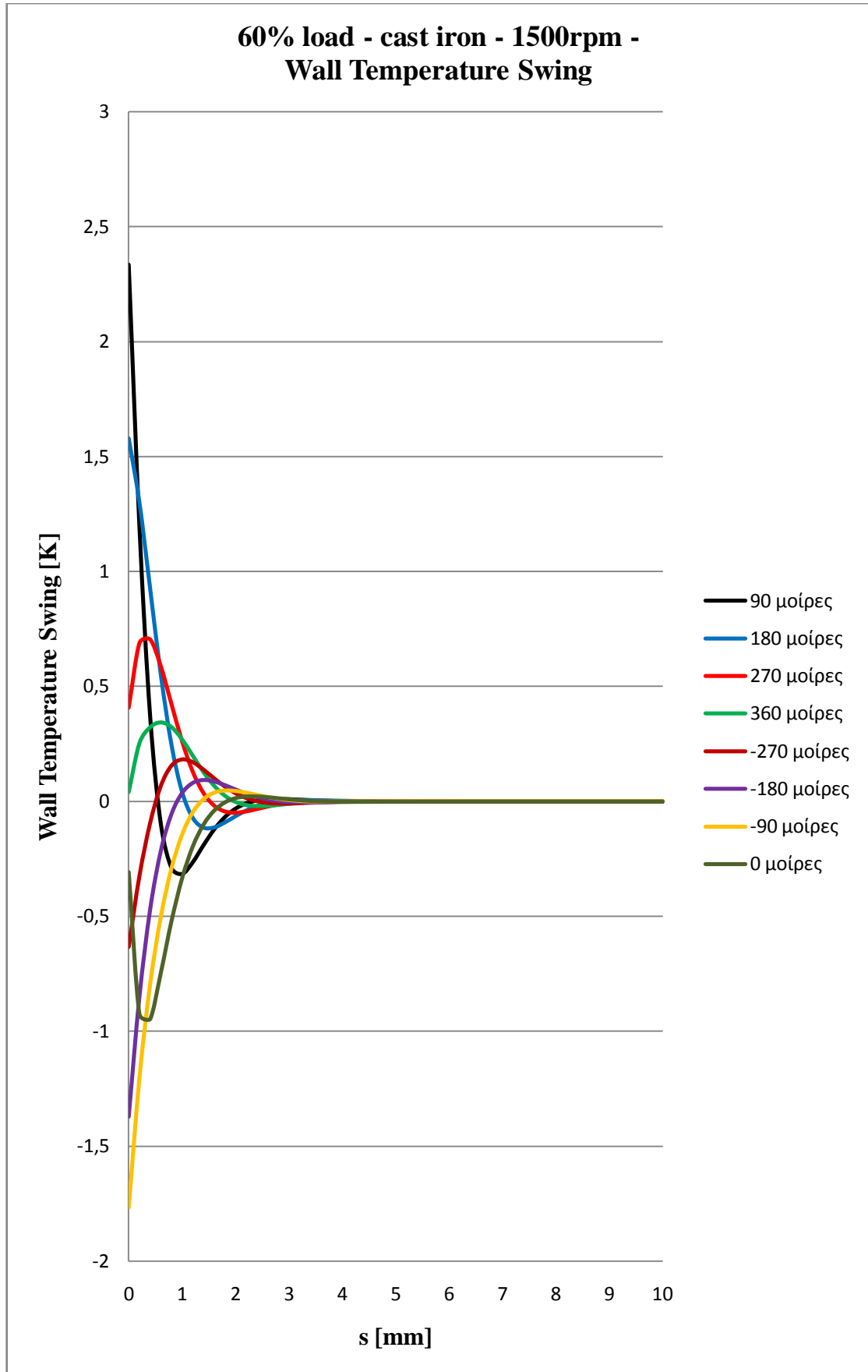
Διάγραμμα 4.5.4.



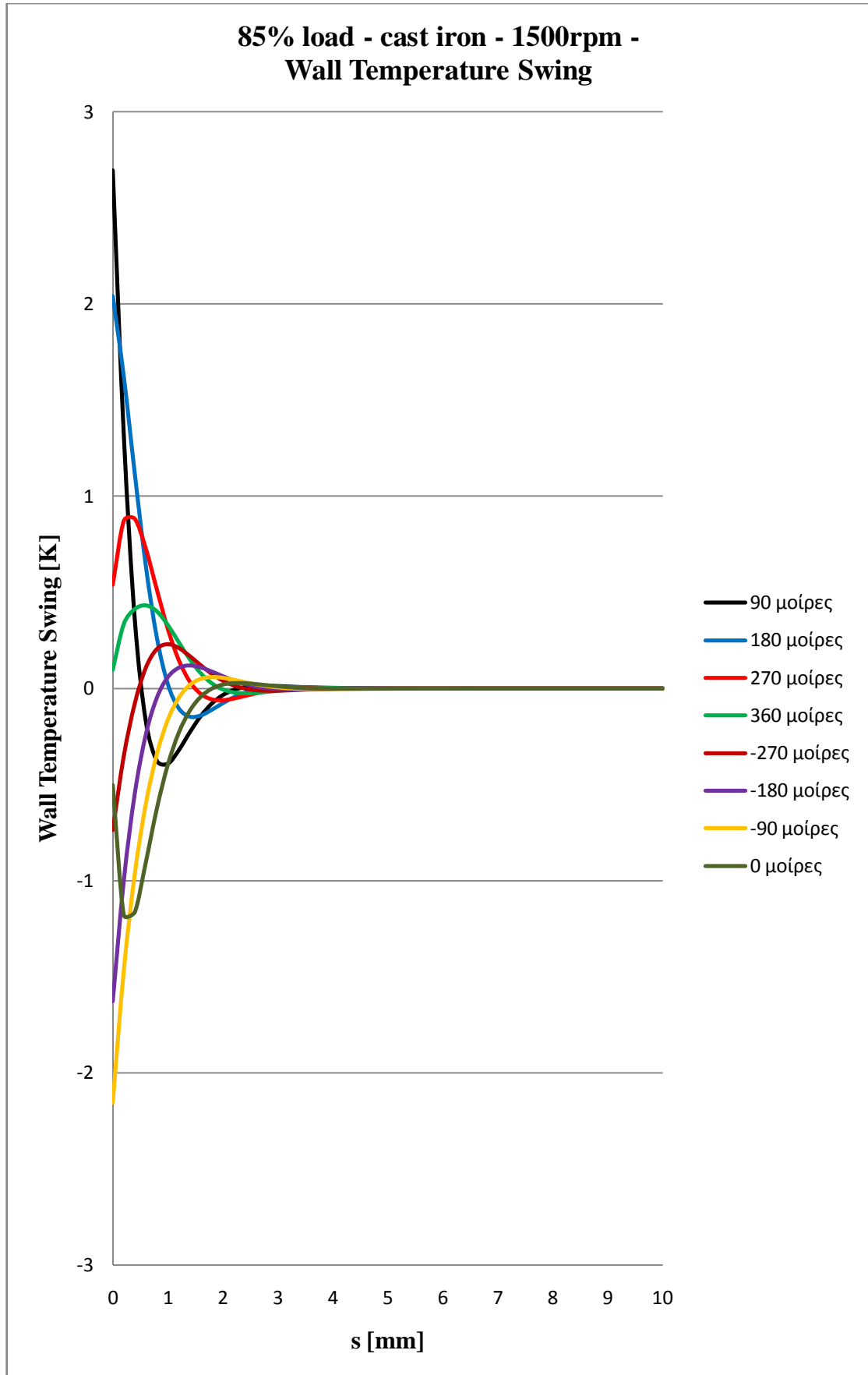
Διάγραμμα 4.5.5.



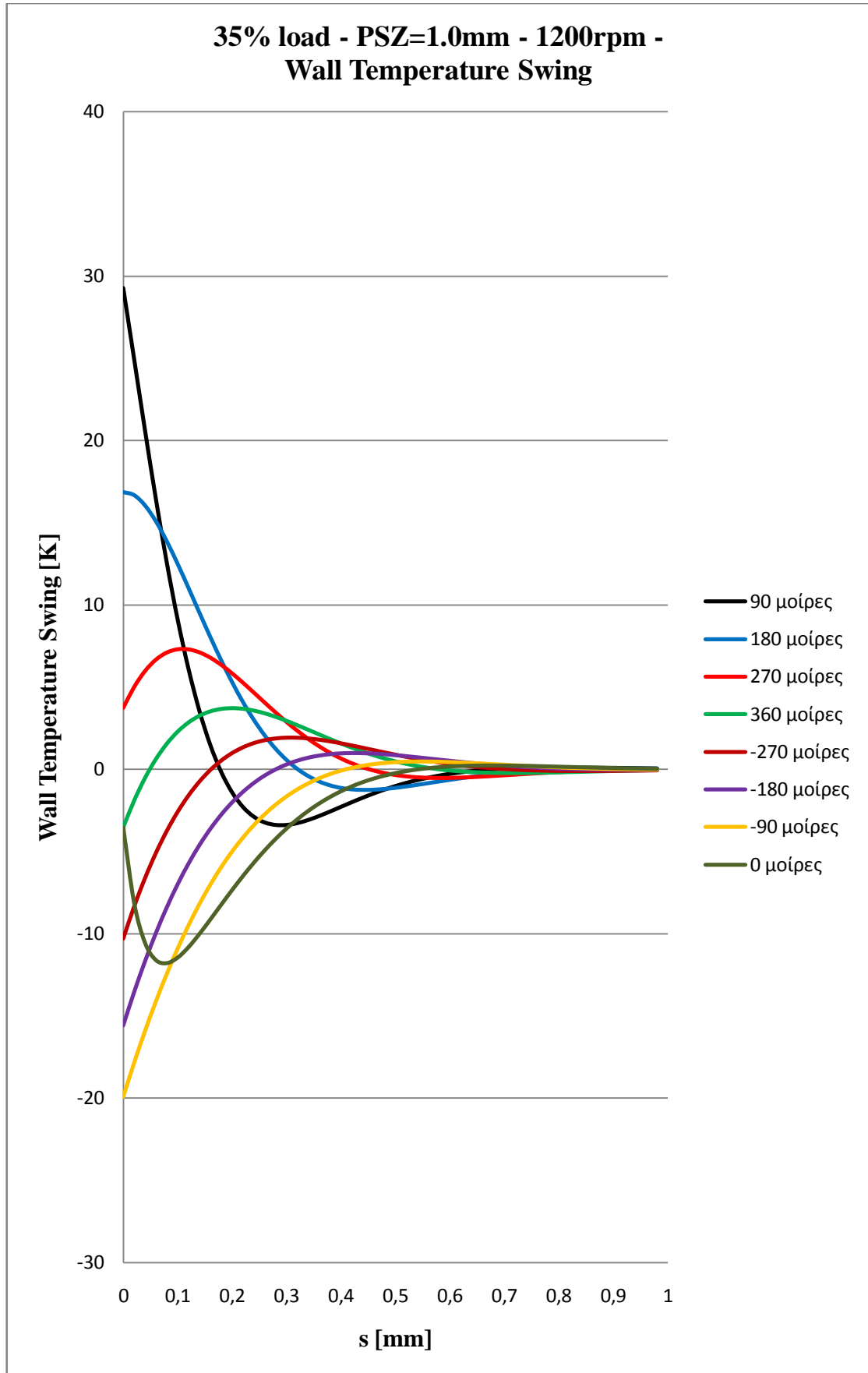
Διάγραμμα 4.5.6.



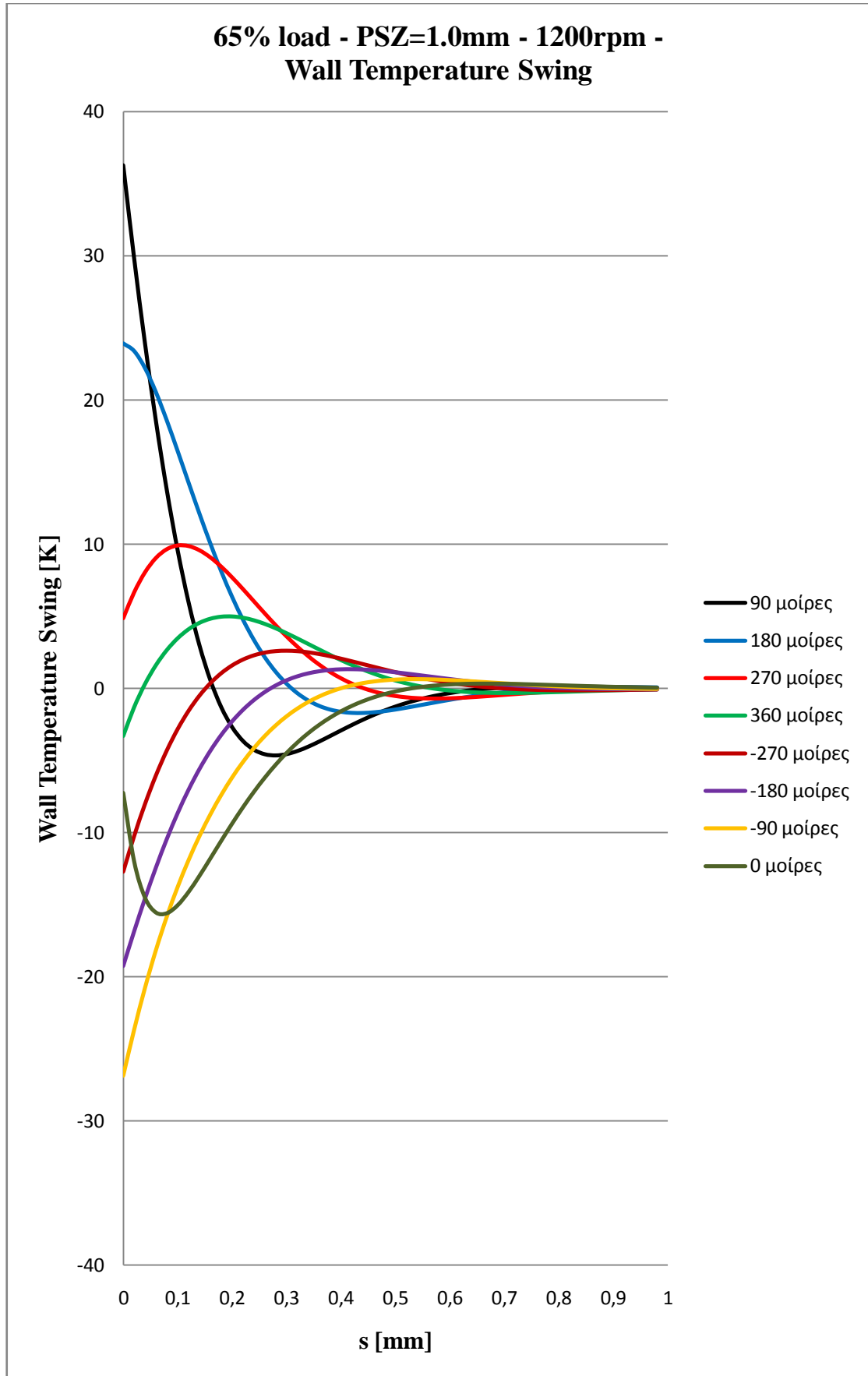
Διάγραμμα 4.5.7.



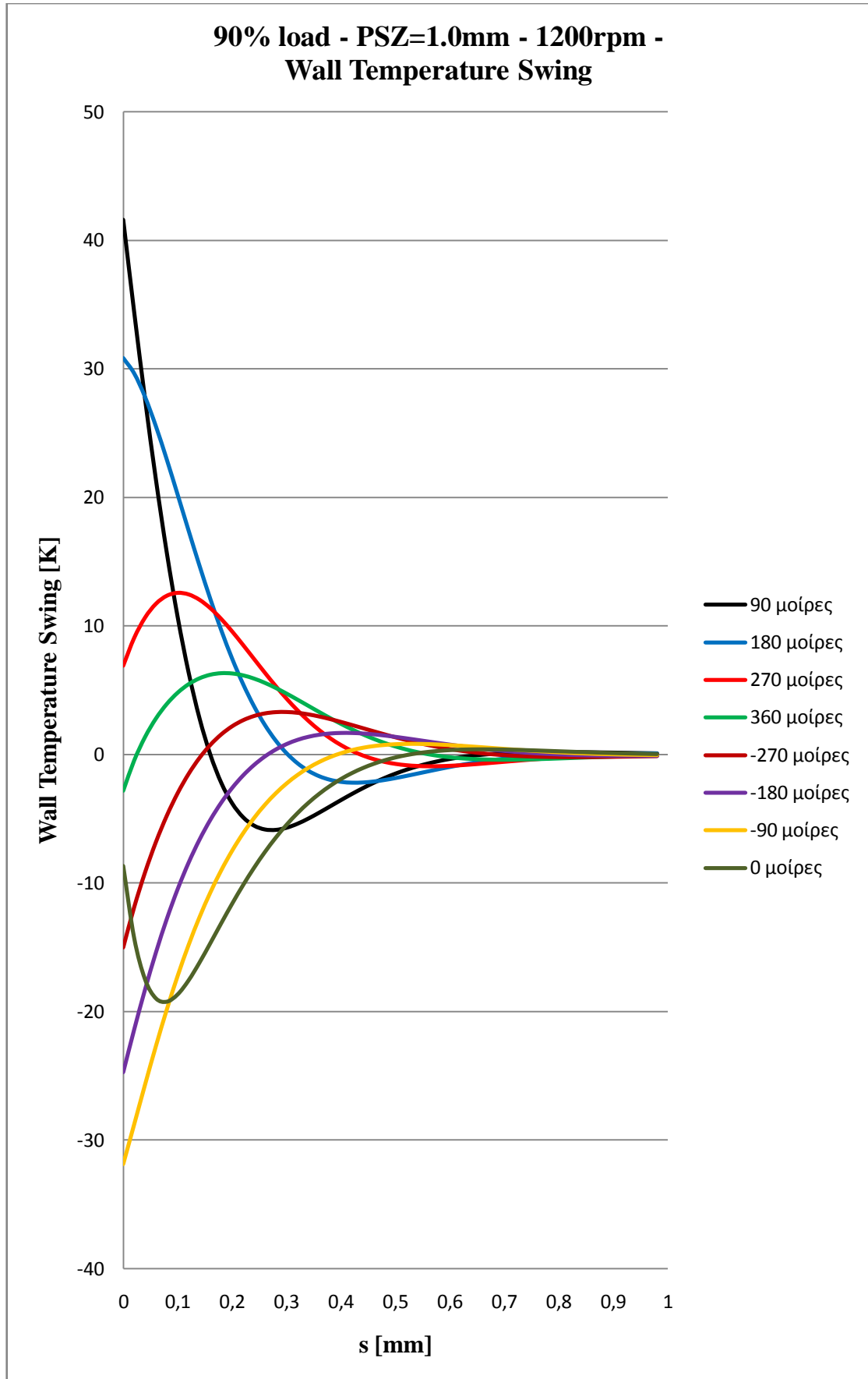
Διάγραμμα 4.5.8.



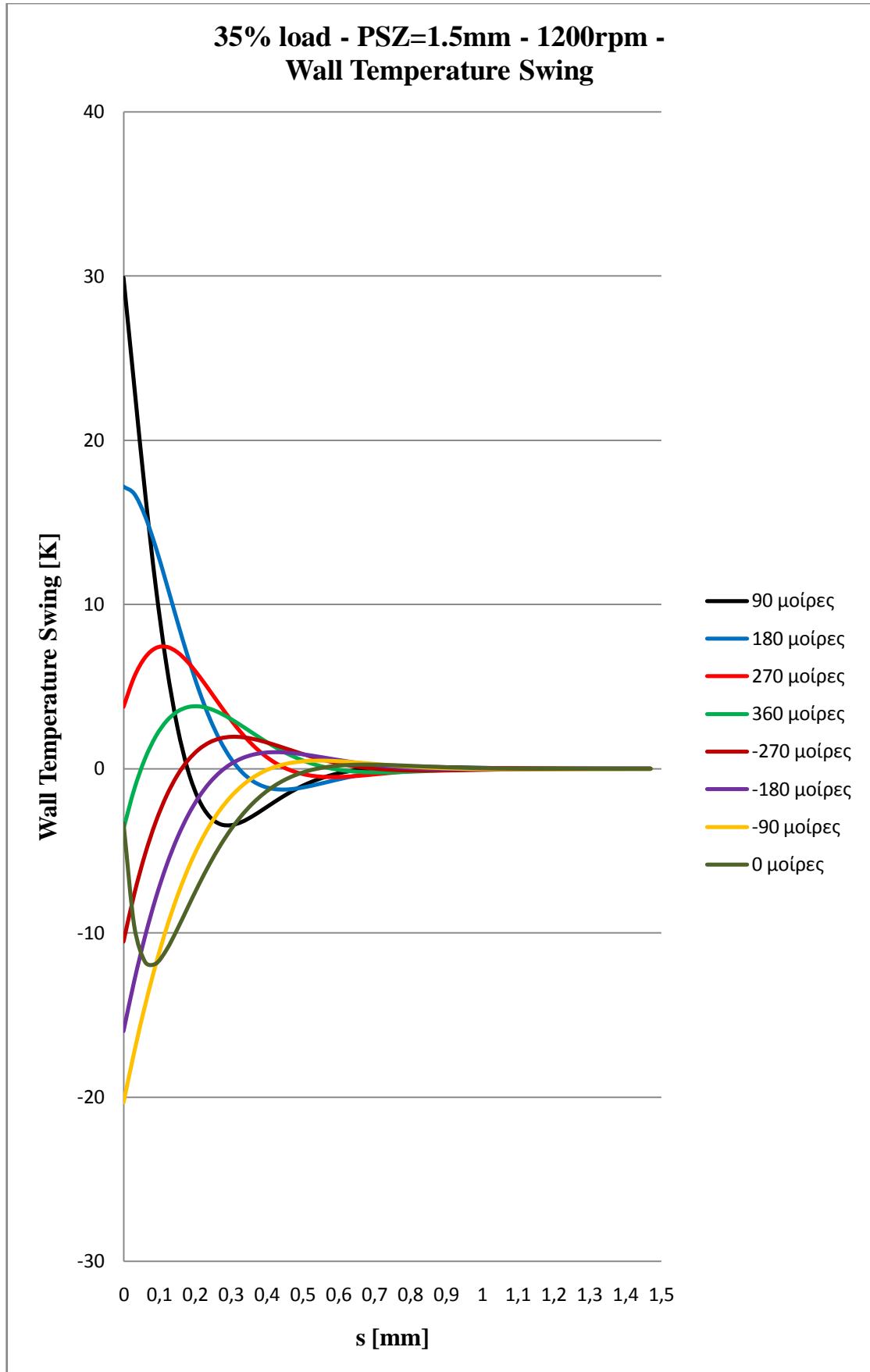
Διάγραμμα 4.5.9.



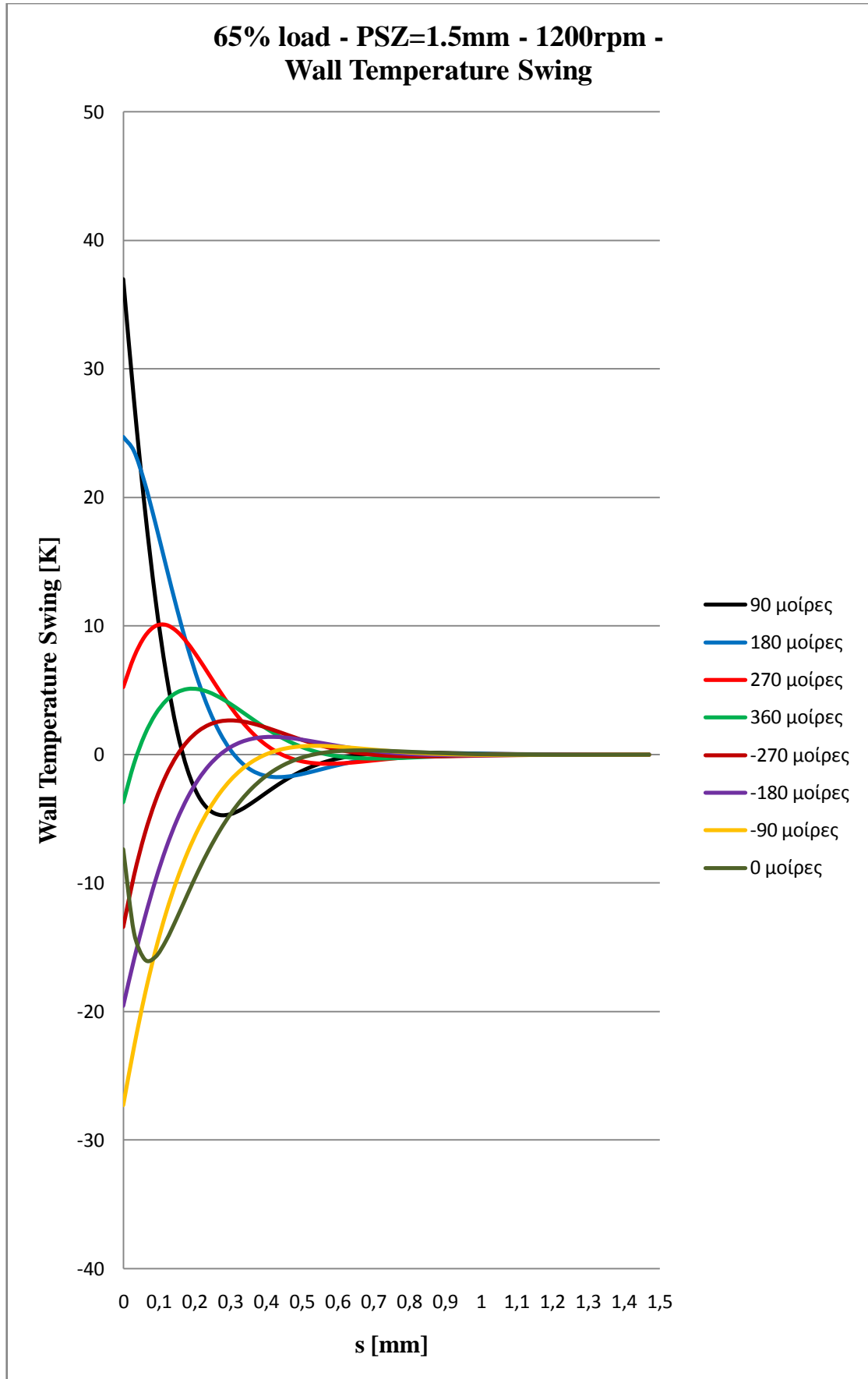
Διάγραμμα 4.5.10.



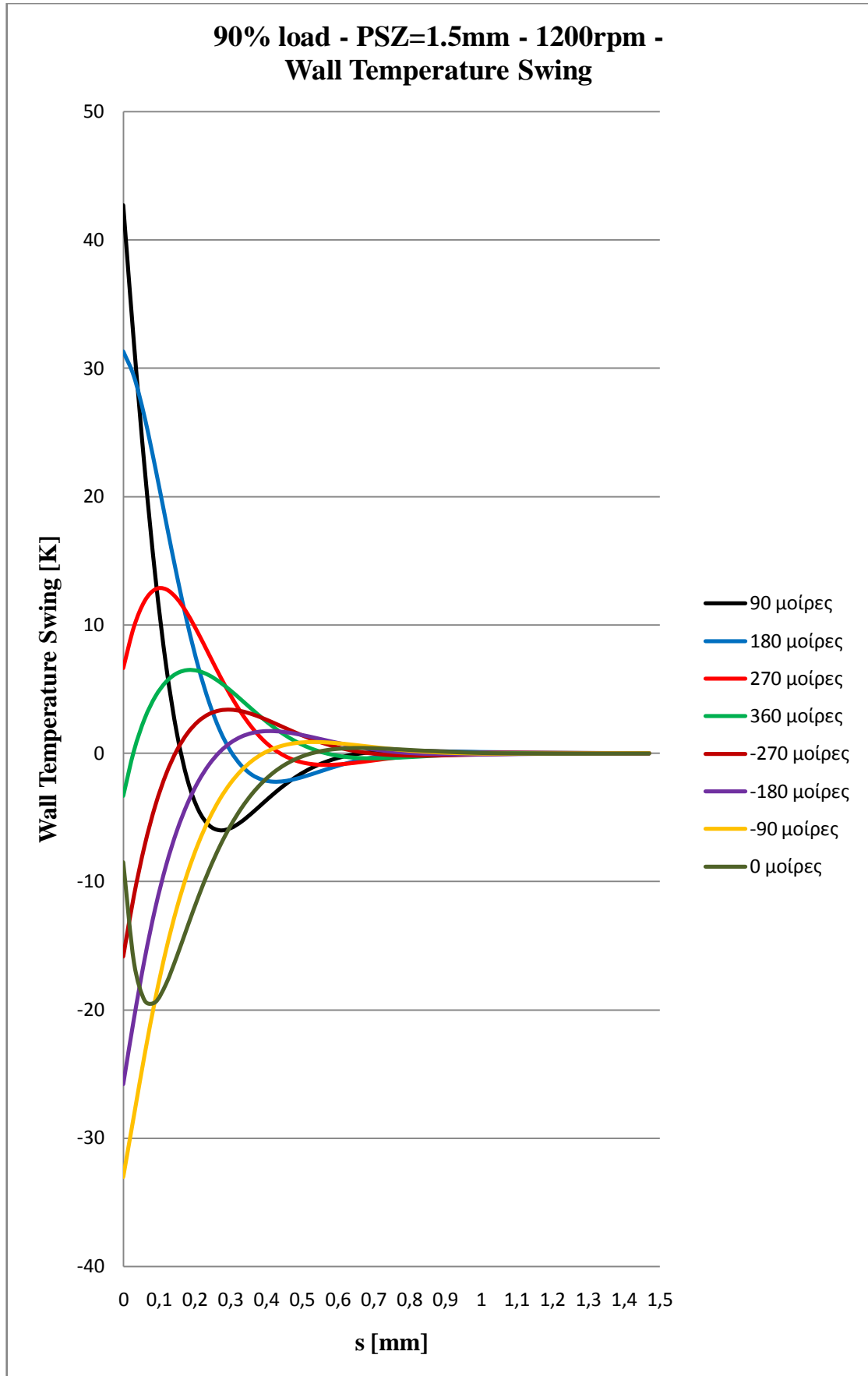
Διάγραμμα 4.5.11.



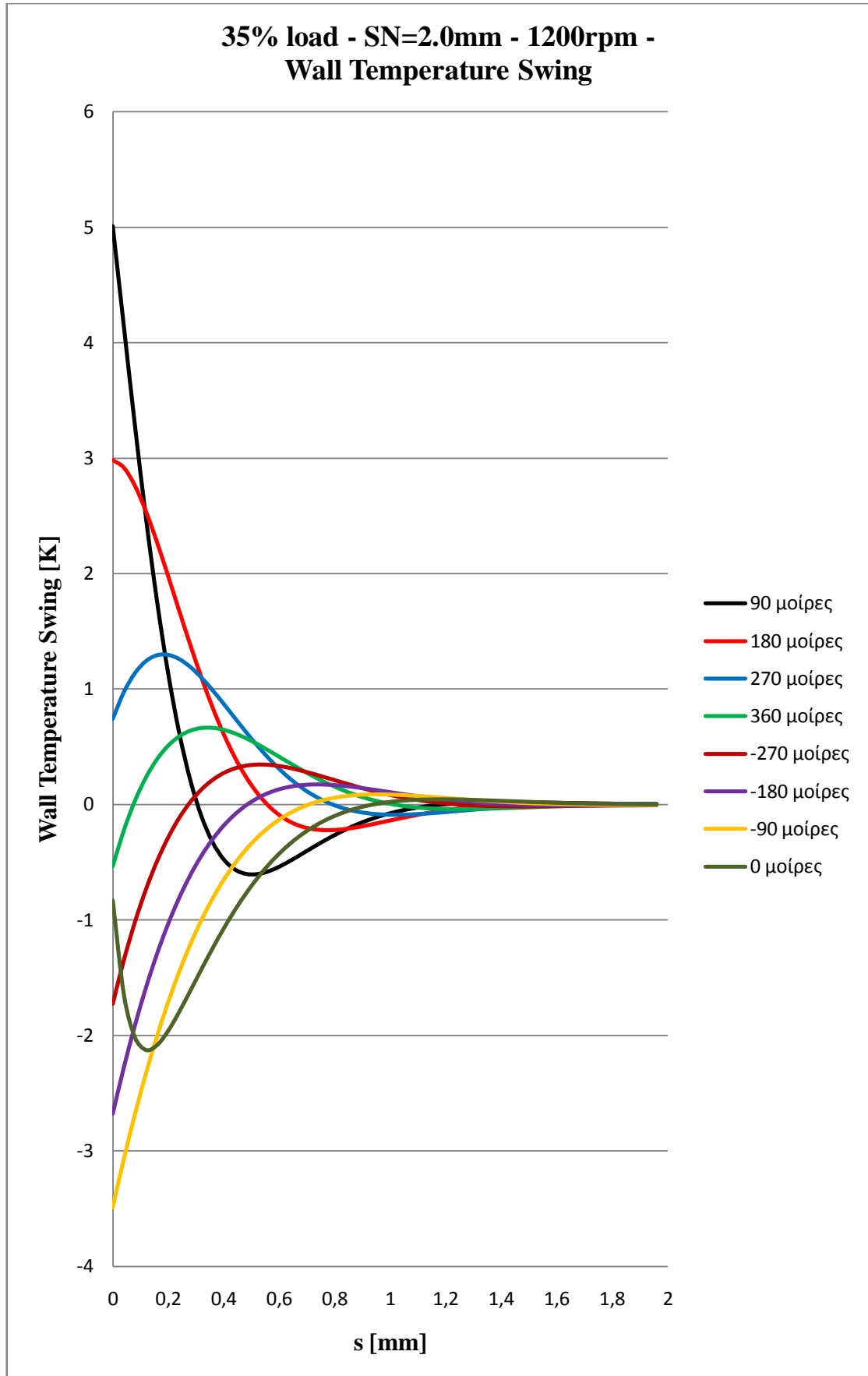
διάγραμμα 4.5.12.



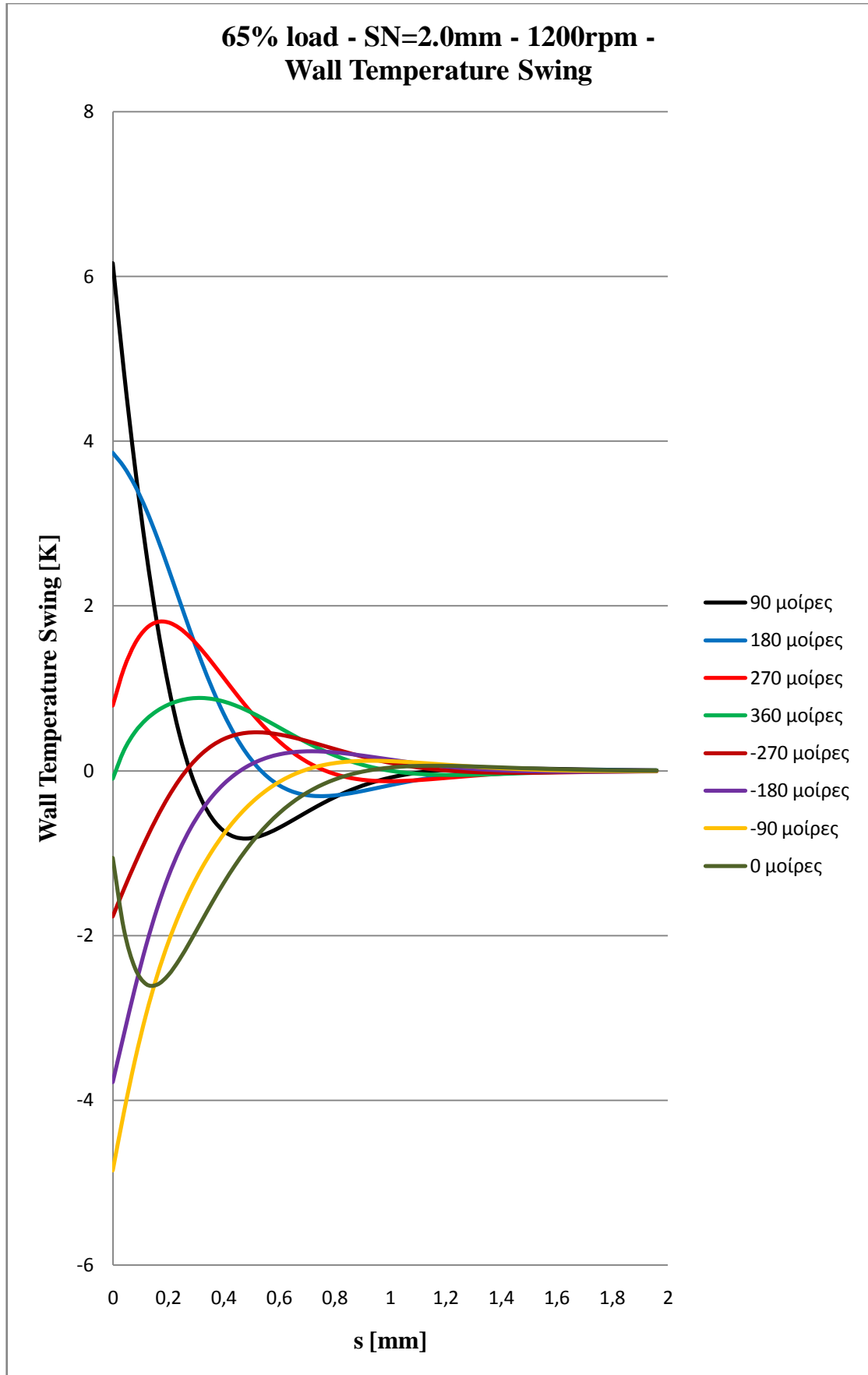
Διάγραμμα 4.5.13.



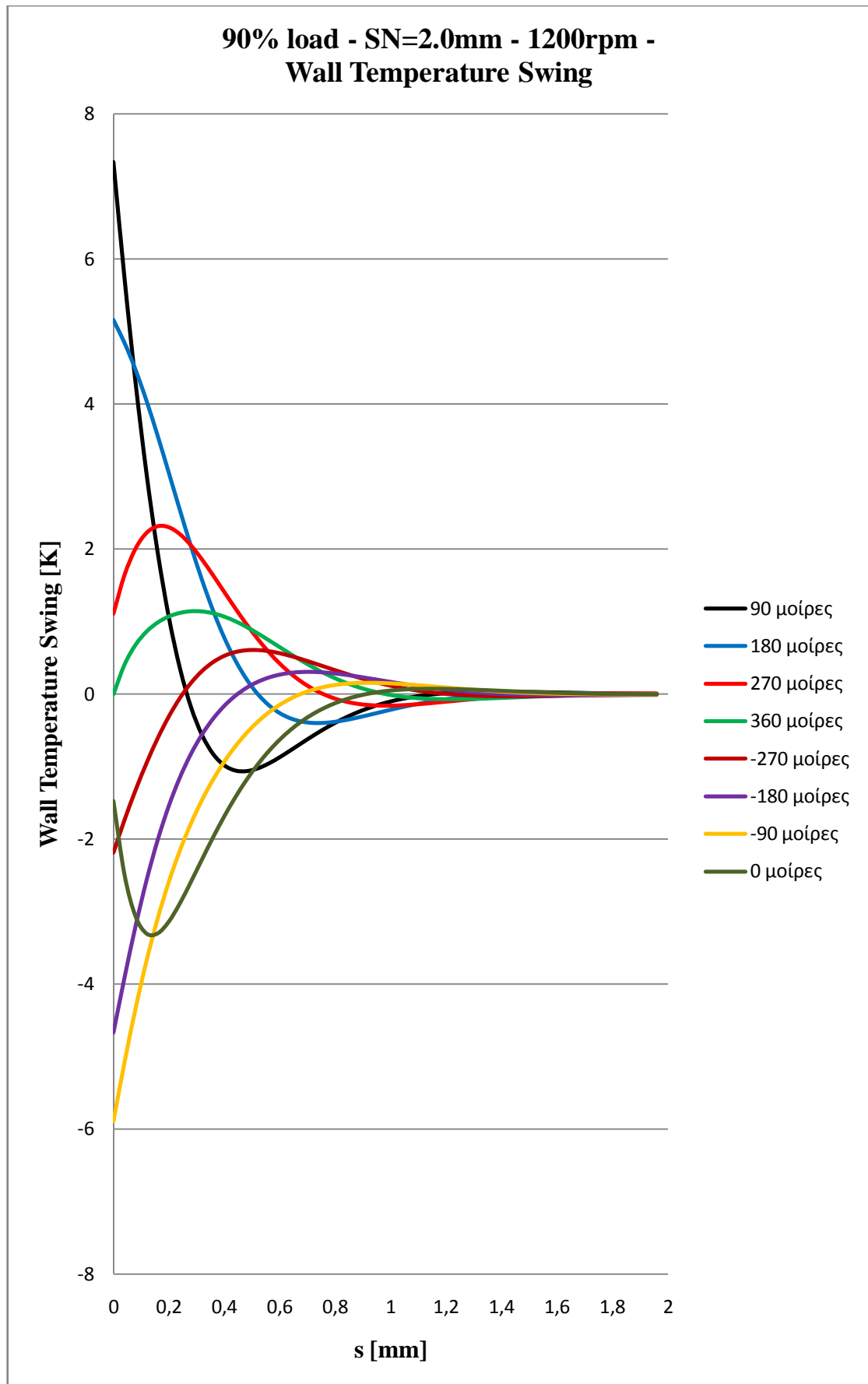
Διάγραμμα 4.5.14.



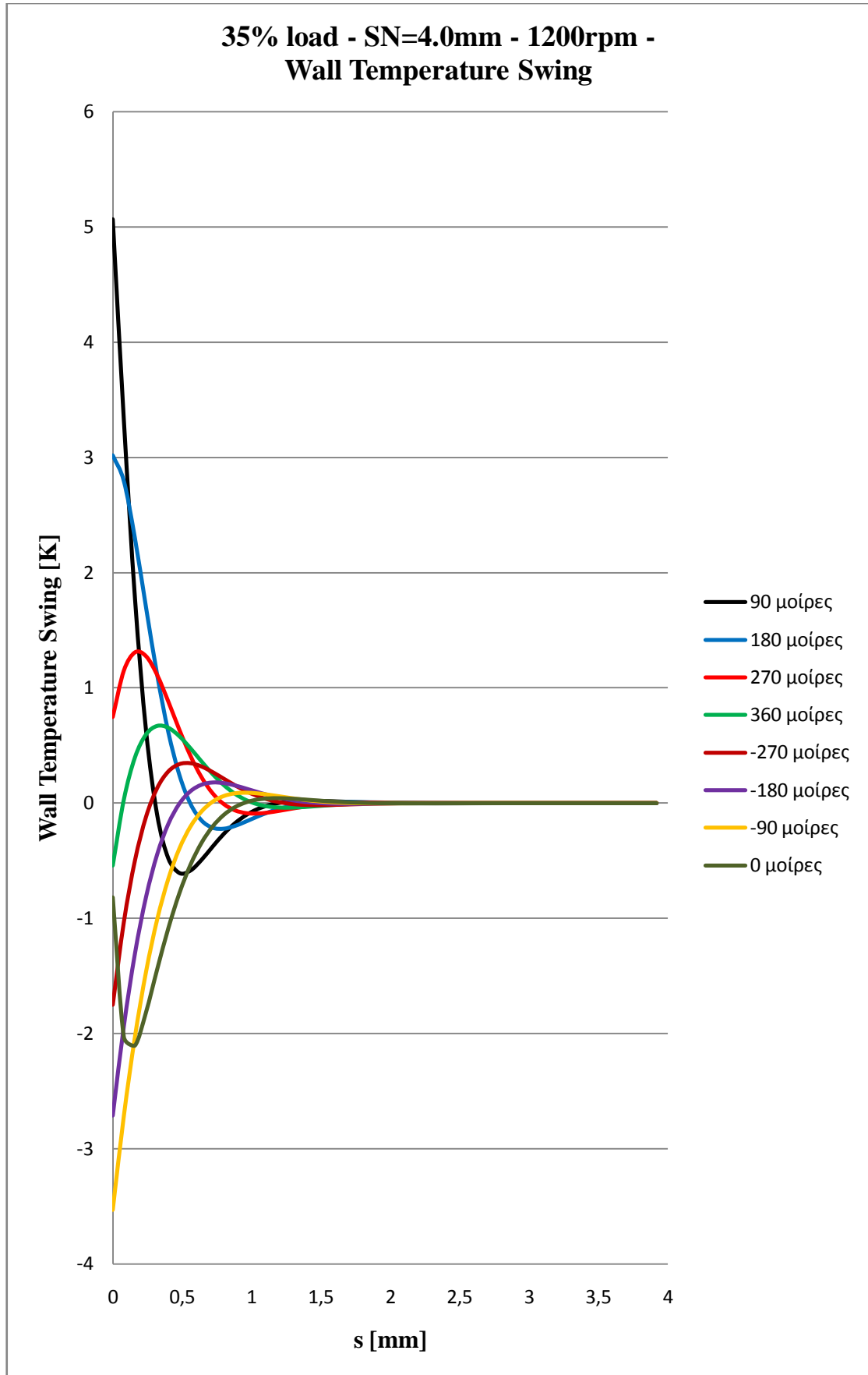
Διάγραμμα 4.5.15.



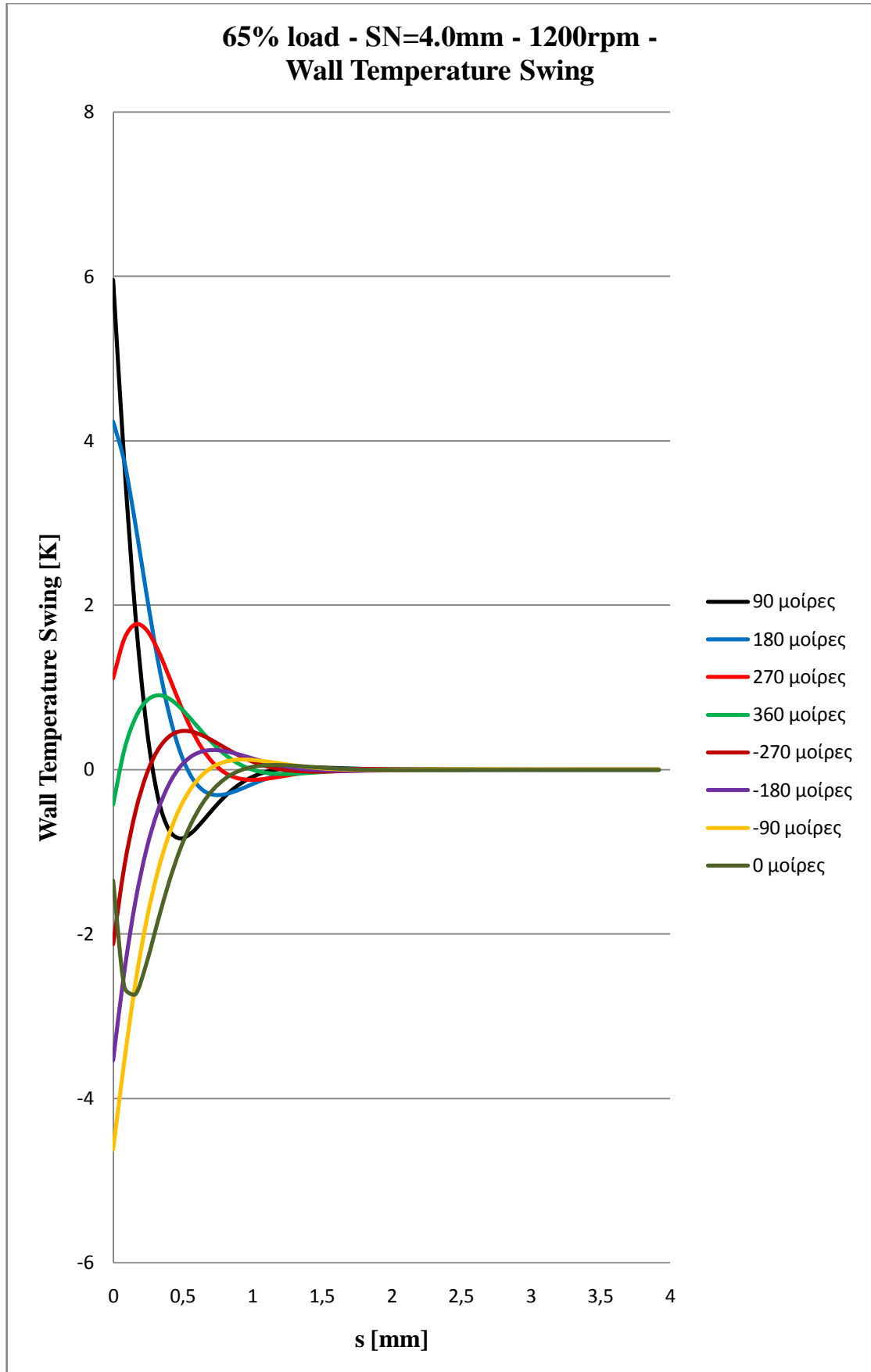
Διάγραμμα 4.5.16.



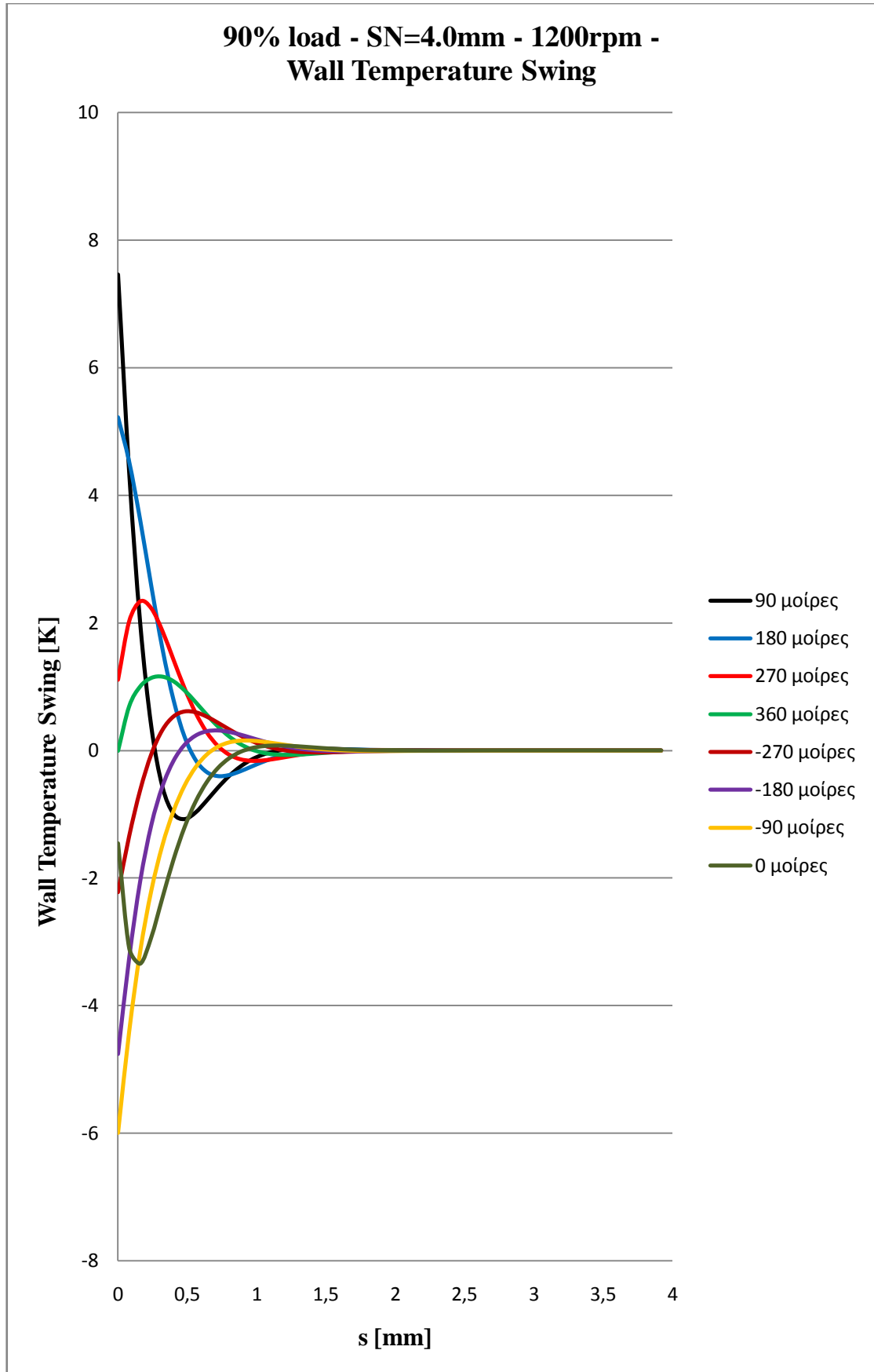
Διάγραμμα 4.5.17.



Διάγραμμα 4.5.18.



Διάγραμμα 4.5.19.



Διάγραμμα 4.5.20.

Διαγράμματα παραγράφου 4.5.(Δ.4.5.1. – Δ.4.5.20.) –Wall Temperature Swing

Από τα διαγράμματα αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της θερμοκρασιακής ταλάντωσης εσωτερικά του τοιχώματος του κυλίνδρου, από βάθος $s=0$ μέχρι βάθος $s=10\text{mm}$ [Wall Temperature Swing] συναρτήσει της γωνίας στροφάλου $[\varphi]$. Ομοίως με τα διαγράμματα της παραγράφου 4.4. φαίνεται ότι το εύρος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του ίδιου υλικού (cast iron, PSZ, SN) αυξάνει με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα (από 5% έως 90%), λόγω αύξησης του Φ . Επίσης η αύξηση στο θερμοκρασιακό εύρος συγκρίνοντας τα υλικά μεταξύ τους ακολουθεί τη σειρά: cast iron, SN, PSZ, με μεγάλη διαφορά μεταξύ της PSZ σε σύγκριση με τα άλλα δύο: cast iron, SN. Τέλος το θερμοκρασιακό εύρος φθίνει κινούμενο από την επιφάνεια εσωτερικά του τοιχώματος του κυλίνδρου και εξαφανίζεται σε βάθος που κυμαίνεται από 0,8mm έως 3,0mm ανάλογα με το υλικό και ανεξάρτητα του πάχους της μόνωσης και του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα (από 5% έως 90%). Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.5.1.:

Υλικό	Βάθος στο οποίο εξαφανίζεται το θερμοκρασιακό εύρος [mm]
cast iron	3,0
SN	1,4
PSZ	0,8

Βάθος στο οποίο εξαφανίζεται το θερμοκρασιακό εύρος σε κάθε υλικό

Πίνακας 4.5.1.

Από τον Πίνακα 4 5 1. σε συνδυασμό με τον Πίνακα 4.4.1. συνάγεται το συμπέρασμα, ότι **η χρήση ισχυρού μονωτικού (π.χ. PSZ) οδηγεί σε υψηλή θερμοκρασιακή ταλάντωση, η οποία σβήνει σε πολύ μικρό βάθος μέσα στο τοίχωμα, προκαλώντας ισχυρό θερμικό ‘σοκ’ (thermal shock) και κατ’ επέκταση υψηλή θερμική καταπόνηση.**

4.6. Επίδραση του πάχους μονωτικού υλικού στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα MWM TbRHS 518S.

Για τη μελέτη επίδρασης του μονωτικού υλικού στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, ορίζεται το μέγεθος k , το οποίο είναι μια σταθερά με μονάδα μέτρησης ίδια με αυτή της σταθεράς θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού [W/mK] και ορίζεται ως (βλ. και Σχήμα 2.3.):

$$k = \frac{S_{ins} + S_w}{\frac{S_{ins}}{k_{ins}} + \frac{S_w}{k_w}} \quad (4.6.1)$$

όπου:

S_{ins} = το πάχος της εκάστοτε μόνωσης

S_w = το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου όπου δεν υπάρχει μόνωση, δηλαδή του χυτοσιδήρου

$(S_{ins} + S_w) = 10\text{mm}$ σε όλες τις περιπτώσεις

k_{ins} = η σταθερά αγωγιμότητας της μόνωσης

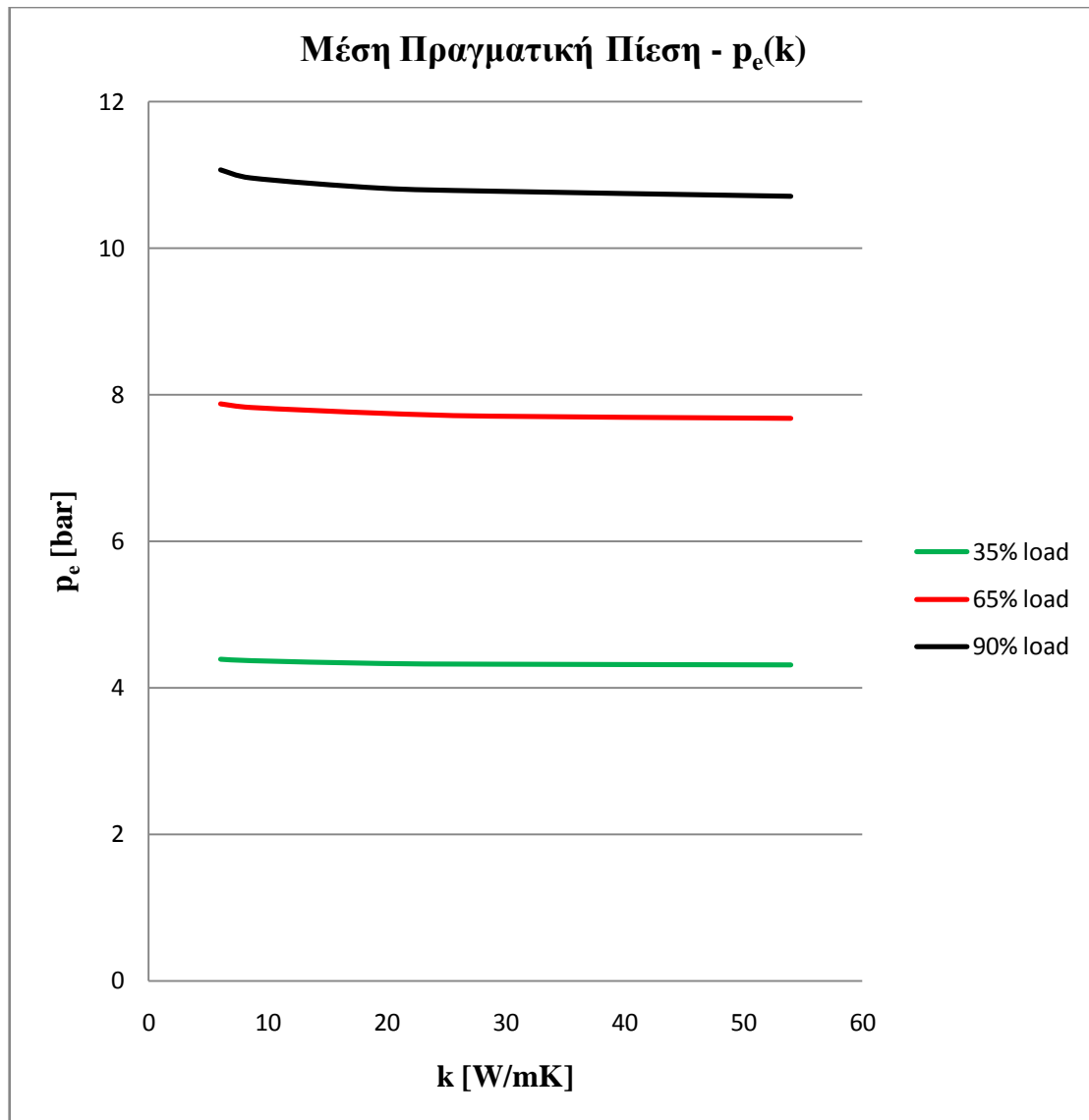
k_w = η σταθερά αγωγιμότητας του τοιχώματος του κυλίνδρου όπου δεν υπάρχει μόνωση, δηλαδή του χυτοσιδήρου.

Για τις περιπτώσεις μονωτικών του Πίνακα 4.2. προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 4.6.1., για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Υλικό	S_{ins} [mm]	S_w [mm]	k_{ins} [W/mK]	k_w [W/mK]	k [W/mK]
Χυτοσίδηρος	0	10,0	54	54	54,000
PSZ	1,0	9,0	1	54	8,571
PSZ	1,5	8,5	1	54	6,034
SN	2,0	8,0	10	54	28,723
SN	4,0	6,0	10	54	19,565

Χαρακτηριστικά μονωτικών

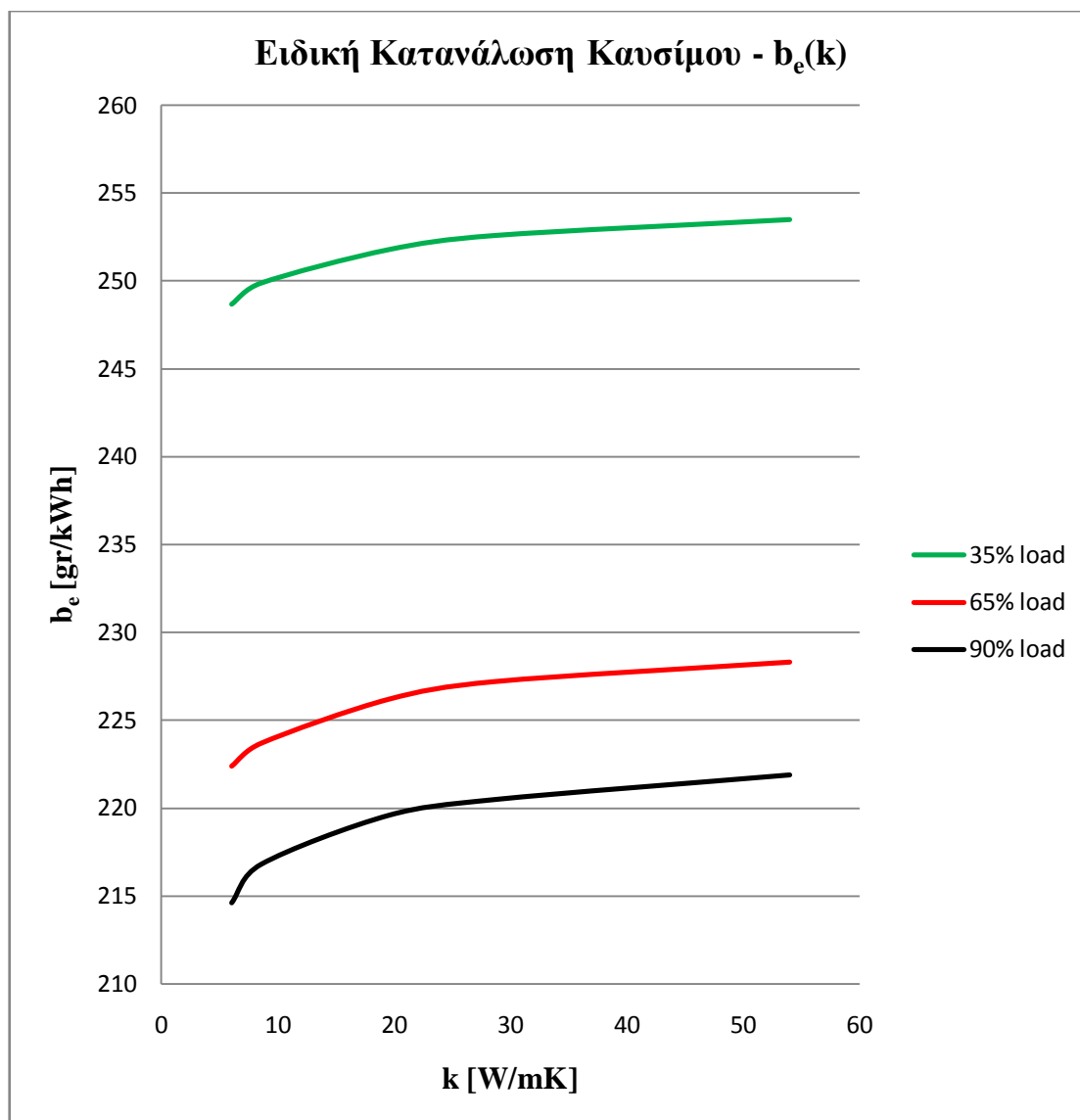
Πίνακας 4.6.1.



Διάγραμμα 4.6.1.

Μέση Πραγματική Πίεση - \bar{p}_e [bar]

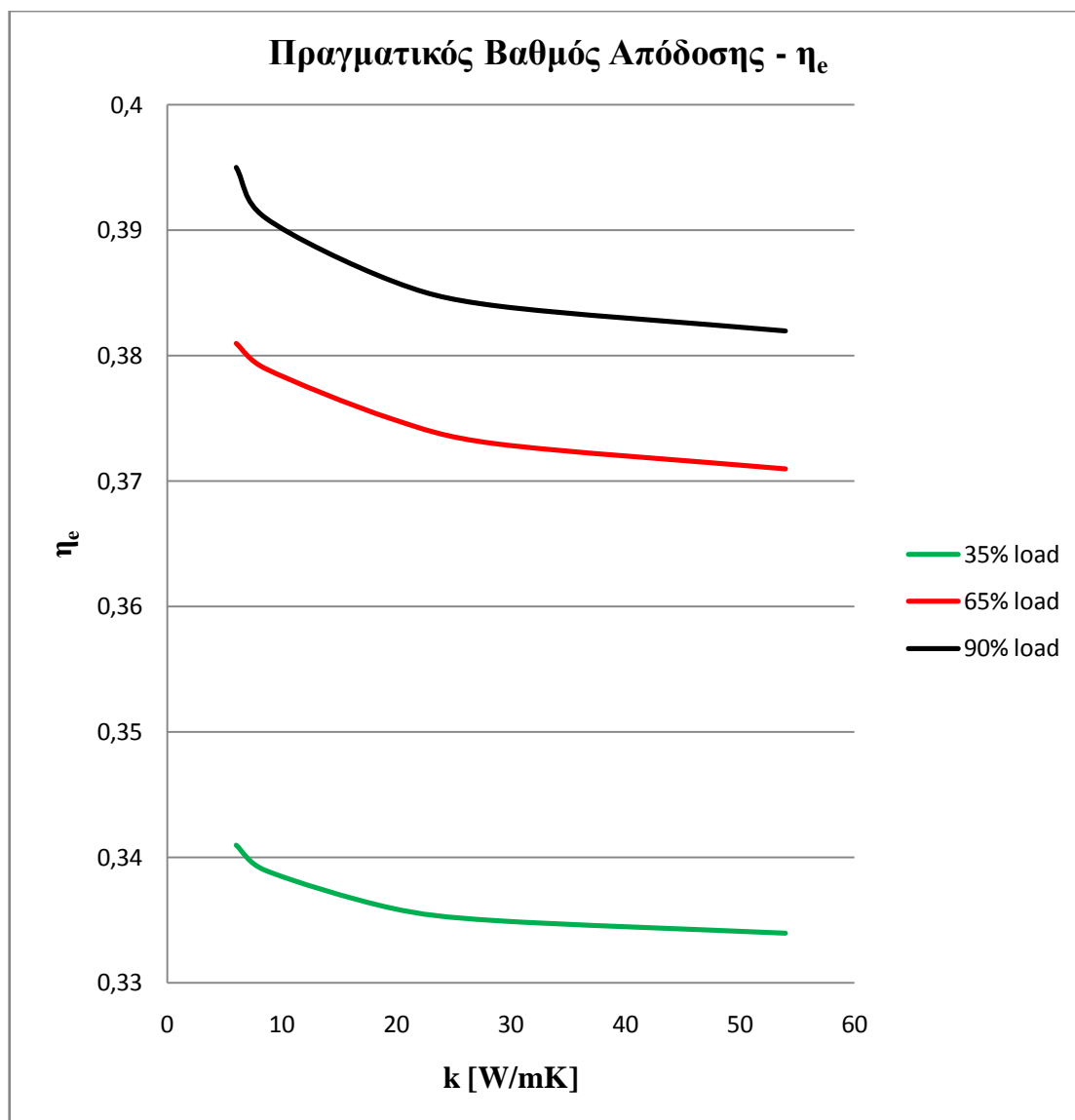
Από το Δ.4.6.1. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνει σημαντικά και η Μέση Πραγματική Πίεση, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Η ύπαρξη μόνωσης ή όχι, καθώς και το υλικό της παίζουν ρόλο μόνο σε πολύ μικρές τιμές του k , δηλαδή σε περιπτώσεις ισχυρής μόνωσης.



Διάγραμμα 4.6.2.

Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου - b_e [gr/kWh]

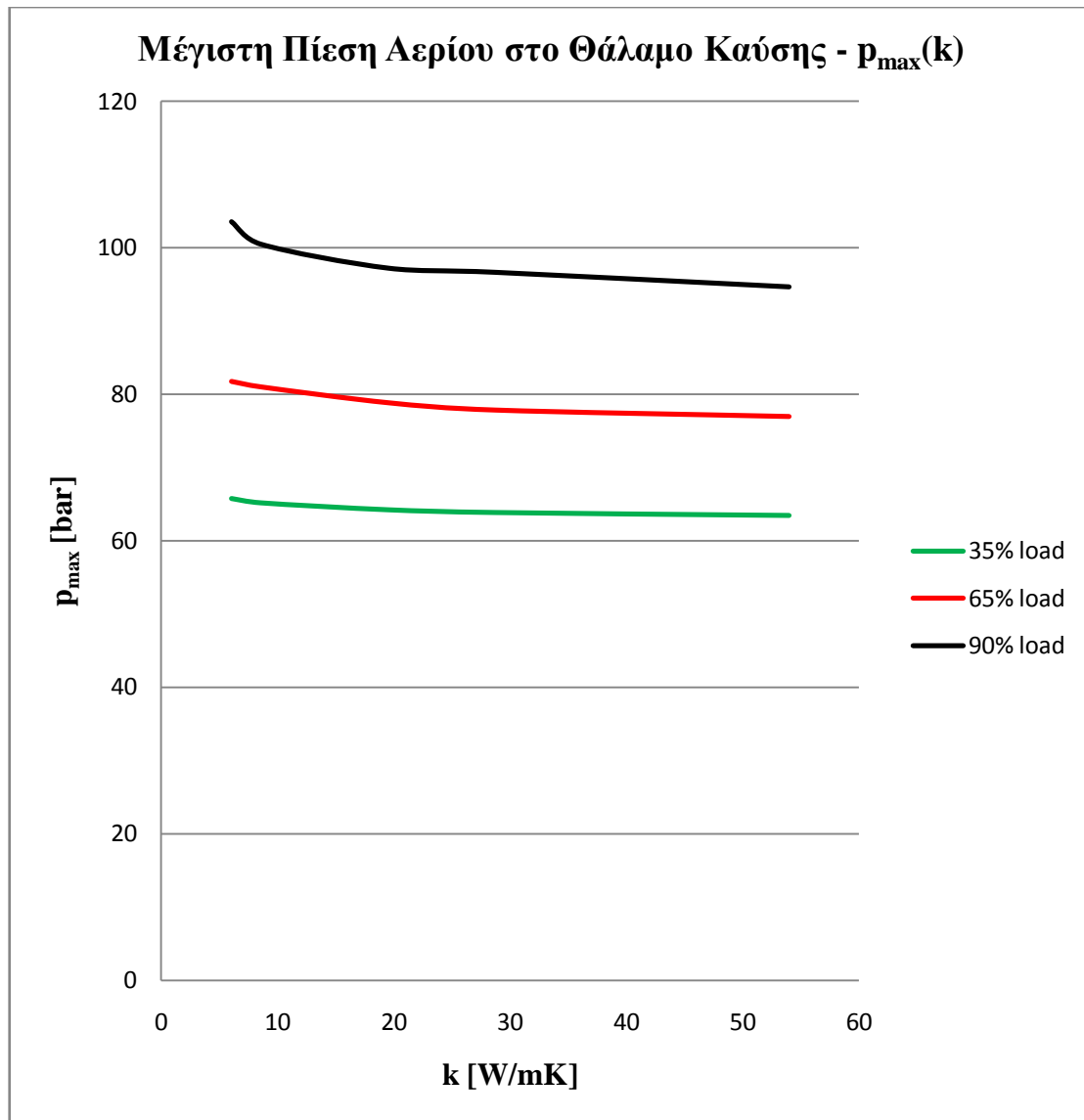
Από το Δ.4.6.2. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα μειώνεται σημαντικά η Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι *οικονομικότερος* όταν εργάζεται σε υψηλό φορτίο (90%) σε σχέση με μέσο φορτίο (65%) και ειδικότερα συγκρινόμενος με χαμηλό φορτίο (35%). Επίσης **οικονομικότερη λειτουργία επιτυγχάνεται με την ύπαρξη μόνωσης**, όπου για λειτουργία στο ίδιο φορτίο φτάνει μέχρι και τα 7,3 g/kWh. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση γίνεται με την ακόλουθη σειρά: cast iron, SN(2mm), SN(4mm), PSZ(1mm), PSZ(1,5mm).



Διάγραμμα 4.6.3.

Πραγματικός Βαθμός Απόδοσης - η_e

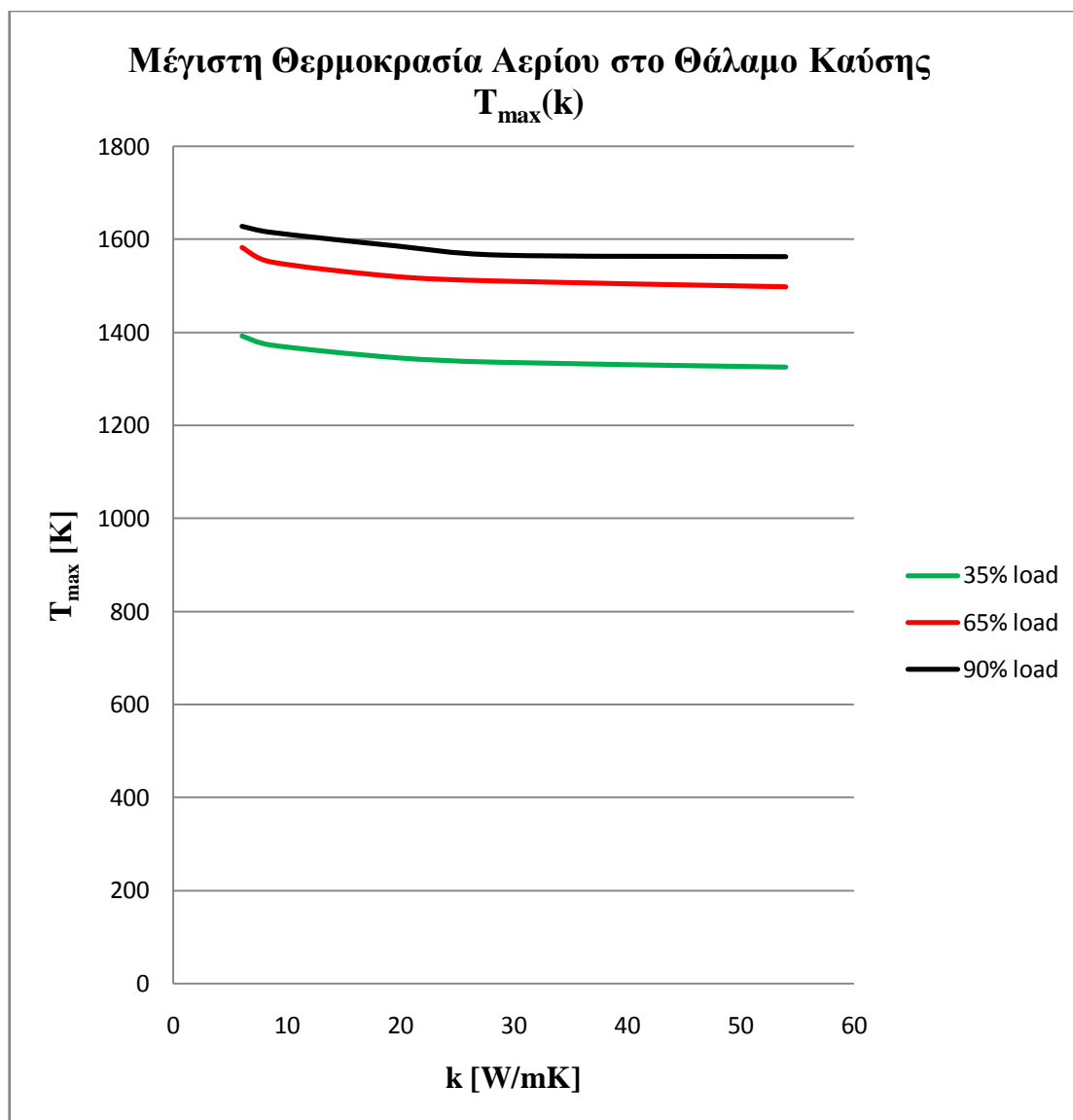
Από το Δ.4.6.3. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνει σημαντικά ο Πραγματικός Βαθμός Απόδοσής του, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 33,4% και 39,5% που είναι οι αναμενόμενες για κινητήρα diesel. Η *συνολική απόδοση του κινητήρα* λοιπόν βελτιώνεται αρκετά σε μέσο φορτίο (65%) και σημαντικά σε υψηλό φορτίο (90%) σε σχέση με το χαμηλό φορτίο (35%) λειτουργίας. Επίσης **παρατηρείται μικρή αύξηση του Πραγματικού Βαθμού Απόδοσης** του κινητήρα για το ίδιο φορτίο λειτουργίας με την ύπαρξη μόνωσης έως και μία ποσοστιαία μονάδα. Συγκεκριμένα η αύξηση ακολουθεί τη σειρά: cast iron, SN(2mm), SN(4mm), PSZ(1mm), PSZ(1,5mm).



Διάγραμμα 4.6.4.

Μέγιστη Πίεση Αερίου στο Θάλαμο Καύσης - p_{\max} [bar]

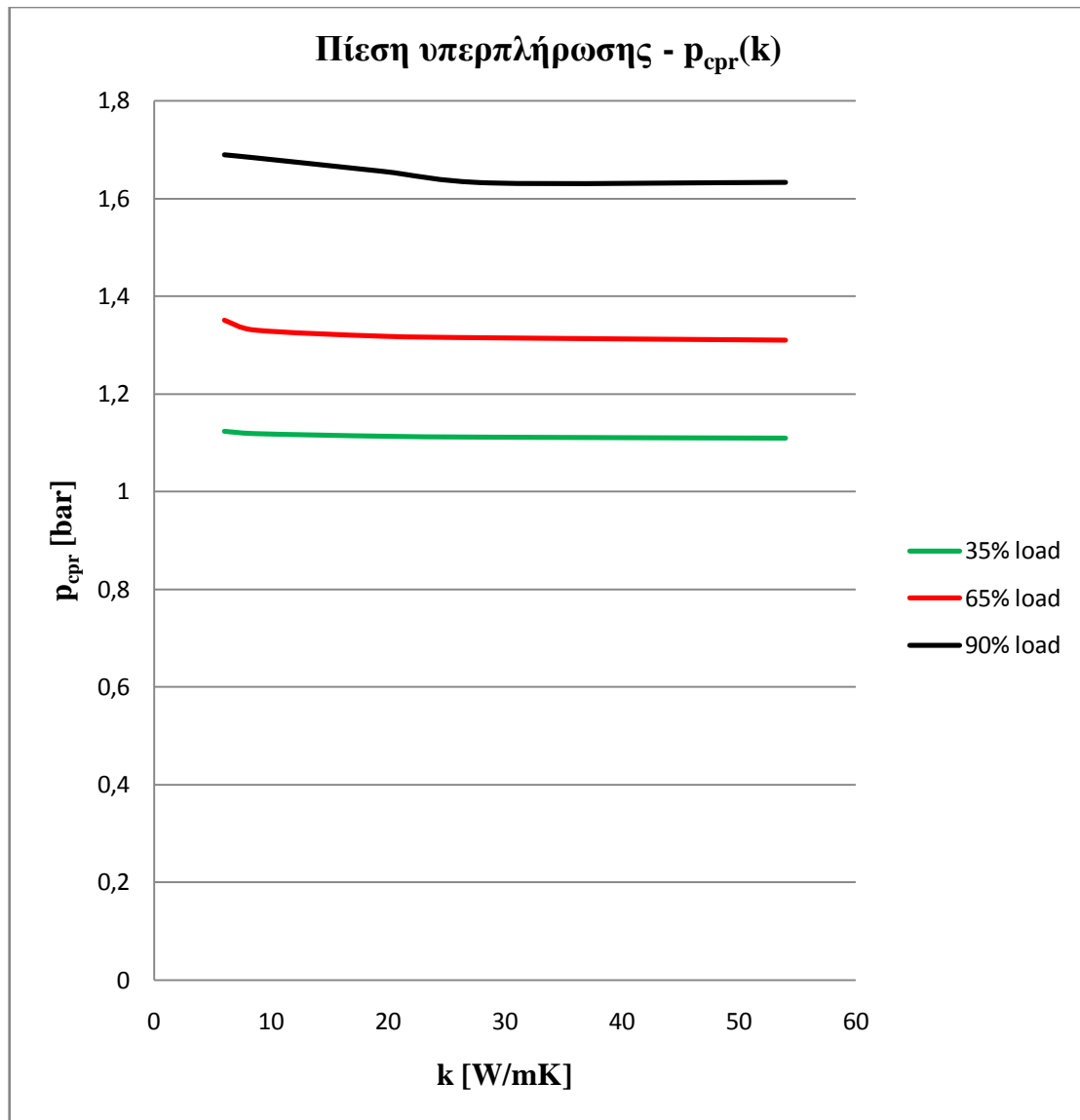
Από το Δ.4.6.4. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνει και η Μέγιστη Πίεση Αερίων στο Θάλαμο Καύσης, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Η ύπαρξη μόνωσης ή όχι, καθώς και το υλικό της παίζουν ουσιαστικό ρόλο. Παρατηρώντας την καμπύλη για 90% φορτίο, η p_{\max} αυξάνει από τα 94,68 bar για χυτοσίδηρο (cast iron) στα 103,59 bar για μονωτικό PSZ πάχους 1,5 mm. Ποσοστό αύξησης 9,41%.



Διάγραμμα 4.6.5.

Μέγιστη Θερμοκρασία Αερίου στο Θάλαμο Καύσης - T_{max} [K]

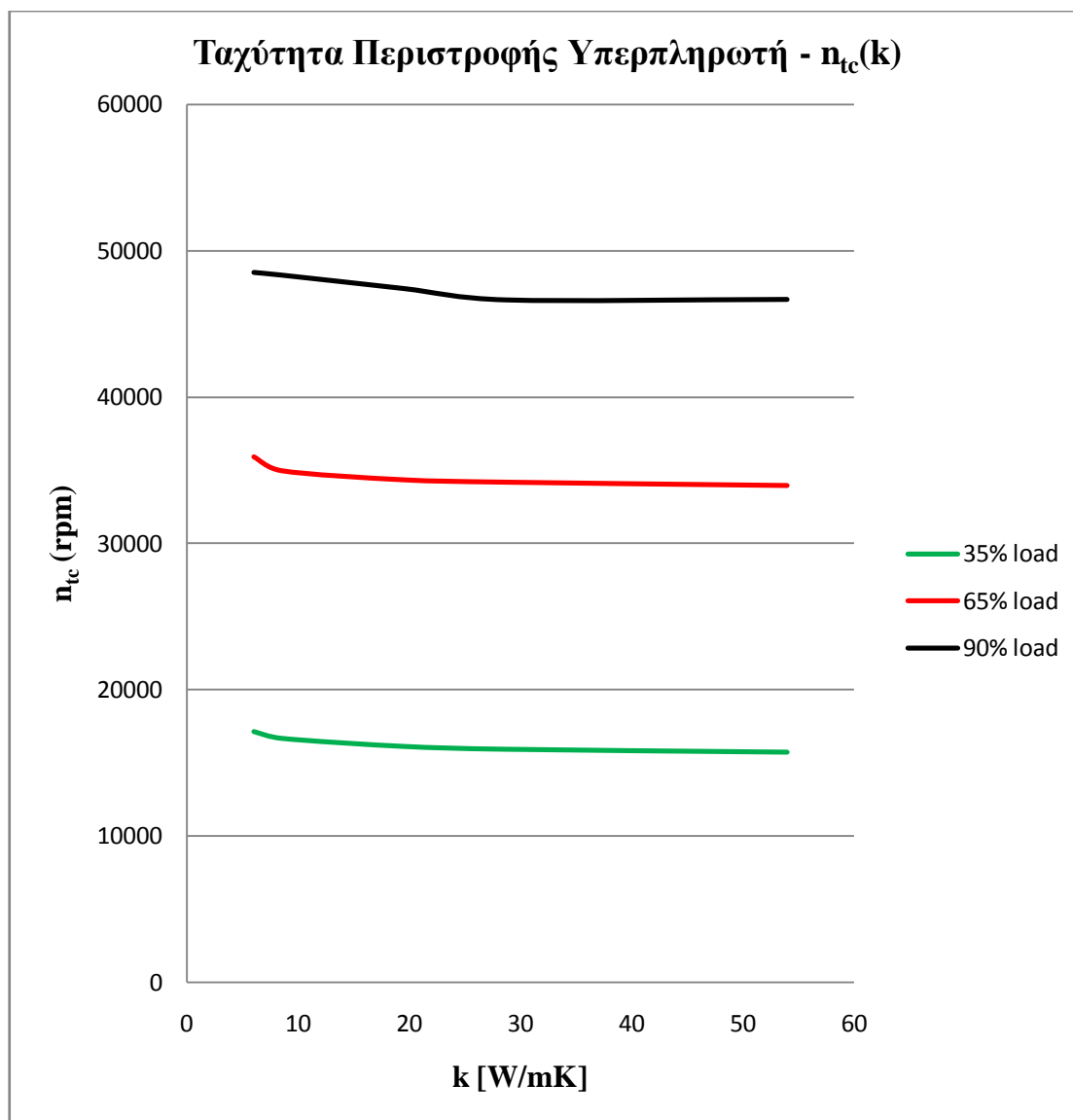
Από το Δ.4.6.5. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνει και η Μέγιστη Θερμοκρασία Αερίων στο Θάλαμο Καύσης, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Η ύπαρξη μόνωσης ή όχι, καθώς και το υλικό της παίζουν ουσιαστικό ρόλο. Παρατηρώντας την καμπύλη για 65% φορτίο, η T_{max} αυξάνει από τα 1499,1 K για χυτοσίδηρο (cast iron) στα 1583,1 K για μονωτικό PSZ πάχους 1,5 mm. Ποσοστό αύξησης 5,61%.



Διάγραμμα 4.6.6.

Πίεση Υπερπλήρωσης – p_{cpr} [bar]

Από το Δ.4.6.6. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνει και η Πίεση Υπερπλήρωσης. Το εύρος τιμών της είναι το αναμενόμενο για υπερπληρωμένο κινητήρα και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,1bar και 1,7bar. Η ύπαρξη μόνωσης ή όχι, καθώς και το υλικό της παίζουν μικρό ρόλο. Παρατηρώντας την καμπύλη για 90% φορτίο, η p_{cpr} αυξάνει από τα 1,63 bar για χυτοσίδηρο (cast iron) στα 1,69 bar για μονωτικό PSZ πάχους 1,5 mm. Ποσοστό αύξησης 3,42%.



Διάγραμμα 4.6.7.

Ταχύτητα Περιστροφής Υπερπληρωτή – n_{tc} [rpm]

Από το Δ.4.6.7. φαίνεται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνει και η Ταχύτητα Περιστροφής του Υπερπληρωτή. Η ύπαρξη μόνωσης ή όχι, καθώς και το υλικό της παίζουν μικρό ρόλο. Παρατηρώντας την καμπύλη για 90% φορτίο, η n_{tc} αυξάνει από τις 46690 rpm για χυτοσίδηρο (cast iron) στις 48530 rpm για μονωτικό PSZ πάχους 1,5 mm. Ποσοστό αύξησης 3,94%.

Από τα διαγράμματα της παραγράφου 4.6. συμπεραίνεται ότι η ύπαρξη μόνωσης **βελτιώνει την συνολική απόδοση** του συγκεκριμένου κινητήρα μέχρι και μία ποσοστιαία μονάδα, ενώ παράλληλα τον καθιστά **οικονομικότερο στη λειτουργία με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου** μέχρι και 7,3 g/kWh. Από την άλλη πλευρά όμως, αυξάνει τη μέγιστη πίεση αερίου στο Θάλαμο Καύσης μέχρι και 9 bar, τη μέγιστη θερμοκρασία αερίου στο θάλαμο καύσης μέχρι και 5,61%, τη πίεση υπερπλήρωσης μέχρι και 3,42% και τη ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή μέχρι και 3,94%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κ.Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ.Δ. Ρακόπουλος (2000), «Έμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ.Δ. Ρακόπουλος (1994) «Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 5) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2006) «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις ΕΜΠ.
- 6) Ξ.Κ. Κακάτσιος (2002) «Μετάδοση Θερμότητας», Εκδόσεις «Κλειδάριθμος», Αθήνα.
- 7) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «Diesel Engine Transient Operation», Springer, London.
- 8) C.D. Rakopoulos, D.C. Rakopoulos, G.C. Mavropoulos, E.G. Giakoumis (2003) «Experimental and theoretical study of short term response temperature transients in the cylinder walls of a diesel engine at various operating conditions», Science Direct, Applied Thermal Engineering 24 (2004) p.679-702, 2003 Elsevier Ltd.
- 9) C.D. Rakopoulos, K.A. Antonopoulos, D.C. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2004) «Investigation of the temperature oscillations in the cylinder walls of a diesel engine with special reference to the limited cooled case», International Journal of Energy Research 28 (2004) p.977-1002, 2004 John Wiley & Sons Ltd.

- 10) J.F Tovell (1984) «Ceramics and the Reciprocating Internal Combustion Engine»,
Materials & Design Vol. 5, p.215-220, October/November 1984.
- 11) Borman, G. and Nishiwaki, K. (1987) «Internal-combustion engine heat transfer.
Progress in Energy and Combustion Science», Vol. 13, p. 1-46.
- 12) Insaco Incorporated, 2004-2009
- 13) Stanford Materials Corporation, Aliso Viejo, California, USA
- 14) Ceram Research Ltd
- 15) Wikipedia, www.wikipedia.org