



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΜΕ COMSOL**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ Ν. ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ  
ΔΡ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2014**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Τζιβανίδη Χρήστο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το πολύ ενδιαφέρον αυτό θέμα και για την υποστήριξη και υπομονή όλο αυτό το διάστημα που χρειάστηκε .

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές για την αμέριστη βοήθεια που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια .

Τέλος,κυρίως θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη, την υπομονή, αλλά και για την κατανόηση που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια .

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Λίστα Συμβόλων	6
Λίστα Συντμήσεων	7
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>8</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ</b>	<b>9</b>
1.1 Υλικά Αλλαγής Φάσης	13
1.2 Τρόποι Αποθήκευσης Ενέργειας	13
1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	14
1.3.1 Φυσικές Ιδιότητες	14
1.3.2 Τεχνικές Ιδιότητες	14
1.3.3 Κινητικές Ιδιότητες	15
1.3.4 Οικονομικές Ιδιότητες	15
1.4 Ανόργανα Υλικά	16
<b>2. ΒΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ</b>	<b>19</b>
2.1.1 Ιδιότητες Υλικών	19
2.1.2 Διαστάσεις και Οριακές Συνθήκες	20
2.1.3 Παραδοχές	21
2.2 Περιγραφή Βασικού Συστήματος Αποθήκευσης Θερμότητας	21
<b>3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΩΠΟΥ</b>	<b>27</b>
3.1 Συνθήκες Μετώπου Στερεού Υγρού	27
3.2 Συνθήκες Μεταξύ HTF- Σωλήνα – PCM	28
<b>4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΗΤΕΣ</b>	<b>29</b>
4.1 Φύση Των Προβλημάτων Σύνθετης Μεταφοράς Θερμότητας	29
4.2 Ροή HTF Εντός Σωλήνα	31
4.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ “ΠΡΟ ΤΗΞΗΣ”	33
4.3.1 Ασταθής Αγωγιμότητα Για Το Στερεό PCM	33
4.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ “ΤΗΞΗΣ”	34
4.4.1 Ασταθής Αγωγιμότητα Για Το Λιωμένο PCM	34
4.4.2 Ασταθής Αγωγιμότητα Για Το Στερεό PCM Στην Άλλη Πλευρά Του Μετώπου	36
<b>5. ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ</b>	<b>37</b>
5.1 Ανεξαρτησία Πλέγματος Για Την Ασταθή Λύση	37
<b>6. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ</b>	<b>38</b>
6.1 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Τη Λειτουργία Του Συστήματος	38
6.2 Χρόνοι Που Επηρεάζουν Τη Λειτουργία Του Συστήματος	38
6.3 Γεωμετρίες Που Θα Χρησιμοποιηθούν	39
<b>7. COMSOL</b>	<b>42</b>
7.1 Εισαγωγή Στο Λογισμικό COMSOL Multiphysics	42
7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ COMSOL	43
7.2.1 Διαστάσεις Προβλήματος - Γεωμετρία	43

7.3 ΔΗΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ	51
7.3.1 Στερεό Υλικό PCM - Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> -12H <sub>2</sub> O	51
7.3.2 Αιθυλενογλυκόλη για HTF	53
7.4 ΦΥΣΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	55
7.4.1 Συζυγής Μεταφορά Θερμότητας	55
7.5 ΡΕΥΣΤΟ	57
7.5.1 Επιφάνεια Εισόδου Του Ρευστού (Inlet)	57
7.5.2 Επιφάνεια Εξόδου Του Ρευστού (Outlet)	59
7.5.3 Αρχική Θερμοκρασία Του Ρευστού	61
7.6 ΠΛΕΓΜΑ	62
7.6.1 Μέγεθος Πλέγματος	63
7.7 Μελέτη Μοντέλου	70
7.8 Εκτέλεση Υπολογισμού	72
7.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	74
7.9.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 1D	75
7.9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 2D	77
7.9.3 Παράλληλο Επίπεδο Στον Άξονα Της Δεξαμενής (2D)	78
7.9.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D- Δεξαμενή με 1 Σωλήνα HTF	82
7.9.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D- Δεξαμενή με 3 Σωλήνες HTF	85
7.9.6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D- Δεξαμενή με 5 Σωλήνες HTF	88
7.9.7 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D- Δεξαμενή με Ύψος 2m	90
7.9.8 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D- Δεξαμενή με Πλάτος 3m	93
<b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>96</b>
<b>9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>98</b>

## Λίστα Συμβόλων

$M$ : Ροή μάζας υγρού μεταφοράς θερμότητας (kg/s)

$T_{\infty}$ : Θερμοκρασία Μακρού πεδίου

$T_{in}$ : Θερμοκρασία εισόδου υγρού μεταφοράς θερμότητας ( K )

$m$  : Ρυθμός τήξης μάζας του υλικού αλλαγής φάσης PCM (kg/s)

$\Delta$  : Απόσταση της διεπαφής μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης από τοίχωμα σωλήνα (m)

$D1$ : Διάμετρος Σωλήνα (m)

$D2$ : Διάμετρος Δεξαμενής PCM (m)

$h_{fg}$ : Λανθάνουσα θερμότητα τήξης

$L$  : Μήκος Σωλήνα (m)

$r$  : Ακτινική απόσταση (m)

$r1$ : Ακτίνα Σωλήνα (m)

$r2$ : Ακτίνα Δεξαμενής PCM (m)

$T$ : Θερμοκρασία ( K )

$V$ : Ταχύτητα (m/s)

$x$  : Αξονική απόσταση (m)

$\Theta$ : Γωνία ( ° )

$\rho$  : Πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup> )

## Λίστα Συντμήσεων

HTF : Ρευστό μεταφοράς θερμότητας (Heat transfer fluid)

PCM : Υλικό αλλαγής φάσης (Phase change material)

TES : Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Thermal Energy Storage)

LHTES : Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat Thermal Energy Systems)

### Δείκτες

1 : Τηγμένο PCM

2: Στερεό PCM

F: Ρευστό μεταφοράς θερμότητας

### Εκθέτες

i : Διεπαφή Τήγματος-Στερεού

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική αυτή αναπτύσσεται η διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης ενός συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιείται ευρέως και ενδεικνύεται για διάφορες εφαρμογές .

Το σύστημα αυτό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεταφέρει θερμότητα από ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας (Heat transfer fluid – HTF) ρέοντας μέσα από ένα σωλήνα στο περιβάλλον υλικό αλλαγής φάσης (Phase change material – PCM) το οποίο μπορεί να είναι διαφορετικό κατά περίπτωση.

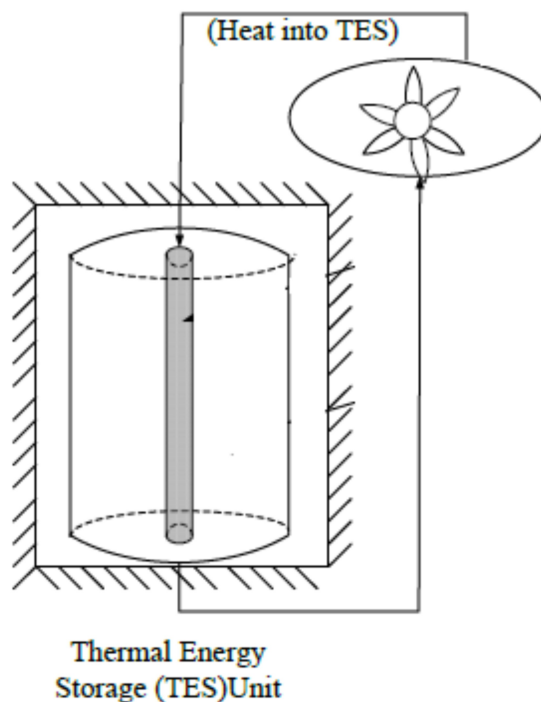
Μέσω μιας ασταθούς διαδικασίας τήξεως ή πήξεως το PCM απορροφά ή απελευθερώνει θερμική ενέργεια υπό τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας . Επιστημονική και Μηχανολογική πληροφορία επιτυγχάνεται μέσα από την προτεινόμενη διαδικασία μοντελοποίησης .

Η προσέγγιση με ακρίβεια παρακολουθεί το κινούμενο μέτωπο τήξης (μοντελοποιημένο ως γραμμή αλληλεπίδρασης υγρού-στερεού) και παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις χρονικά μεταβαλλόμενες ροές θερμότητας ,το θερμοκρασιακό προφίλ ,την αποθηκευμένη ενέργεια κλπ.

Στο Μηχανολογικό κομμάτι η προτεινόμενη προσέγγιση λύνει με ακρίβεια και μεμονωμένα και συλλογικά όλα τα ασταθή προβλήματα μεταφοράς θερμότητας για καθένα από τα τμήματα του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας . Αυτό αποδίδει κρίσιμη γνώση πάνω στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους αποτελεσματικότητας και απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ



Η διαρκώς αυξανόμενη περιβαλλοντική συνείδηση σε θέματα όπως:

- Η μόλυνση του αέρα από τα προϊόντα καύσης.
- Η συγκέντρωση αερίων που συμβάλλουν στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Θέματα ενεργειακής ασφάλειας (με αφετηρία την αύξηση της τιμής της βενζίνης και την παγκόσμια μείωση των αποθεμάτων πετρελαίου).

Καθώς και μια σειρά άλλων παραγόντων κινητοποιεί την έρευνα για εξέλιξη και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .

Σχήμα 1

Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Η Ηλιακή ενέργεια ως θερμική πηγή ενέργειας παραμένει μια από τις πιο ισχυρές ανανεώσιμες πηγές ειδικά αν αναλογιστούμε τη διαθεσιμότητα και την αφθονία της στο μεγαλύτερο μέρος της Γης. Λόγω της περιοδικότητας και του διακοπτόμενου χαρακτήρα της ενεργειακής αυτής πηγής έχουμε να αντιμετωπίσουμε τα εξής :

- Μεταβαλλόμενη ένταση κατά τη διάρκεια της μέρας
- Απουσία κατά τη διάρκεια της νύκτας
- Περιορισμένη διαθεσιμότητα (Ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς και βροχερούς μήνες) .

Έτσι οι νέοι σταθμοί ηλικιακής ενέργειας πρέπει να ενσωματώνουν παράλληλα με την παράγωγη, τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (ώστε να αποθηκεύεται η αχρησιμοποίητη περίσσεια θερμότητα για μετέπειτα χρήση όταν θα υπάρχει περιορισμένη η καθόλου ηλιοφάνεια) καθώς και τη δυνατότητα χρήσης άλλων μορφών ενέργειας, ώστε να είναι οικονομικά αποδοτικοί στην κάλυψη των διαφόρων αναγκών καθώς και τη μεταβαλλόμενη ζήτηση ενέργειας. Ανάμεσα σε διαφορετικές μορφές αποθήκευσης ενέργειας (χημική, πυρηνική, μηχανική, θερμική κ.λ.π.) τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που θα μας απασχολήσουν εδώ λέγονται συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat Thermal Energy Systems - LHTEs).

Ενώ η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί με διάφορες μορφές (όπως αισθητή θερμότητα σχετιζόμενη με τη θερμοκρασία ενός υλικού, θερμοχημική ενέργεια, λανθάνουσα θερμότητα) στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής θα ασχοληθούμε με συστήματα LHTEs που χρησιμοποιούν την αλλαγή φάσης στερεό-υγρό σε κατάλληλα υλικά αλλαγής φάσης PCM. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES) με το οποίο θα ασχοληθούμε φαίνεται στο σχήμα 1, η θερμότητα από την Ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως λανθάνουσα θερμότητα που απορροφάται κατά το λιώσιμο του υλικού αλλαγής φάσης PCM στην TES για να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Η χρησιμοποίηση επιτυγχάνεται με την αντίστροφη αλλαγή φάσης στην οποία το λιωμένο PCM παγώνει και στερεοποιείται, ώστε να απελευθερώσει λανθάνουσα θερμότητα που μεταφέρεται μέσω της αντίστροφης ροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας HTF.

Πολλοί διαφορετικοί τύποι υλικών PCM (οργανικά, ανόργανα) έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης θερμότητας με στόχο να βελτιώσουν την απόδοση συστημάτων όπως αντλιών θερμότητας, συστημάτων διαχείρισης ενέργειας διαστημοπλοίων, εμπορικών συστημάτων HVAC κ.λ.π.

Στο πλαίσιο του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES) με το οποίο θα ασχοληθούμε η επιλογή του PCM βασίζεται στην προσεκτική αξιολόγηση της θερμοκρασίας λιώσιματος, την σταθερότητα του υλικού κατά τη διάρκεια πολλών κύκλων τήξεως-πήξεως, τις θερμικές του ιδιότητες αγωγιμότητα λανθάνουσα θερμότητα, κόστος, κ.α. το υλικό επιλογής για την εγκατάσταση είναι συχνά  $\text{NaNO}_3$  ή  $\text{KNO}_3$  με δεδομένες και γνώστες ιδιότητες.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν κατάλληλα υλικά για μια τέτοια εγκατάσταση TES η χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα συχνά χαμηλότερη του  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  δημιουργεί σοβαρούς περιορισμούς στη χρονικά μεταβαλλόμενη αποτελεσματικότητα και απόδοση της εγκατάστασης. Η συνεχιζόμενη έρευνα στον τομέα αυτό συνιστά ότι η ενεργή θερμική αγωγιμότητα του PCM και η απόδοση της εγκατάστασης TES μπορεί να βελτιωθεί ακολουθώντας κάποιο από τα παρακάτω:

1. Χρήση νανοσωματιδίων στη δομή του υλικού αλλαγής φάσης PCM ώστε να βελτιωθούν οι θερμικές του ιδιότητες.
2. Χρήση θερμοχημικών αντιδράσεων για την υποβοήθηση της διαδικασίας απορρόφησης/απόδοσης λανθάνουσας θερμότητας.
3. Χρήση πτερυγίων υψηλής θερμικής αγωγιμότητας ενσωματωμένων στο PCM και στην εξωτερική μεριά των σωλήνων μεταφοράς του HTF.
4. Χρήση μικρής διαμέτρου αγωγών θερμότητας προσαρμοσμένων στο εξωτερικό των σωλήνων μεταφοράς του ρευστού μεταφοράς θερμότητας Heat transfer fluid – HTF.

Κατά τη βασική μοντελοποίηση αυτής της εργασίας οι ιδιότητες του καθαρού PCM θεωρούνται γνωστές. Αυτές οι θερμικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, λανθάνουσα θερμότητα) μπορούν να αλλαχθούν με τη βοήθεια προσεγγιστικών μοντέλων, ώστε να αποτυπωθούν τα οφέλη στην αποτελεσματικότητα και απόδοση που θα προκύψουν από την εφαρμογή κάποιων από των παραπάνω μεθόδων για την αύξηση της απόδοσης του PCM στην δεδομένη εγκατάσταση .

Σχετικά με τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των προβλημάτων της διαδικασίας τήξεως - πήξεως σε βασικό και συστημικό επίπεδο στο κέντρο της ανάλυσης για ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat Thermal Energy Systems-LHTES) πολλά έχουν γίνει και είναι γνωστά για παράδειγμα πέρα από τις εξισώσεις που ορίζουν κάθε μια από τις δυο φάσεις το μαθηματικό μοντέλο που ορίζει τις διεργασίες στη γραμμή στερεού-υγρού είναι γνωστό με αρκετή ακρίβεια (βλ. Delhay 1974, Abbott 1989) με δεδομένες συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας (σε αντίθεση με τη μη ύπαρξη συνθηκών θερμοδυναμικής ισορροπίας) και ακριβή μοντέλα αλληλεπίδρασης (σε αντίθεση με μοντέλα ασαφούς ζώνης) θεωρούνται επαρκή .

Αυτή είναι και η περίπτωση που μας ενδιαφέρει για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES) με το οποίο θα ασχοληθούμε λόγω του ότι τα αποτελέσματα σε επίπεδο συστήματος είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος εδώ. Παρά την ακριβή γνώση των συνθηκών στη γραμμής διεπαφής οι διαδικασίες επίλυσης που έχουμε είτε αναλυτικές είτε υπολογιστικές περιορίζονται σε σταθερές θερμικές οριακές συνθήκες για το όριο μεταφοράς θερμότητας του PCM .

Πάραυτα για το LHTES που μας άφορα οι οριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας στη ζώνη διεπαφής μεταξύ σωλήνα HTF και του υλικού PCM παρατηρούνται ασταθείς οριακές συνθήκες που μπορούν μόνο να καθοριστούν με σύνθετη ανάλυση της μεταβαλλόμενης μεταφοράς θερμότητας μέσα στο PCM και την εξαναγκασμένη συναγωγή στη ροή του HTF.

Όσον αφορά μια τέτοια σύνθετη ανάλυση τα διαθέσιμα αποτελέσματα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία περιορίζονται σε ολοκληρωτικές προσεγγίσεις που δεν είναι αρκετές για την άντληση όλης της χρήσιμης πληροφορίας όπως η επίδραση της θέσης του χρονικά μεταβαλλόμενου μετώπου τήξης στην συνολικά αποθηκευμένη θερμότητα, την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Η μελέτη αυτή παρακάμπτει αυτό το εμπόδιο και παρέχει μια προσέγγιση προσομοίωσης που μας επιτρέπει να αποκομίσουμε και τα επιστημονικά και τα μηχανολογικά δεδομένα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES) εντός του πλαισίου του Χρησιμοποιούμενου μοντέλου .

Όσον αφορά μια λεπτομερή υπολογιστική προσομοίωση, η προσέγγιση που προτιμάται στη βιβλιογραφία είναι το να προσεγγίσουμε το πρόβλημα του μετακινούμενου μετώπου - διεπαφής με εξίσωση ενθαλπιών μεταξύ των δύο φάσεων του υλικού PCM . Στη μέθοδο αυτή η διεπαφή προσδιορίζεται σαν μια λεπτού πάχους “ασαφή” ζώνη πάνω στην οποία η ενθαλπία  $h$  (που εμφανίζεται με τη διαφορική μορφή της εξίσωσης ενέργειας  $\theta h/\theta t = \text{div}(k \cdot \text{grad}T)$ ) μεταβάλλεται απότομα μεταξύ των τιμών από υγρή και στερεά φάση. Όταν συρρικνώσουμε οριακά την “ασαφή” ζώνη μπορεί κάποιος να ανακτήσει και να ικανοποιήσει όλες τις ακριβείς συνθήκες διεπαφής που εφαρμόζονται σε ένα μοντέλο προσέγγισης “αιχμηρής” διεπαφής . Εφόσον αυτή η προσέγγιση της εξίσωσης ενθαλπιών είναι επιτυχής τότε δεν είναι απαραίτητο να παρακολουθούμε λεπτομερώς τη διεπαφή .

Η επιθυμητή αυτή περιοριστική συμπεριφορά της “ασαφούς” ζώνης είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη και συχνά εμφανίζονται ταλαντώσεις στη θερμοκρασία . Αυτό συμβαίνει γιατί για καλά αποτελέσματα απαιτείται ταυτόχρονα και

πολύ μικρό μέγεθος πλέγματος κόμβων για τη συρρίκνωση της ζώνης αλλά και σωστή διακριτοποίηση του σχεδιασμού για τη ζώνη αυτή.

Το προτεινόμενο μοντέλο προσέγγισης διεπαφής είναι επιτυχές γιατί ικανοποιεί επακριβώς τη φυσική της αλλαγής φάσης στη διεπαφή ενώ παράλληλα με ακρίβεια παρακολουθεί τη χρονική εξέλιξη της. Αυτή η ικανότητα με ακρίβεια να ικανοποιεί όλους τους φυσικούς περιορισμούς στη διεπαφή (όπως διατήρηση μάζας ,διατήρηση ενέργειας κ.λ.π.) ενώ παράλληλα να ικανοποιεί και όλους τους φυσικούς περιορισμούς για όλα τα στοιχεία του συστήματος κάνει το μοντέλο αυτό αρκετά αξιόπιστο .

Η προσέγγιση της παρακολούθησης του μετώπου διεπαφής για το πρόβλημα τήξεως - πήξεως θεωρεί το στερεό PCM σαν μια σταθερή φάση. Η ίδια αυτή προσέγγιση της παρακολούθησης του μετώπου τήξης έχει αποδειχθεί πολύ αποτελεσματική σε πιο σύνθετα δακτυλιοειδή προβλήματα βρασμού και συμπύκνωσης όπου και οι δυο φάσεις μετακινούνται και επηρεάζουν τη θέση του μετώπου διεπαφής.

Λόγω του πλεονεκτήματος της προσέγγισης με προσομοίωση του προβλήματος και τη δυνατότητα υλοποίησης της διαδικασίας επίλυσης με ένα συνδυασμό εμπορικά διαθέσιμων εργαλείων προσομοίωσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται Χρήση COMSOL) για τον εντοπισμό του μετακινούμενου μετώπου στέρεου-υγρού η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί εύκολα να συνυπολογίσει την φυσική συναγωγή μεταξύ λιωμένης φάσης και τη θερμική αντίσταση του τοιχώματος του σωλήνα .

Τα εργαλεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης που αναφέρονται επιτυγχάνουν τα ακόλουθα :

- Αποτυπώνουν τη φυσική του συνδυασμένου προβλήματος μεταφοράς θερμότητας και ταυτόχρονα δίνουν χρονικά μεταβλητές λύσεις για τη ροή του HTF και το λιώσιμο του PCM. Αυτό δίνει την αναγκαία πληροφορία για ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας, θερμοκρασιακά προφίλ, ποσό θερμικής ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στο υλικό PCM.
- Παρακολουθεί τις χρονικά μεταβαλλόμενες τοποθεσίες της ζώνης τήξεως με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι απαλλαγμένα από υπολογιστικά σφάλματα κατά την απουσία σφαλμάτων στη φυσική του προβλήματος.
- Λύσεις από αυτή της προσέγγιση ικανοποιούν κριτήρια σύγκλισης σε όλους τους τομείς (HTF, τηγμένο PCM, στερεό PCM).
- Οι λύσεις ικανοποιούν όλα τα κριτήρια διατήρηση μάζας , διατήρηση ενέργειας κ.λ.π.
- Είναι εξακριβωμένο ότι οι λύσεις είναι ορθές με την έννοια ότι το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας (Πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα) ικανοποιείται για ολόκληρο το σύστημα η οποιοδήποτε όγκο έλεγχου.
- Οι λύσεις που επιτυγχάνονται εμφανίζουν την απαιτούμενη ανεξαρτησία πλαισίου όσον αφορά τη χωρική και χρονική διακριτοποίηση.
- Η μεθοδολογία είναι αποδοτική καθώς καταναλώνει εκτεταμένη υπολογιστική ισχύ για να μοντελοποιηθεί η διαδικασία τήξεως στη διάρκεια που μας ενδιαφέρει .

## 1.1 Υλικά Αλλαγής Φάσης

Στη Θερμοδυναμική η μετάβαση (ή αλλαγή) φάσης είναι η διαδικασία μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από τη μία φάση σε κάποια άλλη. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι η παρατήρηση μιας ραγδαίας αλλαγής σε μία ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και κυρίως στη θερμοχωρητικότητά του με ταυτόχρονη μικρή μεταβολή σ' άλλες ιδιότητες, όπως στη θερμοκρασία του. Συνήθως, ο όρος αλλαγή φάσης αναφέρεται σε μεταβάσεις μεταξύ των τριών πρώτων καταστάσεων (στερεής, υγρής και αέριας). Για την επίτευξη της αλλαγής φάσης (τήξη ή στερεοποίηση) απαιτούνται μεγάλα ποσά θερμότητας που απορροφούνται από το υλικό π.χ. η τήξη του πάγου. Ακριβώς σ' αυτό το φαινόμενο στηρίζεται η τεχνολογία των υλικών αλλαγής φάσης (P.C.M.) και τα χρησιμοποιεί για να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω της διαδικασίας αλλαγής φάσης ενός υλικού, υπό σταθερή θερμοκρασία, ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα. Είναι δυνατόν σε κάποιες περιπτώσεις να εμφανιστεί αλλαγή κατάσταση μη-αδιαβατικά, με τέτοιο τρόπο, ώστε το θερμοδυναμικό σύστημα να υποστεί τα όρια της αλλαγής φάσης, χωρίς όμως να παρατηρείται η αλλαγή αυτή καθ' αυτή, όπως παρατηρείται στα φαινόμενα της υπερψύξης και της υπερθέρμανσης. Η κατάσταση που προκύπτει δεν είναι ενεργειακά σταθερή και χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά ημί-σταθερή.

Τα P.C.M. είναι μίγματα που λιώνουν και στερεοποιούνται σε καθορισμένη θερμοκρασία και είναι ως εκ τούτου ικανά να αποθηκεύουν και να αποδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Όταν ένα P.C.M. πρόκειται να υπαχθεί σε αλλαγή φάσης, απαιτείται ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να παρέχει η αποθήκευση θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η μεταφορά πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας συγκριτικά με την αισθητή θερμότητα.

## 1.2 Τρόποι Αποθήκευσης Ενέργειας

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν, μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις τρεις φάσεις:

- στερεή
- υγρή
- αέρια

Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό (χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού), τότε θα μπορούσαν να δημιουργηθούν δύο κατηγορίες:

- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σ' ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους.
- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σ' ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης. Βασική παρατήρηση για τις τιμές των δύο μεγεθών είναι ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο. Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Το βασικότερο όμως, είναι το χαρακτηριστικό τους να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, σε συνδυασμό με την υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους ανά μάζα και όγκο.

### **1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**

Η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η μεγάλη ενθαλπία τήξης είναι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να καλύψει ένα υλικό P.C.M. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν για τις περισσότερες αλλά όχι για όλες τις εφαρμογές .

Οι κυριότερες είναι οι ακόλουθες :

#### **1.3.1 Φυσικές Ιδιότητες**

1. Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ώστε να εξασφαλισθεί η αποθήκευση και στη συνέχεια η απελευθέρωση της θερμότητας σε μια εφαρμογή με σταθερό θερμοκρασιακό εύρος.
2. Μεγάλο ποσό ενθαλπίας αλλαγής φάσης ( $\Delta H$ ) για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας σε σχέση με την αποθήκευση που θα γινόταν αν είχαμε αποθήκευση ενέργειας με αισθητή θερμότητα.
3. Μεγάλη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή της αποθηκευμένης θέρμανσης ή ψύξης με ικανοποιητικό ποσό θερμοροής.
4. Δυνατότητα αναστρεψιμότητας των αλλαγών φάσεων, ώστε το υλικό να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές. Η σταθερότητα των κύκλων φόρτισης του υλικού στη διεθνή βιβλιογραφία καλούνται « cycling stability ».
5. Μικρό ποσό υπόψυξης ( subcooling ), ώστε να βεβαιωθούμε ότι το υλικό τήκεται και στερεοποιείται στις ίδιες θερμοκρασίες.

#### **1.3.2 Τεχνικές Ιδιότητες**

1. Μικρή τιμή της πίεσης ατμών, ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα βρίσκεται το υλικό αλλαγής φάσης.

1. Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης, επίσης για να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα φέρει το εν λόγω υλικό.
2. Φυσική και χημική σταθερότητα του υλικού για να έχει μεγάλη διάρκεια
3. Συμβατότητα με άλλα υλικά, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια διάρκεια ζωής του στο δοχείο, χωρίς να επηρεάζεται η δομή και η σύστασή του από τα υλικά των τοιχωμάτων του δοχείου.

### 1.3.3 Κινητικές Ιδιότητες

1. Υψηλή εμπύρινη αναλογία (nucleation rate), ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.
2. Υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να μπορεί να καλύπτει τη ζήτηση ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.

### 1.3.4 Οικονομικές Ιδιότητες

1. Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα, τα οποία προσφέρουν αποθήκευση θερμότητας για θέρμανση και ψύξη.
2. Μη τοξικά, για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους ασφάλειας.
3. Ανακυκλώσιμα, επίσης για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους.

Συνήθως, η επιλογή της χρήσης ενός υλικού αλλαγής φάσης γίνεται με κριτήριο τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία και τη δυνατότητα αντιστρεψιμότητας του κύκλου ψύξης – τήξης. Όμως, στην πλειονότητα των περιπτώσεων ένα υλικό δεν είναι δυνατόν να καλύψει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, διότι για παράδειγμα όταν η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρή, τότε απαιτείται η τοποθέτηση του υλικού σε κάψουλες ( encapsulation ), ώστε να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Επομένως, έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές και προσεγγίσεις οι οποίες έχουν στόχο να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα.

## 1.4 Ανόργανα Υλικά

Τα ανόργανα υλικά καλύπτουν μία μεγάλη θερμοκρασιακή κλίμακα. Περιλαμβάνουν το νερό στους 0°C, υδατικά διαλύματα αλάτων σε θερμοκρασίες μικρότερες από 0°C, ένυδρα άλατα μεταξύ 5°C και 130°C και τέλος διάφορα άλατα από 150°C και πάνω. Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χωριστούν σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά.

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος των ανόργανων υλικών. Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος.

Το πιο συνηθισμένο ένυδρο άλας είναι το άλας του Glauber  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , το οποίο περιέχει 44%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  και 56%  $\text{H}_2\text{O}$  με θερμότητα τήξης 32,4°C και λανθάνουσα θερμότητα 254 KJ/Kg.

Αν και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα του διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο supercooling περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών.

Η κατηγορία των μεταλλικών ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης περιλαμβάνει τα χαμηλής τήξης μέταλλα αλλά και τα εύτηκτα μέταλλα. Αυτά τα υλικά δεν έχουν θεωρηθεί ακόμη κατάλληλα ως τεχνολογία υλικών αλλαγής φάσης, κυρίως λόγω του βάρους τους. Ωστόσο, όταν θα απαιτούνται υλικά με μεγάλη συγκέντρωση όγκου, τότε θα επιλεγθούν ως τα καταλληλότερα λόγω της υψηλής θερμότητας τήξης τους ανά μονάδα όγκου. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταλλικών και άλλων υλικών αλλαγής φάσης είναι η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των πρώτων. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών είναι τα εξής:

- χαμηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα βάρους
- υψηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα όγκου
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- χαμηλή ειδική θερμότητα
- σχετικά χαμηλή πίεση ατμού

Τα πλεονεκτήματα των ανόργανων P.C.M. σε σύγκριση με τα οργανικά είναι η μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης, η μη αναφλεξιμότητά τους, η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητά τους και η υψηλότερη πυκνότητά τους.

Τα μειονεκτήματα των ανόργανων P.C.M. είναι ότι είναι διαβρωτικά, ότι είναι συνήθως η εμφάνιση του φαινομένου “supercooling”, η πιθανή δημιουργία ιζήματος λόγω του διαχωρισμού των φάσεων, η αβέβαιη θερμική σταθερότητα στις κυκλικές φορτίσεις, το αυξημένο κόστος αγοράς τους σε σχέση με τα οργανικά και τέλος, το ότι αποτελούν υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον πιθανό εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου, όταν είναι εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υψηλά ποσοστά υγρασίας.



Η ανάμιξη δύο ή περισσότερων ανόργανων συστατικών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός νέου υλικού αλλαγής φάσης με βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα συστατικά του.

Στους παρακάτω πίνακες διακρίνουμε ανόργανες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αλλαγής φάσης.

### Πίνακας 1

Ανόργανες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως P.C.M.

Compound	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	18.5	231
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25.8	125.9
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29	190.8
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	296
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32	251

## Πίνακας 2

Θερμοκρασία τήξης, ροή θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα ανόργανων υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί ως P.C.M.

Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
H <sub>2</sub> O	0	333 334	0.612 (liquid, 20 °C)	998 (liquid, 20 °C) 917 (solid, 0 °C)
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	8	253	Not available	1,720
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	29 30	171, 192	0.540 (liquid, 39 °C) 1.088 (solid, 23 °C)	1,562 (liquid, 32 °C), 1,496 (liquid), 1,802 (solid, 24 °C) 1,710 (solid, 25 °C)
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	296	Not available	Not available
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	35–44	265 280	0.476 (liquid) 0.514 (solid)	1,522
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	48–55	187, 209	Not available	1,670 (liquid) 1,750 (solid)
Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	58	226, 264	Not available	1,280 (liquid) 1,450 (solid)
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	78	265, 280	0.653 (liquid, 86 °C) 1.255 (solid, 23 °C)	1,937 (liquid, 84 °C) 2,180 (solid)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	89 90	149, 163	0.490 (liquid, 95 °C) 0.669 (solid, 55.6 °C)	1,550 (liquid, 94 °C) 1,636 (solid, 25 °C)
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	117	165, 169	0.570 (liquid, 120 °C) 0.704 (solid, 110 °C)	1,450 (liquid, 120 °C) 1,569 (solid, 20 °C)
NaNO <sub>3</sub>	307	172	0.5	2,260
KNO <sub>3</sub>	333	266	0.5	2,110
KOH	380	145	0.5	2,044
MgCl <sub>2</sub>	714	452	Not available	2,140
NaCl	800	492	5	2,160
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	854	276	2	2,533
KF	857	452	not available	2,370
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	897	236	2	2,290

## 2. ΒΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Thermal Energy Storage – TES)

### 2.1.1 Ιδιότητες Υλικών

Οι πίνακες δείχνουν τις ιδιότητες της στερεής και υγρής φάσης του ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) αντίστοιχα .

Οι ιδιότητες έχουν καταγραφεί στους 35 - 45°C. Το στερεό η υγρό θεωρείται ομογενές και οι ιδιότητες του καταγράφονται πιο κάτω μοντελοποιημένες να είναι θερμοκρασιακά ανεξάρτητες για τη ζώνη θερμοκρασιών που εξετάζουμε .

**Πίνακας 3**  
Ιδιότητες  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (στερεού)

Θερμοκρασία τήξης	35-45 °C
Θερμότητα τήξης	280 (kj/kg)
Πυκνότητα	1,582 (kg/m <sup>3</sup> )
Θερμοχωρητικότητα	1.69 (kj/kg.k)
θερμική αγωγιμότητα	0,514 (W/m k)

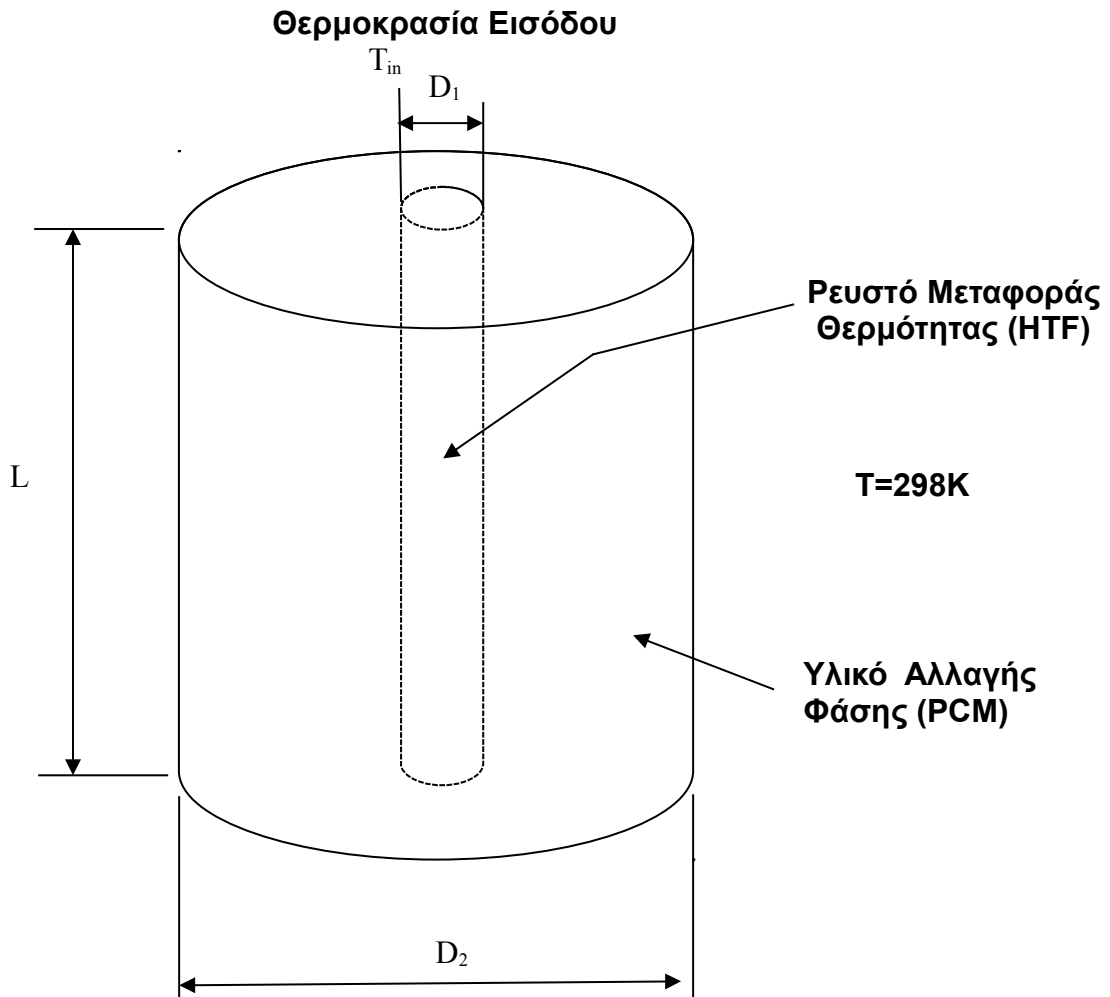
**Πίνακας 4**  
Ιδιότητες  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (υγρού)

Πυκνότητα	1,522 (kg/m <sup>3</sup> )
Θερμότητα τήξης	265 (kj/kg)
Θερμοχωρητικότητα	1.94 (kj/kg.k)
θερμική αγωγιμότητα	0,476 (W/m k)

**Πίνακας 5**  
Ιδιότητες αιθυλενογλυκόλης

Πυκνότητα	1113,2 (kg/m <sup>3</sup> )
Θερμοχωρητικότητα	2,46 (kj/kg.k)
θερμική αγωγιμότητα	0,25 (W/m k)
Δυναμικό ιξώδες	0,016 (Pas)
Λόγος ειδικής θερμότητας	1

### 2.1.2 Διαστάσεις και Οριακές Συνθήκες



Σχήμα 2.1  
Διαστάσεις και οριακές συνθήκες

Στο σχήμα φαίνεται η γεωμετρία της ροής του HTF εντός σωλήνα (αμελητέου πάχους, διαμέτρου  $D_1$  και μήκους  $L$ ) μέσα σε ένα υλικό PCM εσωτερικής διαμέτρου  $D_1$  και εξωτερικής διαμέτρου  $D_2$  που περιβάλλει το σωλήνα του HTF .

**Πίνακας 6**  
Διαστάσεις και οριακές συνθήκες

$D_1$ (m)	0,4
$D_2$ (m)	2
$L$ (m)	2
Θερμοκρασία εισόδου HTF $T_{in}$ (K)	358
Ρυθμός ροής μάζας ( $M_{in}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	0,03
Οριακή συνθήκη PCM στην εξωτερική διάμετρο $D_2$	θερμοκρασία περιβάλλοντος $T=298K$

### 2.1.3 Παραδοχές

- Το πρόβλημα είναι αξονοσυμμετρικό (γωνιακές μεταβολές δεν υπάρχουν) και δισδιάστατο .
- Καθ' όλη τη διάρκεια η σταθερή ροή του HTF διατηρεί τη θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}$  στους 358K .
- Το HTF είναι ασυμπίεστο ρευστό .
- Οι Ιδιότητες του HTF και του PCM μοντελοποιούνται επαρκώς από τις αντιπροσωπευτικές σταθερές τιμές για το θερμοκρασιακό εύρος που μας αφορά . Για την πυκνότητα, την ειδική θερμότητα την θερμική αγωγιμότητα κ.λ.π. χρησιμοποιούμε τα γνωστά σύμβολα  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $K$  .
- Οι δείκτες που χρησιμοποιούμε για το ρευστό HTF, το τηγμένο PCM και στερεό PCM είναι αντίστοιχα "F", "1", "2" . Έτσι τα  $\rho_f$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  συμβολίζουν την πυκνότητα για το ρευστό HTF, το τηγμένο PCM και στερεό PCM αντίστοιχα .
- Το τηγμένο και στερεό PCM είναι ομογενή και ισοτοπικά
- Καθώς η πίεση στο PCM είναι πρακτικά σταθερή η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία  $T_{sat}$  (~663K για  $\text{NaNO}_3$  ως PCM)
- Η αγωγή στο τηγμένο PCM θεωρείται αμελητέα . Ο ρόλος της γίνεται σημαντικός μετά τη συσσώρευση επαρκούς ποσότητας τηγμένου PCM.

## 2.2 Περιγραφή Βασικού Συστήματος Αποθήκευσης Θερμότητας (Thermal Energy Storage – TES)

Το σχήμα 2.2 αντιπροσωπεύει το τυπικό πρόβλημα στα συστήματα που μας ενδιαφέρουν όπου το υλικό αλλαγής φάσης PCM λιώνει (η στερεοποιείται) με το πέρασμα ενός θερμού (η κρύου) ρευστού που ορίζεται ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας (Heat transfer fluid – HTF) μέσω ενός σωλήνα βυθισμένου στο PCM .

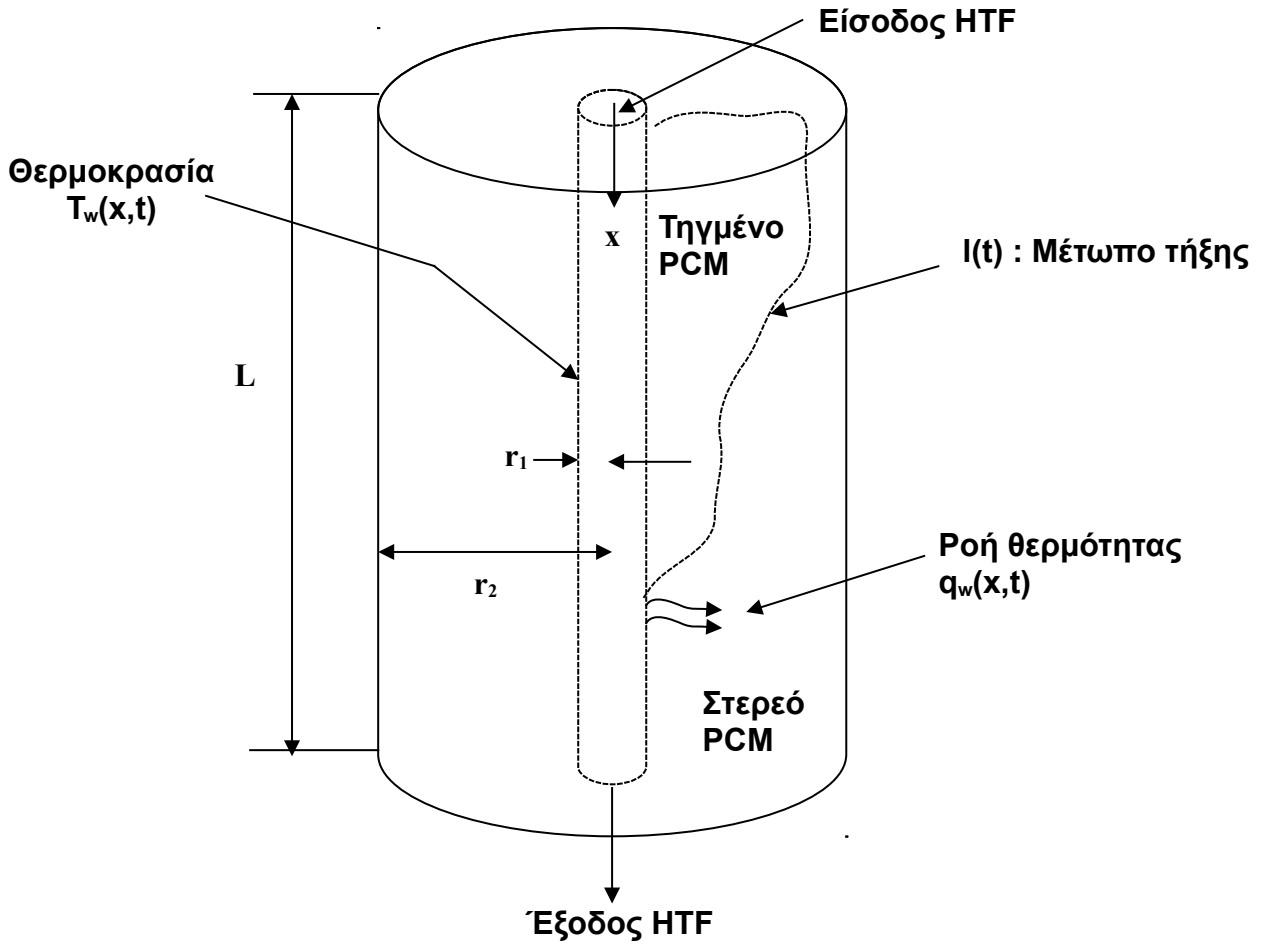
Για το σύστημα που περιγράφεται στο σχήμα 1 η τήξη λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης κατά τη διάρκεια του οποίου το HTF αποβάλλει θερμότητα καθώς μετακινείται προς τα κάτω ενώ αντίστοιχα το PCM ανεβάζει θερμοκρασία. Η μοντελοποίηση και προσομοίωση αυτού του κύκλου φόρτισης θα είναι το αντικείμενο με το οποίο θα ασχοληθούμε εδώ . Παρόλα αυτά και η μοντελοποίησή και προσομοίωση του κύκλου αποφόρτισης είναι εφικτή με απλή τροποποίηση του προτεινόμενου μοντέλου υπολογιστικής προσέγγισης .

Αρχικά θα αναφερθούμε στις βασικές αρχές και τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα για το πρόβλημα της ασταθούς τήξης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 . Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια μια πλήρης υπολογιστική διαδικασία προσομοίωσης για την επίλυση του προβλήματος της ασταθούς φόρτισης . Η ροή του ρευστού HTF είναι υδροδυναμικά σταθερή και η θερμοκρασία  $T_{in}$  στην αρχή του σωλήνα είναι επίσης σταθερή . Η ροή του HTF δημιουργεί μια ασταθή (χρονικά εξαρτημένη) θερμοκρασιακή μεταβολή στα τοιχώματα του σωλήνα ,στο ρευστό και στο υλικό PCM .

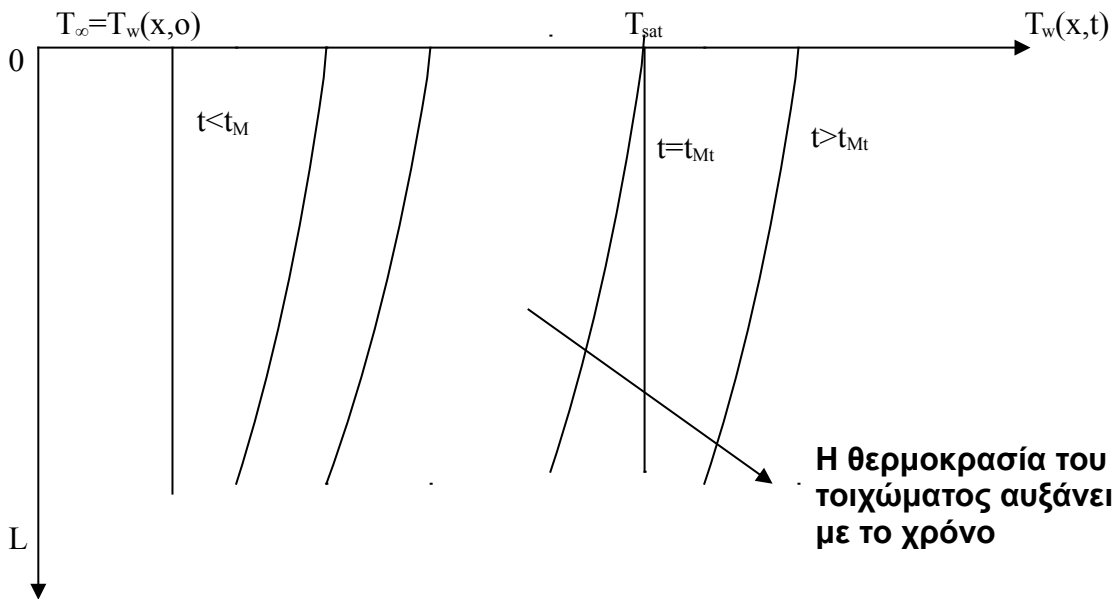
Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος θεωρούμε τις εξής αρχικές συνθήκες για  $t < 0$ , καθώς ενδιαφερόμαστε για τις λύσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα  $t > t^*$  όπου  $t^*$  είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ένα πολύ λεπτό στρώμα τηγμένου PCM αγκαλιάζει το σωλήνα) κάθε λογική εκλογή αρχικών συνθηκών επαρκεί.

Έτσι για  $t < 0$  η αρχική σταθερή ροή στο σωλήνα θεωρούμε ότι γίνεται κάτω από συνθήκες ενός εναλλάκτη θερμότητας με άπειρη αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα σε ενιαία θερμοκρασία  $T_{inf}$ . Αυτή η θερμοκρασία είναι επίσης και το μακρινό πεδίο θερμοκρασίας του PCM κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Στο χρονικό σημείο  $t=0$  ο εναλλάκτης θερμότητας αφαιρείται και τοποθετείται το υλικό PCM (που έχει συγκεκριμένη ειδική θερμότητα και ειδική θερμική αγωγιμότητα) του οποίου η θερμοκρασία μακρινού πεδίου είναι το ίδιο με αυτή που θεωρήσαμε αρχικά  $T_{\infty}$ .



Σχήμα 2.2  
Βασικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας



Σχήμα 2.3  
Ποιοτική μεταβολή της θερμοκρασίας του σωλήνα

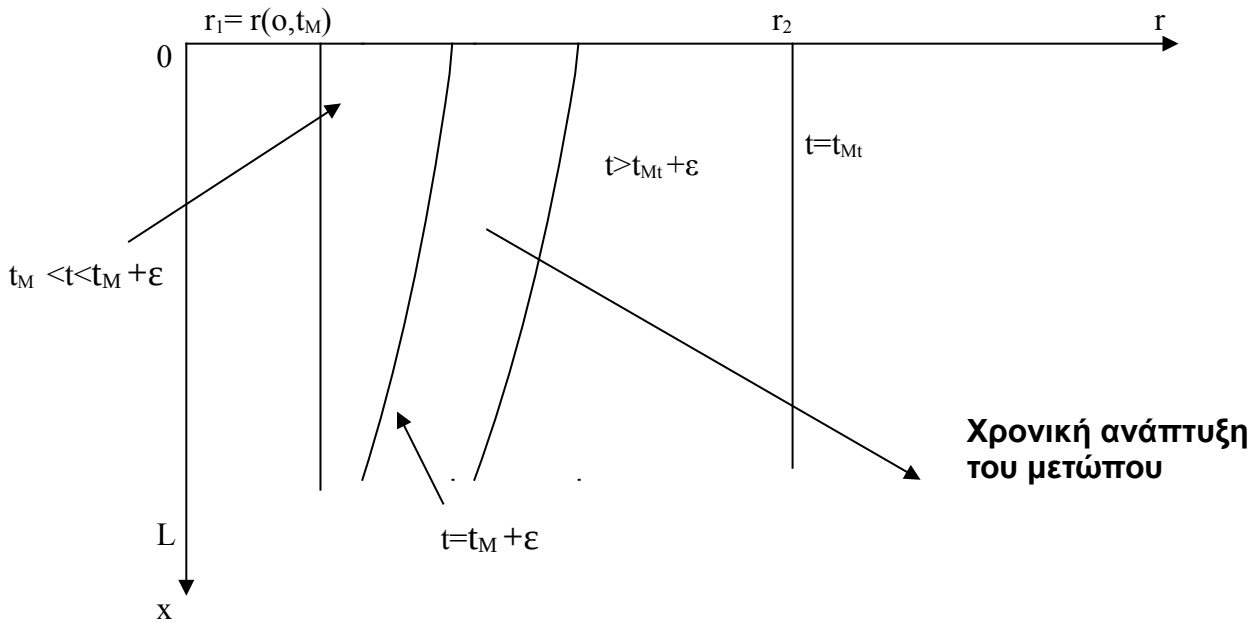
Οι δυο χρονικές περιόδους που μας ενδιαφέρουν είναι :

1. Η προ-τήξης περίοδος  $0 \leq t \leq t_M$
2. Η περίοδος τήξης  $t \geq t_M$

Μας ενδιαφέρει ο τρόπος που μεταβάλλεται η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία του σωλήνα με το χρόνο. Για λόγους απλούστευσης το πάχος του τοιχώματος θεωρείται αμελητέο. Η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία του σωλήνα είναι ίσες και συμβολίζονται  $T_w(x,t)$ . Οι χωρικές και χρονικές μεταβλητές της θερμοκρασίας του σωλήνα  $T_w(x,t)$  και της ροής θερμότητας  $q''_w(x,t)$  είναι σημαντικές και πρέπει να προσδιορισθούν. Σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  η αναμενόμενη ποιοτική μεταβολή της θερμοκρασίας του σωλήνα  $T_w(x,t)$  με το  $x$  αποτυπώνεται στο σχήμα 2.3. Για  $t = t_M$ , η θερμοκρασία του σωλήνα  $T_w(x,t)$  πρώτα φθάνει την τιμή υγροποίησης  $T_{sat}$  στο  $x=0$  (βλ σημείο M στο σχ 2.2) π.χ.  $T_w(0,t_M) = T_{sat}$  σχ.2.3.

Άλλοι σημαντικοί στόχοι της ασταθούς προσομοίωσης του προβλήματος του σχήματος 2.2 είναι να προσδιοριστούν η ροής θερμότητας  $q''_w(x,t)$  και η χρονικά μεταβλητή θέση του μετώπου τήξης (βλ.  $l(t)$  στο σχήμα 2.2). Για την αξονοσυμμετρική προσομοίωση, το μέτωπο τήξης στο σχήμα 2.4 ορίζεται με το  $r = \Delta(x,t)$





Σχήμα 2.4  
Χρονική ανάπτυξη του μετώπου

Επιπλέον των επιθυμητών αποτελεσμάτων που εμφανίζονται στα σχήματα 2.2-2.4 άλλα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι :

- Η συνολική παρεχόμενη θερμότητα  $Q_{[t_M, t]}$  που είναι διαθέσιμη στο τοίχωμα του σωλήνα σαν συνάρτηση του χρόνου  $t$

$$Q_{[t_M, t]} = \int_{t_M}^t \int_0^L q''_w(x, \tau) dx \cdot d\tau$$

- Η συνολική παρεχόμενη θερμότητα  $Q_{\text{σωλ-in}[t_M, t]}$  ως συνάρτηση του  $t$  που παρέχεται στην είσοδο του σωλήνα

$$Q_{\text{σωλ-in}[t_M, t]} = M_{\text{in}} \cdot C_{p-f} \cdot T_{\text{in}} \cdot (t - t_M)$$

- Η συνολικά αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM  $Q^{\text{stored}}(0, T)$  δίνεται :

$$Q^{\text{stored}}_{(t_M, \tau)} = M_{\text{τηγγματος}}(t) \cdot h_{sf}$$

Όπου  $M_{\text{τηγγματος}}(t)$  είναι η μάζα του τηγμένου ρευστού σε χρόνο  $t$  και  $h_{sf}$  είναι αντιπροσωπευτική τιμή της λανθάνουσας θερμότητας τήξης .

- Η φύση των θερμοκρασιακών μεταβολών  $T_1(x,r,t)$  και  $T_2(x,r,t)$  στο τηγμένο και στερεό PCM .
- Η χρονικά μεταβαλλόμενη φύση της αποτελεσματικότητας  $\epsilon_1(t)$  και  $\epsilon_2(t)$  του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σαν συνάρτηση του  $t > t_M$  , μήκους και της θερμικής οριακής συνθήκης για  $r=r_2$  και ορίζεται ως :

$$\epsilon_1 (t) \equiv \frac{Q_{[t_M,t]}^{stored}}{Q_{pipe-in [t_M,t]}} \quad \epsilon_2 (t) \equiv \frac{Q_{[t_M,t]}^{stored}}{Q_{[t_M,t]}}$$

- Η χρονικά μεταβαλλόμενη φύση της αποδοτικότητας  $\eta(t)$  της διαδικασίας αποθήκευσης ενέργειας ορίζεται ως :

$$\eta(t) \equiv \frac{Q_{[t_M,t]}^{stored}}{W_{pump}|_{[t_M,t]}}$$

Όπου  $W_{pump}=(M/\rho_f)*\Delta p*( t-t_M)$  είναι το μηχανικό έργο που δαπανήθηκε κατά το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει .

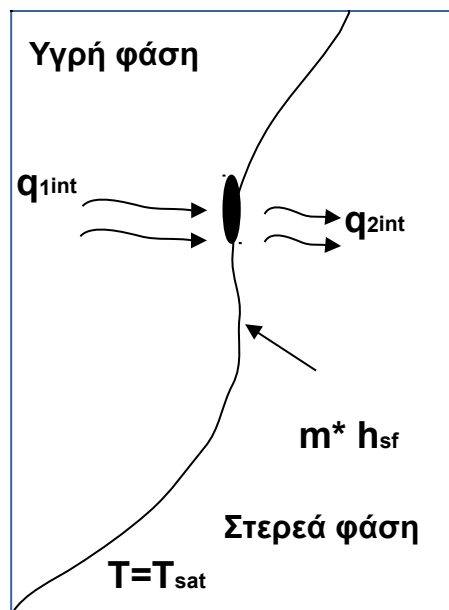
### 3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΩΠΟΥ

#### 3.1 Συνθήκες Μετώπου Στερεού Υγρού

Καθώς η τήξη προχωρά το μέτωπο μεταξύ στερεού και υγρού μετατοπίζεται και λανθάνουσα ενέργεια απορροφάται από το στερεό . Στο μέτωπο υπό την υπόθεση θερμοδυναμικής ισορροπίας και σταθερής πίεσης οι θερμοκρασίες κατά μήκος του μετώπου είναι συνεχής και σχεδόν σταθερές σε μια τιμή  $T_{sat}$  . Η διατήρηση της ενέργειας περιγράφεται στη συνέχεια στο σχήμα 3.1 Αν  $q_1^{int}$  είναι το ποσό της ροής θερμότητας που φθάνει (από την υγρή φάση) σε ένα σημείο του μετώπου ,ένα μέρος αυτής της ροής θερμότητας χρησιμοποιείται για να λιώσει το στερεό και το υπόλοιπο  $q_2^{int}$  αναχωρεί από το σημείο προς το στερεό PCM .

Κατά συνέπεια η διάφορα αυτών των δυο ισούται με το ρυθμό τήξης επί τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης

$$q_1^{int} - q_2^{int} = m^* h_{sf}$$



Σχήμα 3.1  
Τήξη του υλικού

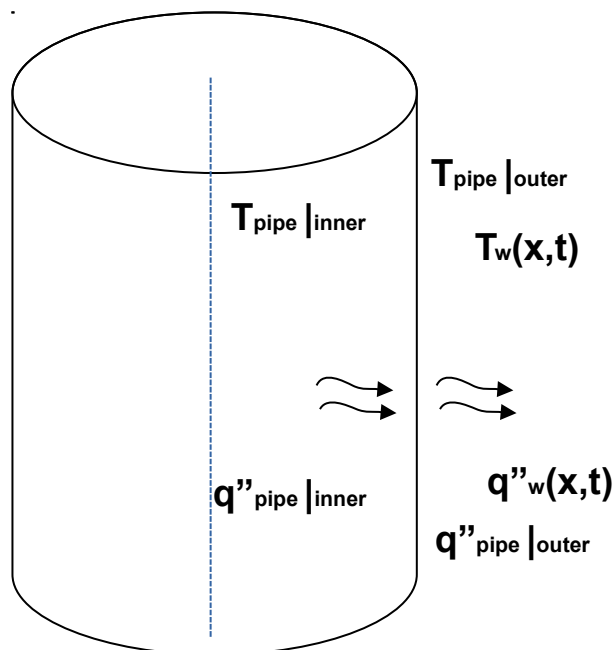
### 3.2 Συνθήκες Μεταξύ HTF- Σωλήνα – PCM

Καθώς το πάχος του σωλήνα θεωρείται αμελητέο η επιφάνεια μεταξύ ρευστού- τοίχωμα σωλήνα και τοίχωμα σωλήνα – PCM ταυτίζονται σε μια επιφάνεια .Στην επιφάνεια αυτή η συνέχεια της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας πρέπει να ισχύουν .Αυτό εκφράζεται ως εξής :

$$T_{\text{pipe}}|_{\text{inner}} = T_{\text{pipe}}|_{\text{outer}} = T_w(\mathbf{x},t)$$

και

$$q''_{\text{pipe}}|_{\text{inner}} = q''_{\text{pipe}}|_{\text{outer}} = q''_w(\mathbf{x},t)$$



Σχήμα 3.2  
Ροή στο τοίχωμα του σωλήνα HTF

## 4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΗΤΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται η φύση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας και οι χωρικοί τομείς για το PCM και το σύστημα ροής του HTF. Επίσης περιγράφονται οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του PCM και της ροής του HTF.

### 4.1 Φύση Των Προβλημάτων Σύνθετης Μεταφοράς Θερμότητας

Τα προβλήματα που μας αφορούν περιγράφονται σε τρία ξεχωριστά στάδια :

- Πριν την τήξη διάρκεια  $0 \leq t \leq t_M$ . Γι' αυτό το στάδιο το πρόβλημα περιγράφεται στο σχήμα 4.1.α
- Γρήγορη μετακίνηση του μετώπου στερεού υγρού στη διάρκεια μικρού χρονικού διαστήματος  $t_M \leq t \leq t_{M+\varepsilon} \equiv t^*$ , όπου  $\varepsilon$  πολύ μικρός.
- Διάρκεια τήξης για  $t \geq t^* \equiv t_{M+\varepsilon}$  για τη χρονική διάρκεια αυτή το πρόβλημα φαίνεται στο σχήμα 4.1.β

Το ταχύτατα μετακινούμενο μέτωπο κατά τη διάρκεια  $t_M \leq t \leq t_{M+\varepsilon}$  δεν έχει κεντρικό ρόλο στο πρόβλημα μας. Οι λόγοι για την μικρή του διάρκεια θα αναφερθούν παρακάτω.

Για  $0 \leq t \leq t_M$  το πρόβλημα έχει τα παρακάτω σκέλη :

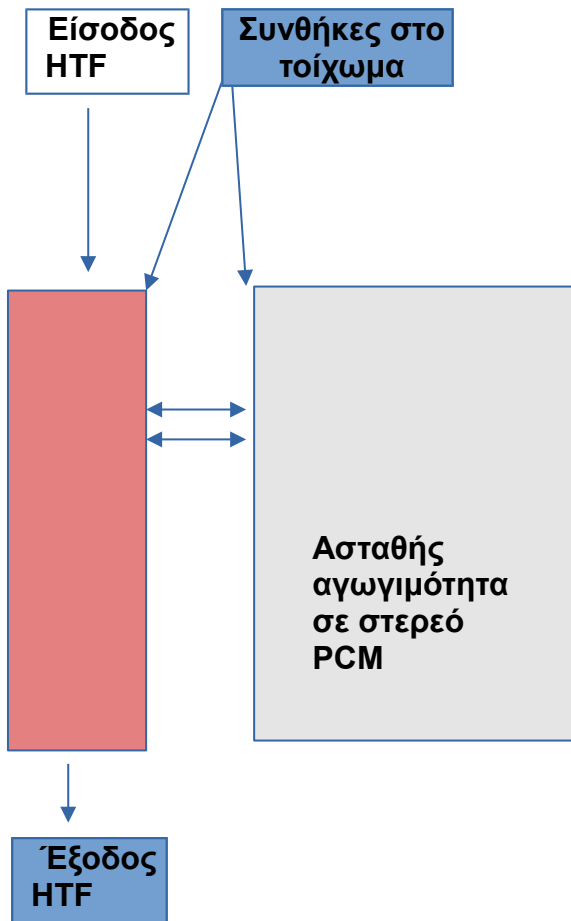
1. Τη ροή του HTF που ορίζεται για  $0 \leq r \leq r_1$  και  $0 \leq x \leq L$
2. Το κομμάτι της ασταθούς αγωγής για το PCM που ορίζεται για το διάστημα  $r_1 \leq r \leq r_2$  και  $0 \leq x \leq L$

Για  $t \geq t^* \equiv t_{M+\varepsilon}$  το πρόβλημα αποτελείται από τα παρακάτω :

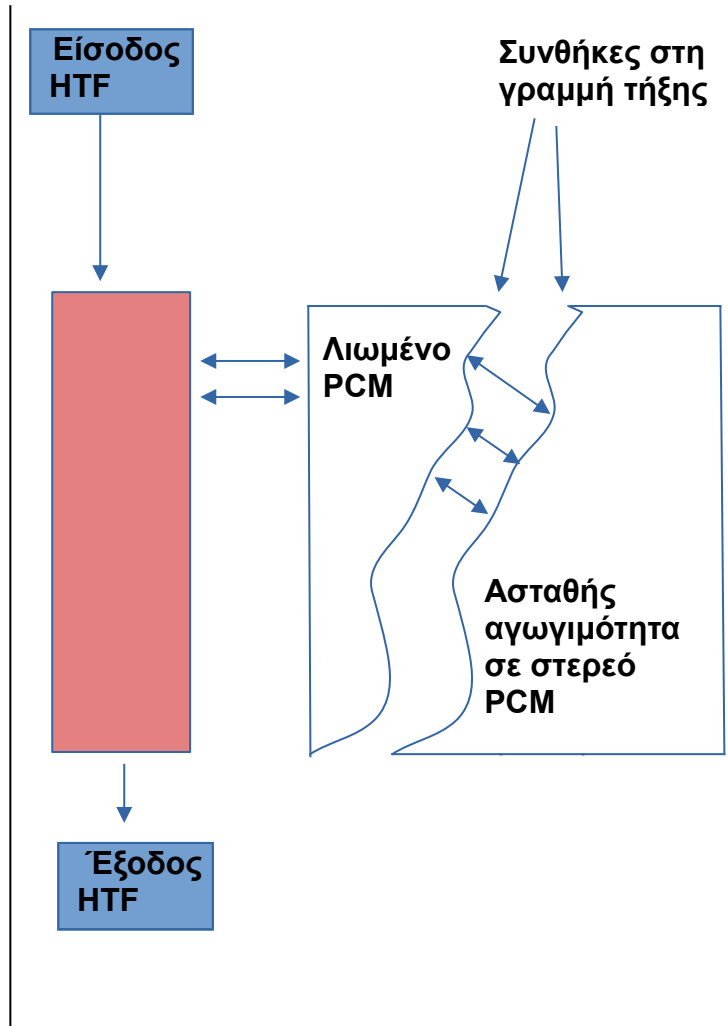
1. Τη ροή του HTF που ορίζεται για  $0 \leq r \leq r_1$  και  $0 \leq x \leq L$
2. Το πρόβλημα του λιωμένου PCM είτε ως αγωγής για ακίνητο λιώσιμο είτε σαν πρόβλημα συναγωγής για το τήγμα λαμβάνει χώρα για  $r_1 \leq r \leq \Delta(x,t)$  και  $0 \leq x \leq L$ .
3. Το πρόβλημα της ασταθούς αγωγιμότητας για το στερεό PCM που ορίζεται για  $\Delta(x,t) \leq r \leq r_2$  και  $0 \leq x \leq L$ .

Αφού το πρόβλημα του HTF παραμένει το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις “πριν τη τήξη” και “τήξη” περιγράφεται πρώτα .

### Περιοχές Στο Στάδιο Προ τήξης



Σχήμα 4.1.α  
Πριν την τήξη διάρκεια  $0 \leq t \leq t_M$

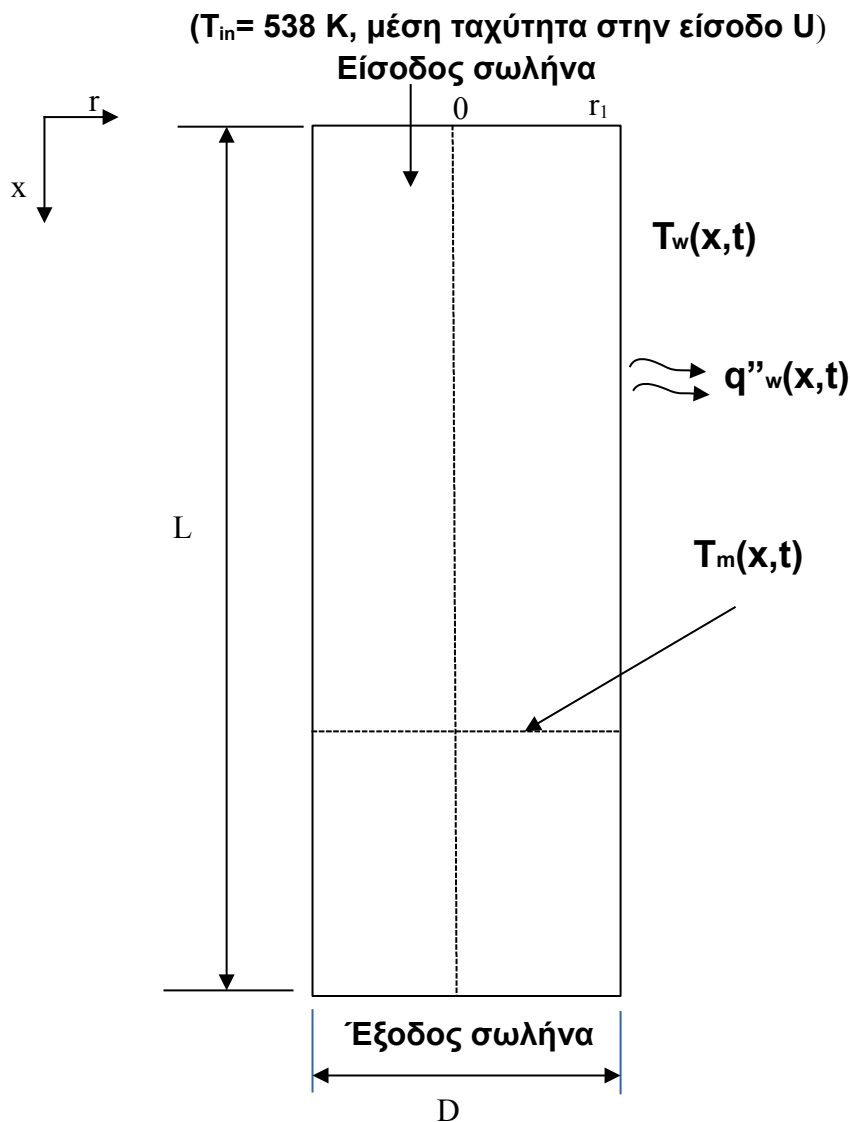


Σχήμα 4.1.β  
Χρονική διάρκεια  $t \geq t' \equiv t_M + \epsilon$

## 4.2 Ροή HTF Εντός Σωλήνα

Η συνεχώς τυρβώδης ροή του HTF εντός σωλήνα μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα πρόβλημα εξαναγκασμένης αγωγιμότητας. Καθώς η ροή είναι υδροδυναμικά σταθερή, οι ασταθείς μεταβολές της μέσης θερμοκρασίας και για  $t > 0$  μπορούν να εμφανιστούν προερχόμενες από την ασταθή θερμοκρασία τοιχώματος  $T_w(x,t)$  και όλοι οι ασταθείς όροι στην εξίσωση που ορίζει την ενέργεια της ροής του HTF μπορούν να αγνοηθούν. Η αστάθεια στις θερμοκρασιακές συνθήκες του τοιχώματος του σωλήνα μπορούν να αποδοθούν από την σχεδόν σταθερή ροή. Η απλοποίηση είναι εφικτή λόγω του ότι ο χαρακτηριστικός χρόνος  $\Delta t_{c-HTF}$  που σχετίζεται με τη ροή είναι κατά πολύ μικρότερος από το χαρακτηριστικό χρόνο  $\Delta t_{c-1} = \Delta T^* l_c / \alpha$  που σχετίζεται με τις αλλαγές στη θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα  $T_w(x,t)$ .

Ο χαρακτηριστικός χρόνος (βλ. παράρτημα Α) για τη θερμοκρασία του τοιχώματος  $T_w(x,t)$  είναι ίσος με το χαρακτηριστικό χρόνο για τις ασταθείς θερμοκρασιακές μεταβολές εντός του PCM (για χρόνο  $0 \leq t \leq t_m$  καθώς και  $t \geq t_m$ )



Σχήμα 4.2  
Ροή του HTF εντός σωλήνα

Σαν αποτέλεσμα το πρόβλημα της εξαναγκασμένης αγωγιμότητας της σχεδόν σταθερής τυρβώδους ροής του HTF εντός σωλήνα ανάγεται στα γνωστά (Incropera,2006) μονοδιάστατα αποτελέσματα που δίνονται παρακάτω .

Χρησιμοποιώντας γνωστή ορολογία (Incropera,2006) για εξαναγκασμένη αγωγιμότητα εντός σωλήνα συμβολίζουμε τη μέση θερμοκρασία του HTF με  $T_m(x,t)$ , τον τοπικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με  $h_x$  και την τοπική ροή θερμότητας στο τοίχωμα με  $q''_w(x,t)$ . Τότε γνωστοί ορισμοί και αποτελέσματα είναι:

- Η ροή θερμότητας στο τοίχωμα  $q''_w(x,t)$  δίνεται από τη σχέση

$$q''_w(x,t) = h_x [T_m(x,t) - T_w(x,t)]$$

- Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω ορισμό της ροής θερμότητας στο τοίχωμα και εισάγοντας την στο ενεργειακό ισοζύγιο της ροής του HTF για ένα διαφορικό μήκος  $\Delta x$  του σωλήνα (βλ.σχήμα 4.2) (Incropera,2006) μας δίνει :

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{\pi D h_x}{\dot{m} * C_p} [T_m(x,t) - T_w(x,t)]$$

Στην παραπάνω και στις επόμενες αναλύσεις της ροής του HTF οι ιδιότητες του ρευστού πυκνότητα, ειδική θερμότητα, ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα μοντελοποιούνται από τις αντιπροσωπευτικές σταθερές τιμές και συμβολίζονται με  $\rho_f$ ,  $C_{p_f}$ ,  $\mu_f$ ,  $k_f$  αντίστοιχα .

- Για το μεγαλύτερο μέρος του σωλήνα , εκτός από ένα μικρο μέρος στην αρχή συνθήκες πλήρως ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής μπορούν να υποτεθούν . Έτσι η τοπική σταθερά μεταφοράς θερμότητας  $h_x$  δίνεται από τη σχέση :

$$Nu_d \equiv \frac{h_x D}{k} = 0,023 * Re_d^{4/5} * Pr^{0.3}$$

$$\text{Όπου } Nu_d = \rho_f * \mathbf{U} * D / \mu_f \quad \text{και} \quad Pr = \mu_f * C_{p_f} / K_f$$

- Για συνθήκες αναπτυσσόμενης τυρβώδους ροής κοντά στο  $x=0$  , δίνεται από

$$\begin{aligned} Nu_D &\equiv \frac{h_x D}{k} \\ &= 0.012 * (Re_D^{0.87} - 280) * Pr^{0.3} \\ &* \left[ 1 + \left( \frac{D}{x} \right)^{2/3} \right] \end{aligned} \quad (11)$$



### 4.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ “ΠΡΟ ΤΗΞΗΣ”

Για  $0 \leq t \leq t_M$ , “προ τήξης” περίοδος, πρέπει να θεωρηθούν δυο ζώνες

1. Η ροή του HTF εντός σωλήνα.

2. Για το στερεό PCM .

το πρόβλημα της ροής του HTF είναι το ίδιο όπως αναλύθηκε στην παρ.4.2

#### 4.3.1 Ασταθής Αγωγιμότητα Για Το Στερεό PCM

Για  $0 \leq t \leq t_M$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 δεν υπάρχει λιωμένο PCM . Το πρόβλημα της ασταθούς αγωγιμότητας για το στερεό PCM με αρχικές και οριακές συνθήκες Σχηματικά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Οι ιδιότητες του στερεού PCM πυκνότητα, ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα μοντελοποιούνται από τις αντιπροσωπευτικές σταθερές τιμές και συμβολίζονται με  $\rho_2$ ,  $C_{p2}$ ,  $k_2$  αντίστοιχα .

Η διαφορική μορφή της εξίσωσης ενέργειας (Incropera, 2006) για το εσωτερικό του στερεού PCM δίνεται σε κυλινδρικές συντεταγμένες

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = \frac{\rho_2 C_{p2}}{k_2} \frac{\partial T_2}{\partial t}$$

Το πρόβλημα στο οποίο καταλήγουμε είναι παραβολικό .Όποτε οι αρχικές συνθήκες (για  $t=0$ ) μαζί με τις οριακές συνθήκες για  $r=r_1$  ,  $r=r_2$  ,  $x=0$  ,  $x=L$  είναι αρκετές για την υπολογιστική επίλυση του προβλήματος .

Οι οριακές συνθήκες είναι :

1.  $T(x, r_2, t) = T_\infty$  για  $0 \leq x \leq L$

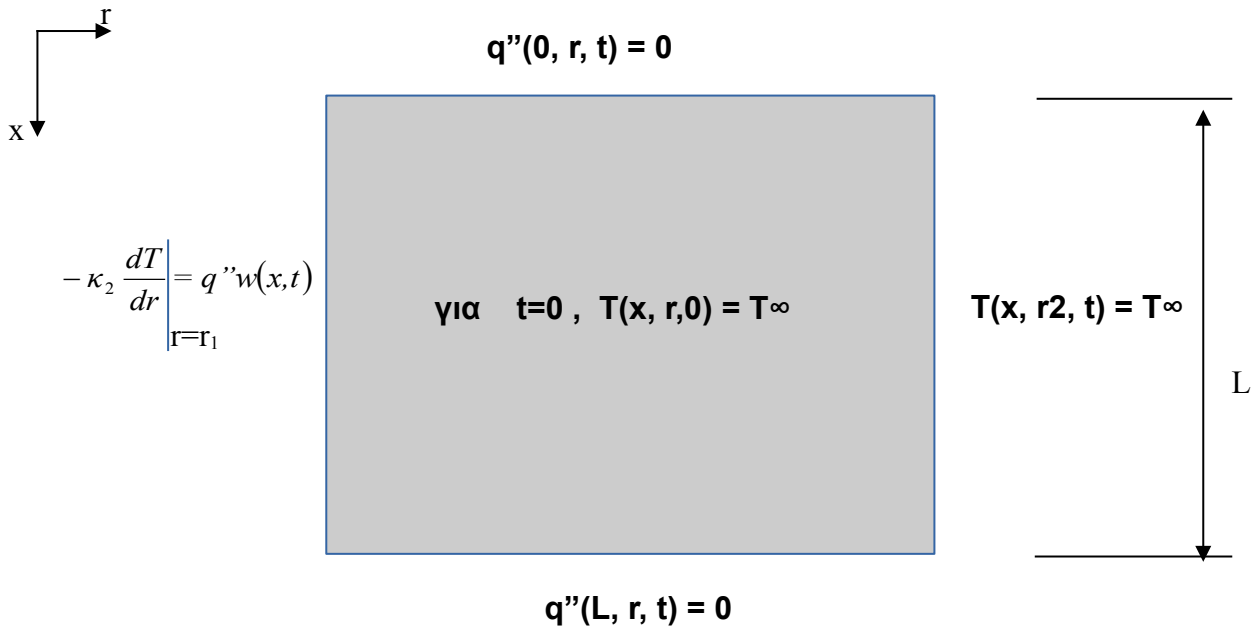
2.  $q''(0, r, t) = 0$  για  $r_1 \leq r \leq r_2$

3.  $-k_2 = q''_w(x, t)$  για  $0 \leq x \leq L$  όπου η ροή θερμότητας στο τοίχωμα  $q''_w(x, t) \equiv q''(x, r_1, t)$

4.  $q''(L, r, t) = 0$  για  $r_1 \leq r \leq r_2$

Η αρχική συνθήκη είναι  $T(r, x, t) = T_\infty$  για όλα τα  $x$  και τα  $r$  μέσα στο στερεό PCM.

Κατόπιν κατάλληλης διακριτοποίησης των χρονικών και χωρικών πεδίων το ανωτέρω πρόβλημα επιλύεται υπολογιστικά με το COMSOL. Η λύση οδηγείται με όμοια χρονικά βήματα  $\Delta t$  . Έτσι οι λύσεις είναι διαθέσιμες σε ξεχωριστές χρονικές τιμές  $t=n \cdot \Delta t$  , όπου  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\Delta t \equiv 0.025 \Delta t_{c1}$  , όπου  $\Delta t_{c1} = (r_2 - r_1)^2 / \alpha_2$  είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος για ασταθή αγωγιμότητα για το στερεό PCM.



Σχήμα 4.3  
Αρχικές και οριακές συνθήκες για το στερεό PCM

#### 4.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ “ΤΗΞΗΣ”

Κατά τη διάρκεια τήξης  $t \geq t_M + \epsilon$  τρία χωρικά πεδία είναι παρόν, η ροή του HTF εντός σωλήνα, το λιωμένο PCM και το στερεό PCM. Αφού το πρόβλημα της ροής του HTF έχει ήδη περιγράψει στη παρ.4.2 στη συνέχεια θα περιγραφούν οι εξισώσεις ορισμού για το λιωμένο PCM και το στερεό PCM.

##### 4.4.1 Ασταθής Αγωγιμότητα Για Το Λιωμένο PCM

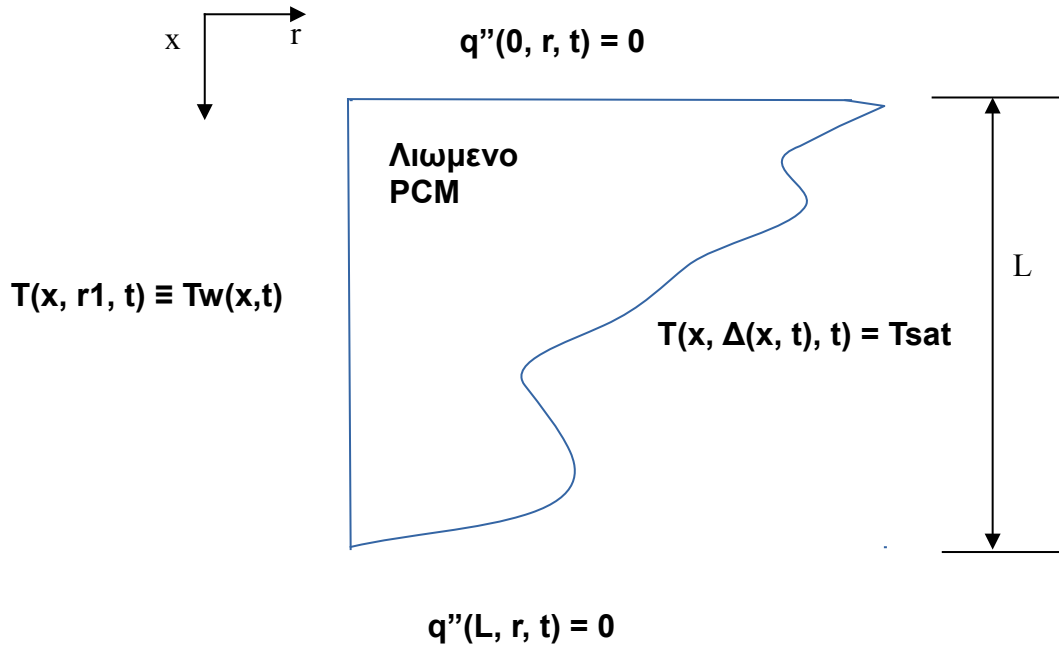
Παρότι μια καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος του σχεδόν λιμνάζοντος λιωμένου PCM θα λάμβανε υπόψη και τη συναγωγή, εδώ η συναγωγή θεωρείται αμελητέα καθώς ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η ασταθής αγωγιμότητα. Έτσι το πρόβλημα ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho_1 * C_{p1}}{k_1} \frac{\partial T}{\partial t}$$

(Εξίσωση ενέργειας σε κυλινδρικές συντεταγμένες)

Οι οριακές συνθήκες που φαίνονται στο σχήμα 4.4 είναι :

1.  $T(x, r_1, t) \equiv T_w(x,t)$  για  $0 \leq x \leq L$  όπου η θερμοκρασία στο τοίχωμα  $T_w(x,t)$



Σχήμα 4.4  
Αρχικές και οριακές συνθήκες για το τηγμένο PCM

2.  $T(\Delta, x, t) = T_{sat}$  για  $0 \leq x \leq L$

3.  $q''(0, r, t) = 0$  για  $r_1 \leq r \leq \Delta(x,t)$

4.  $q''(L, r, t) = 0$  για  $r_1 \leq r \leq \Delta(x,t)$

Αρχική συνθήκη :  $T_{initial} = T(r, x, t=0) = f_1(r,x)$  γνωστά

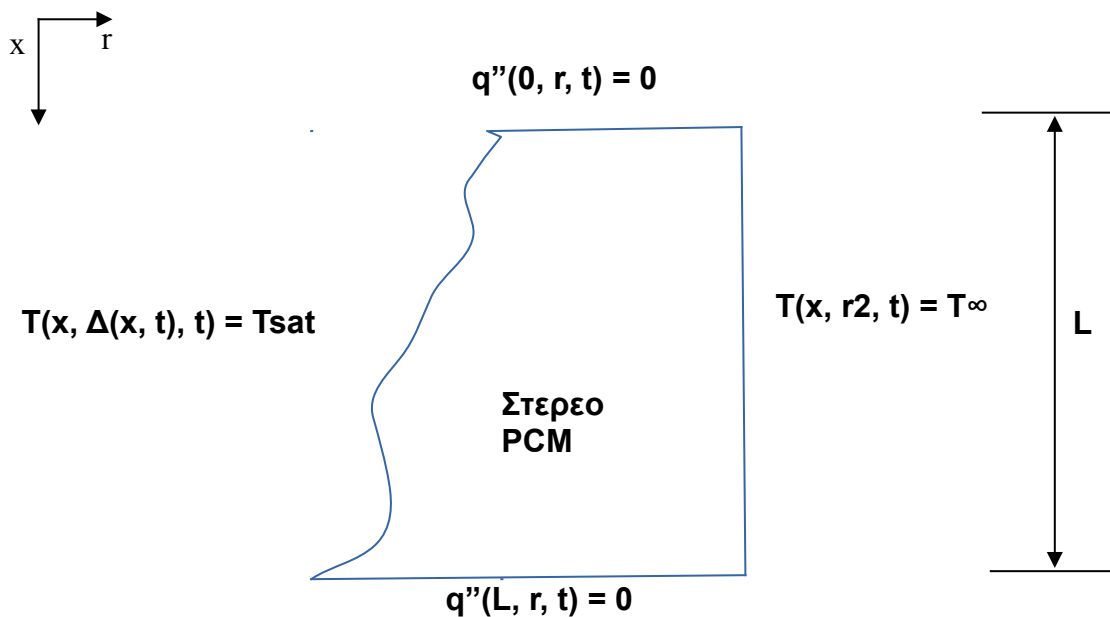
Το ανωτέρω πρόβλημα επιλύεται υπολογιστικά με το COMSOL . Η λύση οδηγείται με όμοια χρονικά βήματα  $\Delta t$  . Έτσι οι λύσεις είναι διαθέσιμες σε ξεχωριστές χρονικές τιμές  $t=n \cdot \Delta t$  , όπου  $n = 1,2,3,\dots$ ,  $\Delta t \equiv 0.0125 \Delta t_{c1}$  , όπου  $\Delta t_{c1} = (r_2 - r_1)^2 / \alpha_2$  είναι ο,  $\Delta t \equiv 0.025 \Delta t_{c1}$ , όπου  $\Delta t_{c1} = (r_2 - r_1)^2 / \alpha_2$  είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος για ασταθή αγωγιμότητα για το στερεό PCM.

#### 4.4.2 Ασταθής Αγωγιμότητα Για Το Στερεό PCM Στην Άλλη Πλευρά Του Μετώπου Τήξης

Για  $t \geq t_M$  το πρόβλημα της επίλυσης για το στερεό PCM στην άλλη πλευρά του μετώπου τήξης είναι παρόμοιο με αυτό που περιγράφηκε για την διάρκεια “προ τήξης”. Η κύρια διάφορα είναι ότι το αριστερό σύνορο για  $r = r_1$  αντικαθίσταται από το άγνωστης θέσης μέτωπο τήξης  $r = \Delta(x,t)$  όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Ο ορισμός και η διαδικασία επικαιροποίησης για την άγνωστη θέση του μετώπου τήξης  $\Delta(x,t)$  θα αναλυθεί παρακάτω. Επίσης η μεταβατική αγωγιμότητα για το στερεό PCM κατά την τήξη ορίζεται από την ίδια εξίσωση όπως η μεταβατική αγωγιμότητα για το στερεό PCM “προ τήξης” δηλαδή:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho_2 * C_{p2}}{k_2} \frac{\partial T}{\partial t}$$

(Εξίσωση ενέργειας σε κυλινδρικές συντεταγμένες)



Σχήμα 4.5  
Αρχικές και οριακές συνθήκες για το στερεό PCM

Οι οριακές συνθήκες :

1.  $T(x, \Delta, t) = T_{sat}$  για  $0 \leq x \leq L$
2.  $T(x, r_2, t) = T_{\infty}$  για  $0 \leq x \leq L$
3.  $q''(0, r, t) = 0$  για  $\Delta(x,t) \leq r \leq r_2$
4.  $q''(L, r, t) = 0$  για  $\Delta(x,t) \leq r \leq r_2$

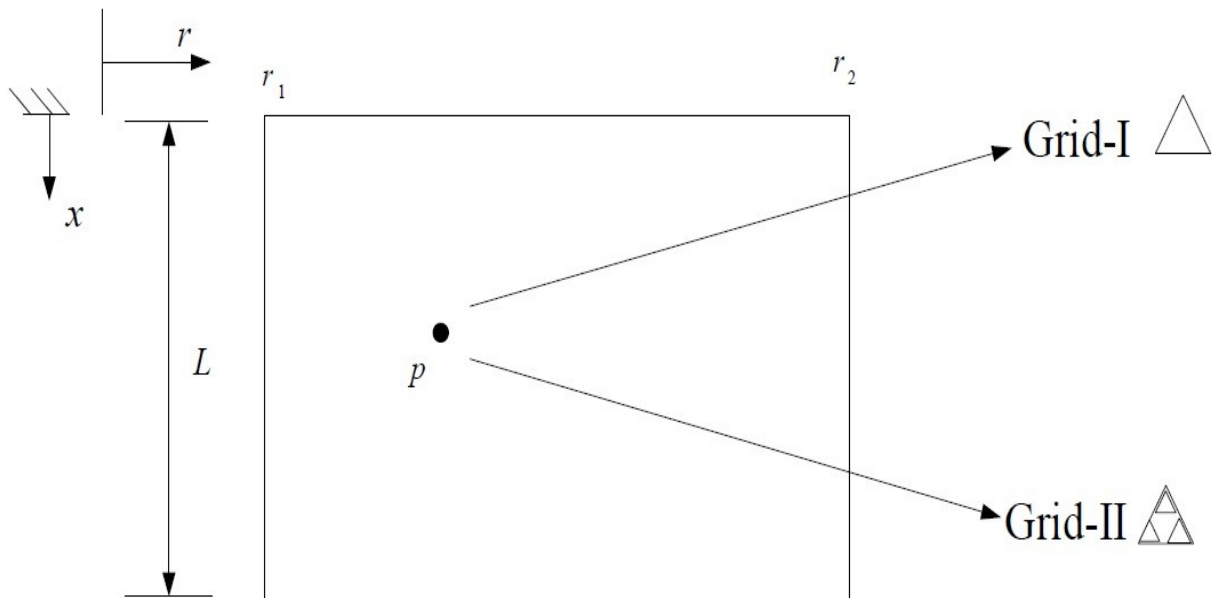
Αρχική συνθήκη :  $T_{initial} = T(r, x, t=0) = f_1(r,x)$  γνωστά

## 5. ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

### 5.1 Ανεξαρτησία Πλέγματος Για Την Ασταθή Λύση

Οι πιο πάνω υπολογιστικές προσεγγίσεις εφαρμόστηκαν με το COMSOL για δυο διαφορετικές ρυθμίσεις χωρικού πλέγματος σχετιζόμενες με το χρονικό διάστημα 'προ τήξης' και τήξης. Οι διαφορετικές ρυθμίσεις χωρικού πλέγματος σχηματικά απεικονίζονται σε ένα αντιπροσωπευτικό σημείο ( $x=L/2, r=0.2$ ) και αντιπροσωπευτικό χρόνο (σχήμα 6.1) Επίσης η λύση για το πλέγμα I προχώρησε στο χρόνο με βήμα  $\Delta t = \Delta t_1$  και για το πλέγμα II προχώρησε στο χρόνο με βήμα  $\Delta t = \Delta t_2 = \frac{1}{2} \Delta t_1$ . Οι συγκλίνουσες λύσεις για δεδομένο χρόνο  $t = t^*$  βρέθηκαν να είναι σχεδόν ίδιες και κατά συνέπεια οι ασταθείς λύσεις θεωρούνται ανεξάρτητες πλέγματος. Οι λύσεις ελέγχθηκαν για ανεξαρτησία πλέγματος σε διάφορα σημεία στο τηγμένο PCM και στέρεο PCM.

Για συντομία δείχνουμε μόνο τα αποτελέσματα στο σχήμα 5.1 για υπολογιζόμενη μεταβλητή  $\Delta(x,t)$  σαν συνάρτηση του  $x$  μια για το πλέγμα I και  $\Delta t = \Delta t_1$  και μια για το πλέγμα II  $\Delta t = \Delta t_2$ . Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ότι για  $t=350s$  και  $t=700s$  οι δυο λύσεις είναι ανεξάρτητες μεγέθους πλέγματος.



Σχήμα 5.1  
Σχηματική παρουσίαση του πλέγματος

## 6. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

### 6.1 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Τη Λειτουργία Του Συστήματος

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που καθορίζουν το σχεδιασμό της δεξαμενής και την επιλογή υλικού PCM είναι η διαθέσιμη πηγή ενέργειας. Η θερμότητα της πηγής αυτής είναι που θα χρησιμοποιηθεί για να αλλάξει την κατάσταση του υλικού από στερεό σε υγρό και να αυξήσει τη θερμοκρασία του αποθηκεύοντας έτσι ενέργεια για μετέπειτα χρήση.

Όσο πιο μεγάλη είναι η ένταση της πηγής τόσο μεγαλύτερες μπορούν να είναι οι διαστάσεις της δεξαμενής και πιο αποδοτικό (μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα) το PCM.

Η ενέργεια που μας παρέχεται από τον Ήλιο έχει περιορισμένη χρονική διάρκεια εντός του 24ωρου πράγμα που σημαίνει ότι για να έχουμε καλή απόδοση του συστήματος πρέπει να επιτύχουμε την τήξη όλου του υλικού PCM χρησιμοποιώντας το πλεόνασμα θερμικής ενέργειας που θα έχουμε κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ηλιοφάνειας .

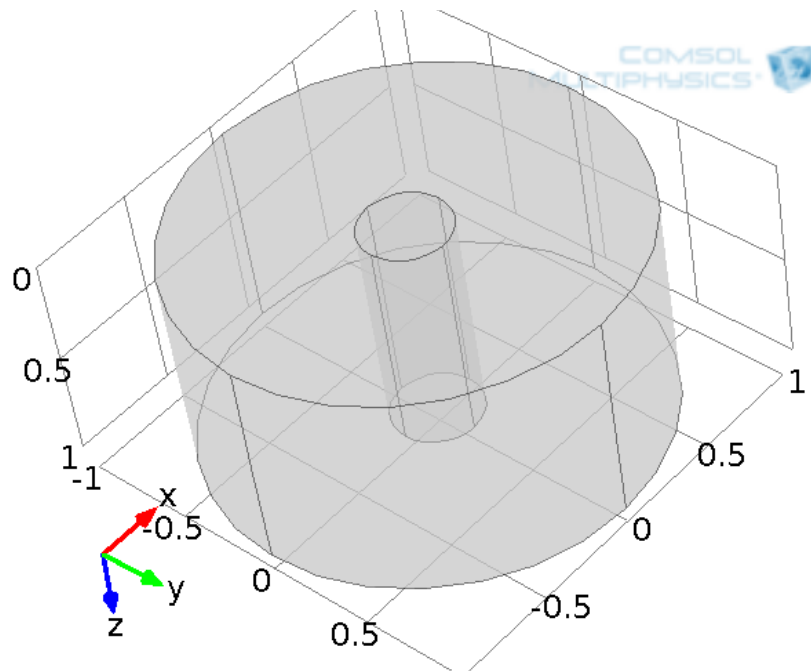
### 6.2 Χρόνοι Που Επηρεάζουν Τη Λειτουργία Του Συστήματος

Κατά τη λειτουργία της δεξαμενής οι χρόνοι που μας ενδιαφέρουν είναι η έναρξη της φόρτισης, όταν το θερμό ρευστό αρχίζει να δίνει αισθητή θερμότητα στο υλικό η ενδιάμεση φάση στην οποία συνυπάρχει υγρό με στερεό pcm και η δεξαμενή φορτίζεται με αισθητό και λανθάνον φορτίο .

Τέλος αφού τηχθει όλο το υλικό και ανεβεί η θερμοκρασία του στη θερμοκρασία του HTF (ιδανική κατάσταση) θεωρούμε ότι έχει έρθει το τέλος της φόρτισης . Στην κατάσταση αυτή η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σταθερή και η δεξαμενή δεν μπορεί να απορροφήσει παραπάνω ενέργεια. Η θερμοκρασία του HTF παραμένει σταθερή κατά την είσοδο και την έξοδο από τη δεξαμενή .

### 6.3 Γεωμετρίες Που Θα Χρησιμοποιηθούν

#### Διάταξη Δεξαμενής με κεντρικό σωλήνα HTF

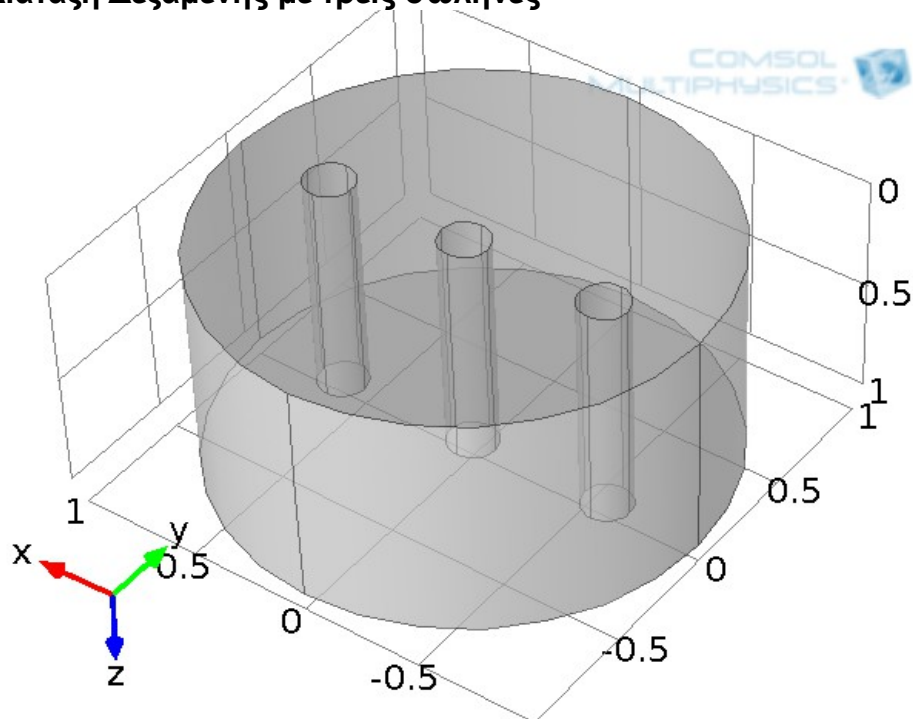


Σχήμα 6.3.1  
Διάταξη Δεξαμενής με κεντρικό σωλήνα HTF

Πάνω στη γεωμετρία της βασικής δεξαμενής μπορούμε να αλλάξουμε παραμέτρους και να δούμε πως αυτές επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

Ένας από τους πιο αποδοτικούς και αποτελεσματικούς τρόπους για να επιταχύνουμε τη μεταφορά θερμότητας και την τήξη του υλικού αλλαγής φάσης είναι να αυξήσουμε τον αριθμό των σωλήνων μεταφοράς θερμότητας που διατρέχουν το υλικό. Στον πρώτο τύπο δεξαμενής έχουμε μόνο ένα κεντρικά τοποθετημένο αγωγό.

### Διάταξη Δεξαμενής με τρεις σωλήνες

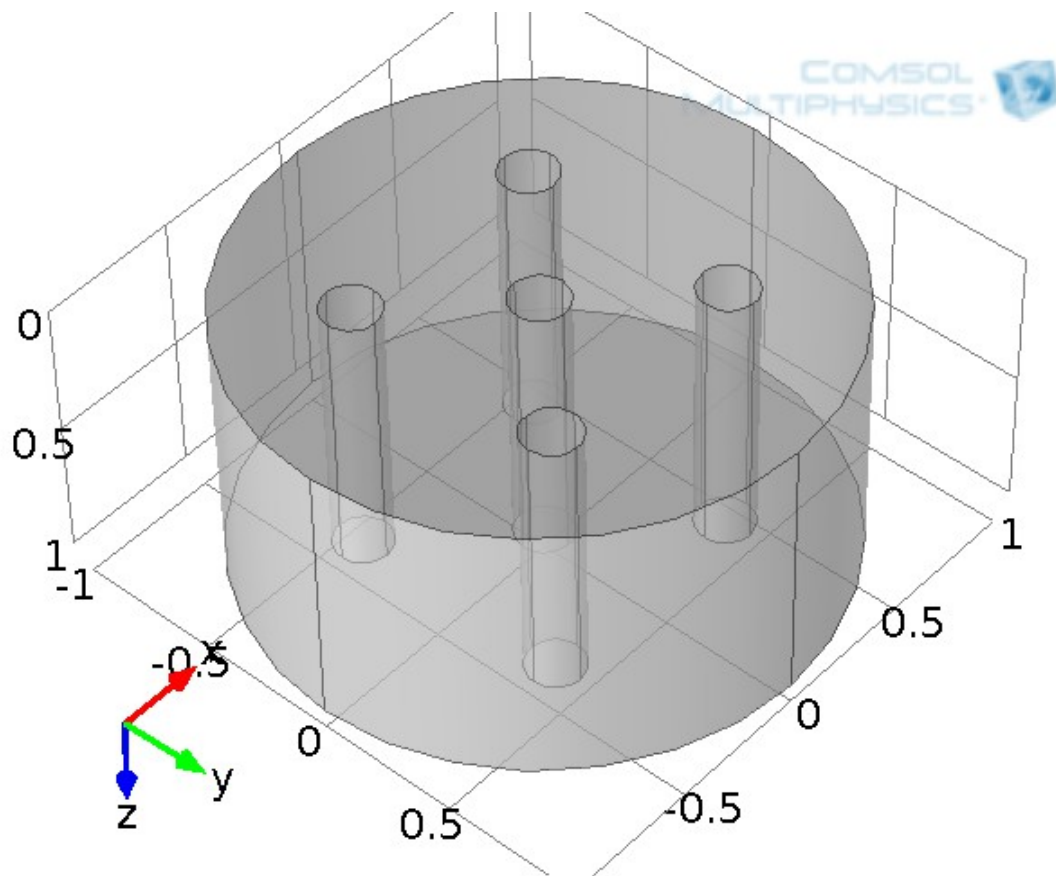


Σχήμα 6.3.2  
Διάταξη Δεξαμενής με τρεις σωλήνες HTF

Στον δεύτερο τύπο δεξαμενής έχουμε κυλινδρική δεξαμενή με τρεις σωλήνες HTF. Στην περίπτωση αυτή περιμένουμε ταχύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και θερμική φόρτιση της δεξαμενής σε λιγότερο χρόνο, λόγω δημιουργίας ζώνης τηγμένου PCM γύρω από κάθε σωλήνα και μεταφορά θερμότητας με συναγωγή με πολύ πιο έντονο ρυθμό.



## Διάταξη Δεξαμενής με πέντε σωλήνες HTF



Σχήμα 6.3.3  
Διάταξη Δεξαμενής με πέντε σωλήνες HTF

Στον τρίτο τύπο δεξαμενής έχουμε κυλινδρική δεξαμενή με πέντε σωλήνες HTF. Στην περίπτωση αυτή περιμένουμε ακόμα ταχύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και θερμική φόρτιση της δεξαμενής σε λιγότερο χρόνο, λόγω δημιουργίας ζώνης τηγμένου PCM γύρω από κάθε σωλήνα και μεταφορά θερμότητας με συναγωγή με πολύ πιο έντονο ρυθμό.

## 7. COMSOL

### 7.1 Εισαγωγή Στο Λογισμικό COMSOL Multiphysics

Το λογισμικό COMSOL Multiphysics προσφέρει στο μηχανικό τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων και αλληλεπιδραστικών φυσικών φαινομένων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αποτελεί εξαιρετική πλατφόρμα μοντελοποίησης και σχεδιασμού σε πληθώρα εφαρμογών όπως αλληλεπίδραση διαφορετικών ρευσμάτων ρευστών, μελέτη φορτίων σε διάφορα υλικά υπό συνδυασμένη μηχανική και θερμική καταπόνηση, μετάδοση ακτινοβολίας και ηχητικών κυμάτων μέσα από διαφορετικά υλικά και σύνθετες γεωμετρίες. Επιτρέπει επίσης τη μελέτη φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε ψήκτρες, εναλλάκτες θερμότητας καθώς και κάθε μοντελοποίηση σε συζυγή προβλήματα μεταφοράς θερμότητας.

Κύριο χαρακτηριστικό του λογισμικού COMSOL είναι η δυνατότητα για συνδυαστική μελέτη διαφορετικών φυσικών φαινομένων (Multiphysics) σε κοινή πλατφόρμα και σε χώρο 3D,2D,1D ταυτοχρόνως. Η δυνατότητα μοντελοποίησης διαφόρων φυσικών φαινομένων οφείλεται στη δυνατότητα προσθήκης και χρήσης εξειδικευμένων εργαλείων με τη μορφή modules τα οποία επεκτείνουν τον κεντρικό πυρήνα του προγράμματος ο οποίος καλύπτει τομείς, όπως δομική ανάλυση, γραμμική ροή ρευστών, ακουστική, διάχυση διαλυμάτων, ηλεκτροστατική, ηλ. ρεύματα κ.α.

Ενδεικτικά τέτοια εργαλεία αφορούν τομείς όπως:

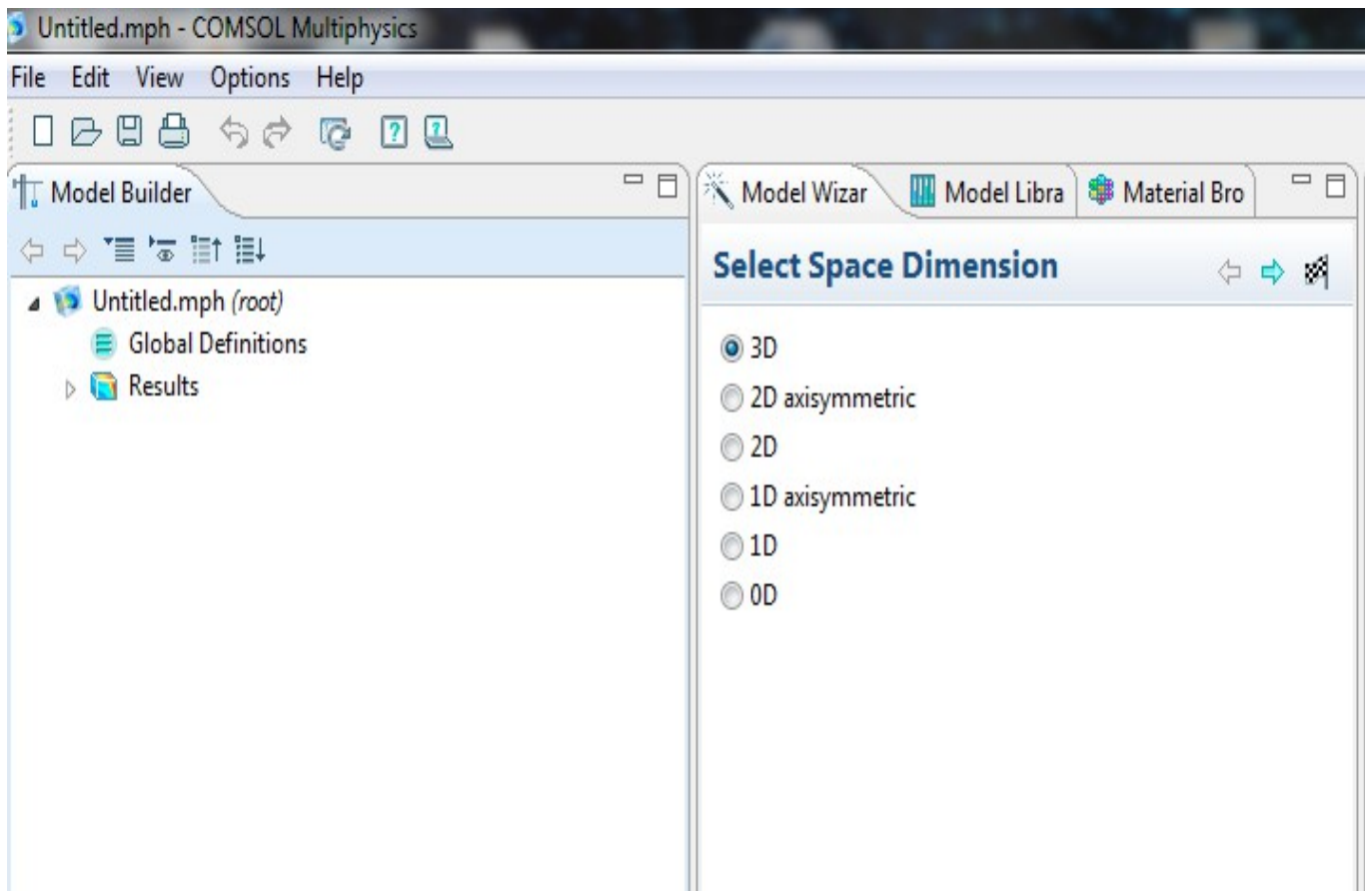
- CFD Module : για μοντελοποίηση συστημάτων με σύνθετη ροή ρευστών .
- AC/DC Module : για τη μοντελοποίηση πυκνωτών ,ημιαγωγών, πηνίων μονωτών καθώς και αισθητήρων.
- RF Module : για τη μοντελοποίηση μικροκυμάτων και ραδιοκυμάτων με χρήση στο σχεδιασμό κυκλωμάτων, κεραίων, φίλτρων, και πομπών.
- Fatigue Module : Για την προσομοίωση υλικών που υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική ή εναλλασσόμενη φόρτιση και καταρρέουν με φορτίο μικρότερο του επιτρεπόμενου στατικού φορτίου.
- Acoustics Module : Για τη μελέτη και προσομοίωση ηχητικών κυμάτων κατά την αλληλεπίδραση ηχητικών πηγών με ήχοπετασματα και ήχοπαγίδες .
- Subsurface Flow Module : Μοντελοποίηση υπογείων ροών ,εξάπλωσης ρύπανσης στο έδαφος, ροής πετρελαίου και αερίων σε πορώδη μέσα .

## 7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ COMSOL

### 7.2.1 Διαστάσεις Προβλήματος - Γεωμετρία

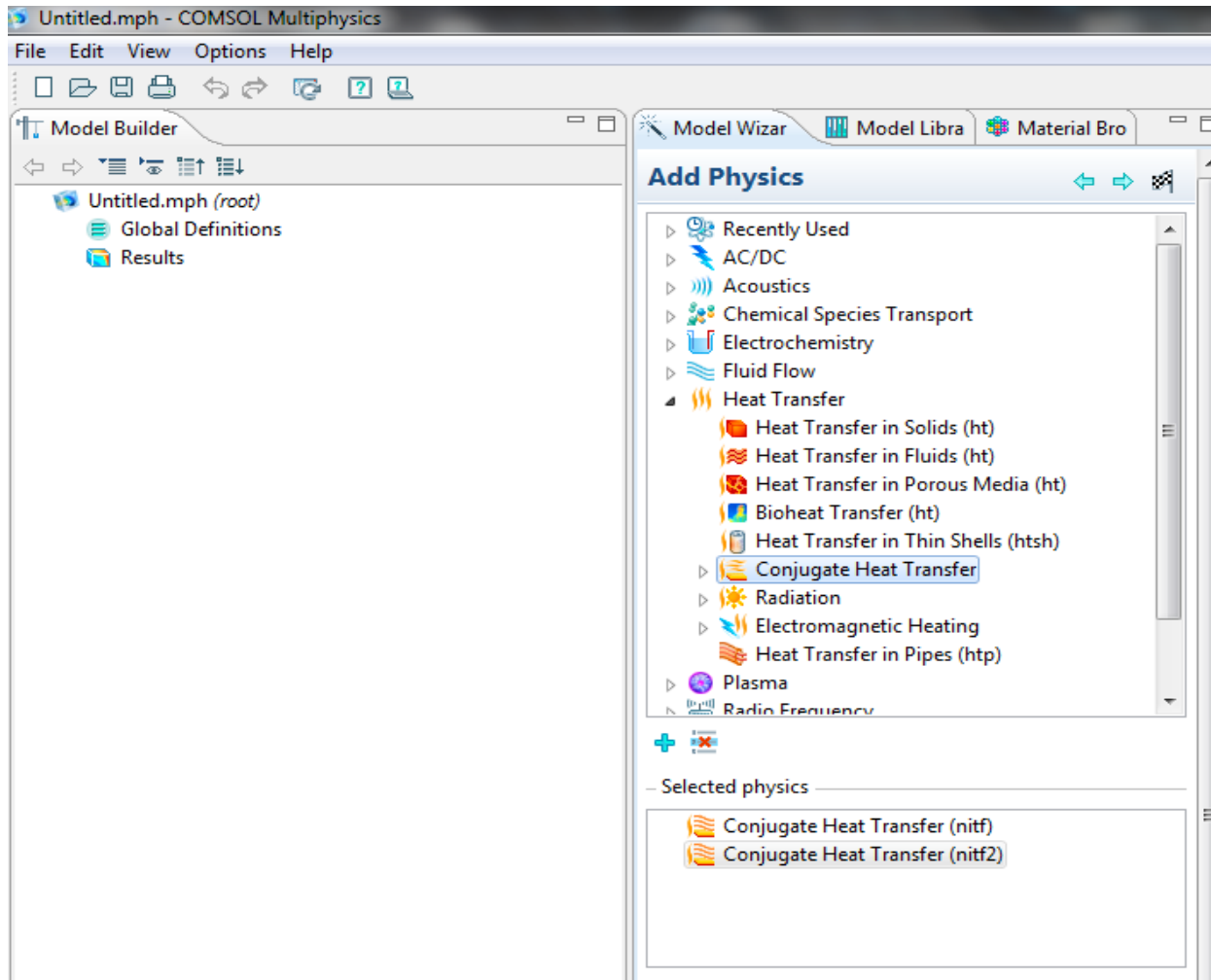
Η παρακάτω μελέτη και οι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση της εφαρμογής **COMSOL** 4.3b .

Στο αρχικό παράθυρο του **COMSOL** επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, για τη γεωμετρία επιλέγουμε στο μεσαίο παράθυρο της οθόνης τρισδιάστατη (3D) .



Σχήμα 7.1  
Επιλογή γεωμετρίας

Στη συνέχεια στην καρτέλα Add Physics δηλώνουμε ότι θα μελετήσουμε πρόβλημα συζύγους μεταφοράς θερμότητας από θερμό ρευστό σε στερεό υλικό (conjugate heat transfer).

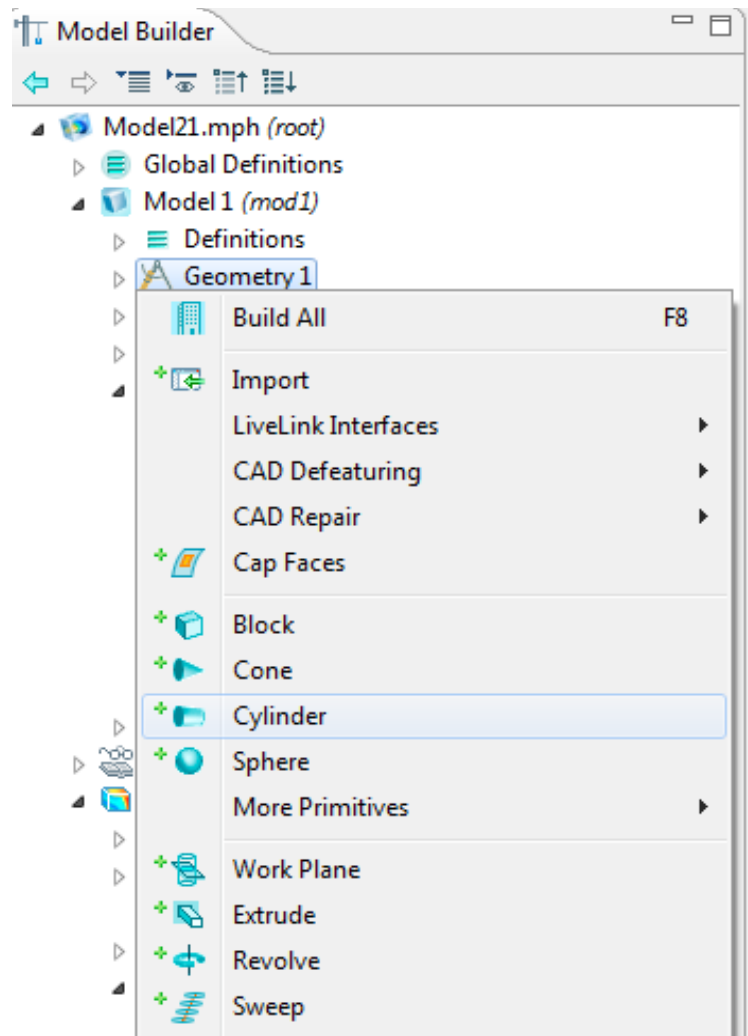


Σχήμα 7.2  
Επιλογή φυσικού φαινομένου προς μελέτη

Στη συνέχεια σχεδιάζουμε το μοντέλο επίλυσης που αποτελείται από δυο ομόκεντρα κυλινδρικά στοιχεία.

Το πρώτο κυλινδρικό στοιχείο είναι ο κύλινδρος της δεξαμενής **Αποθήκευσης Θερμότητας** (Thermal Energy Storage – TES).

Για να τον κατασκευάσουμε στο παράθυρο Model Builder αριστερά επιλέγουμε Geometry>Cylinder

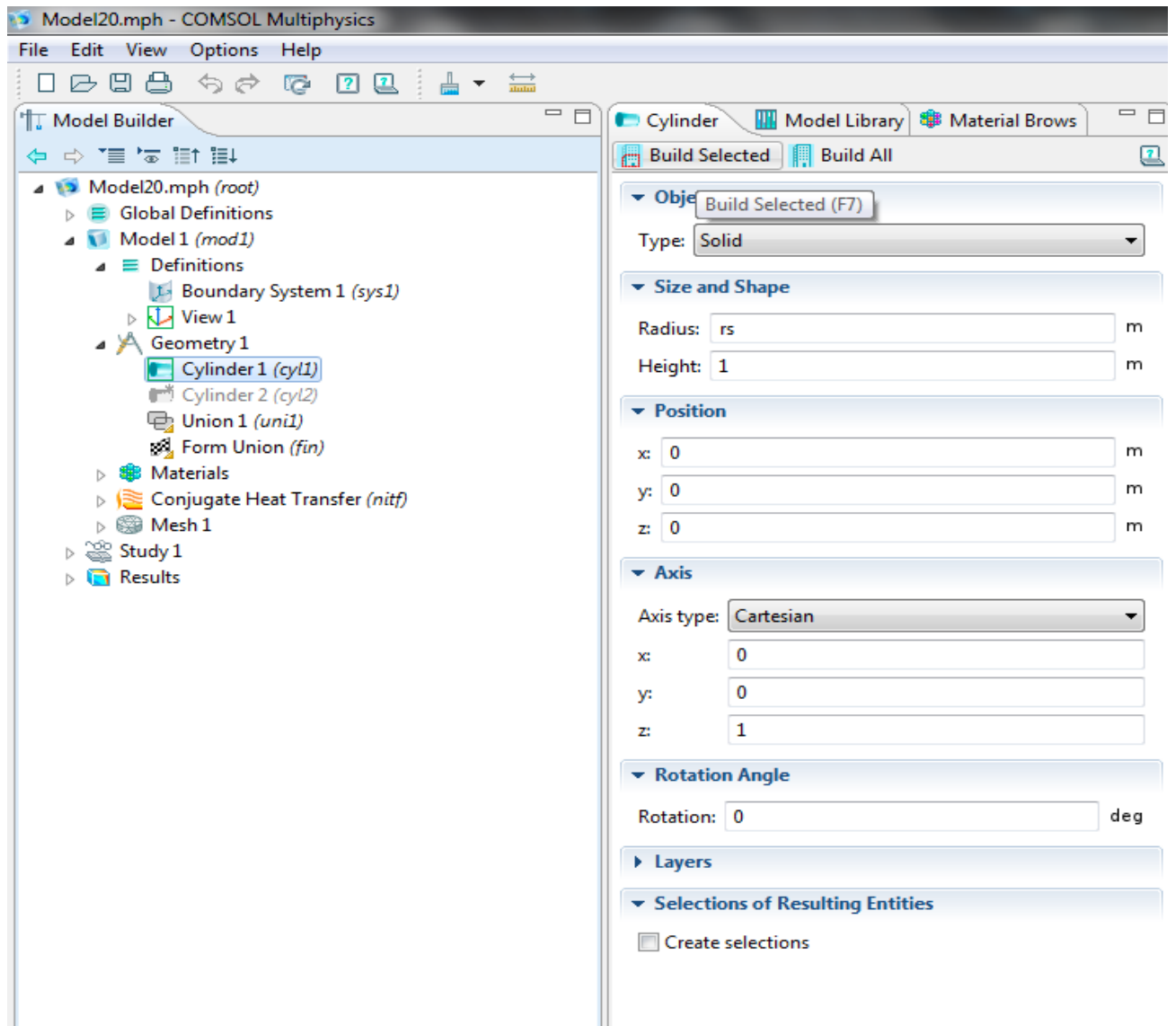


Σχήμα 7.3  
Κατασκευή κυλίνδρου υλικού PCM

Οι διαστάσεις της δεξαμενής θα είναι :

- Ακτίνα  $r_s$  m
- Ύψος 1 m

Η χρήση της μεταβλητής  $r_s$  αντί συγκεκριμένης τιμής είναι κάτι που επιτρέπεται από το πρόγραμμα και δίνει τη δυνατότητα παραμετροποίησης των διαστάσεων και αλλαγής τους με απλή αλλαγή της τιμής της μεταβλητής στον πίνακα μεταβλητών χωρίς επανασχεδίαση της γεωμετρίας .

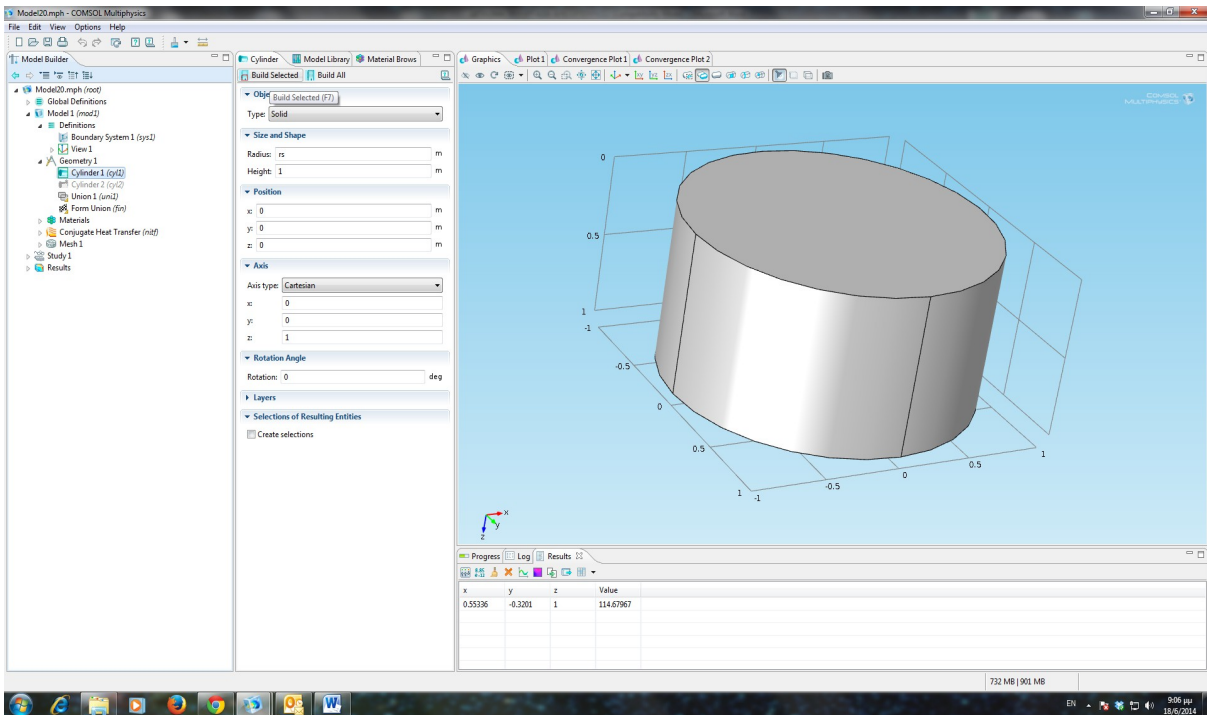


Σχήμα 7.4  
Κατασκευή κυλίνδρου υλικού PCM

Έχοντας δηλώσει τις διαστάσεις και τη γεωμετρία επιλέγουμε :

- Build Selected

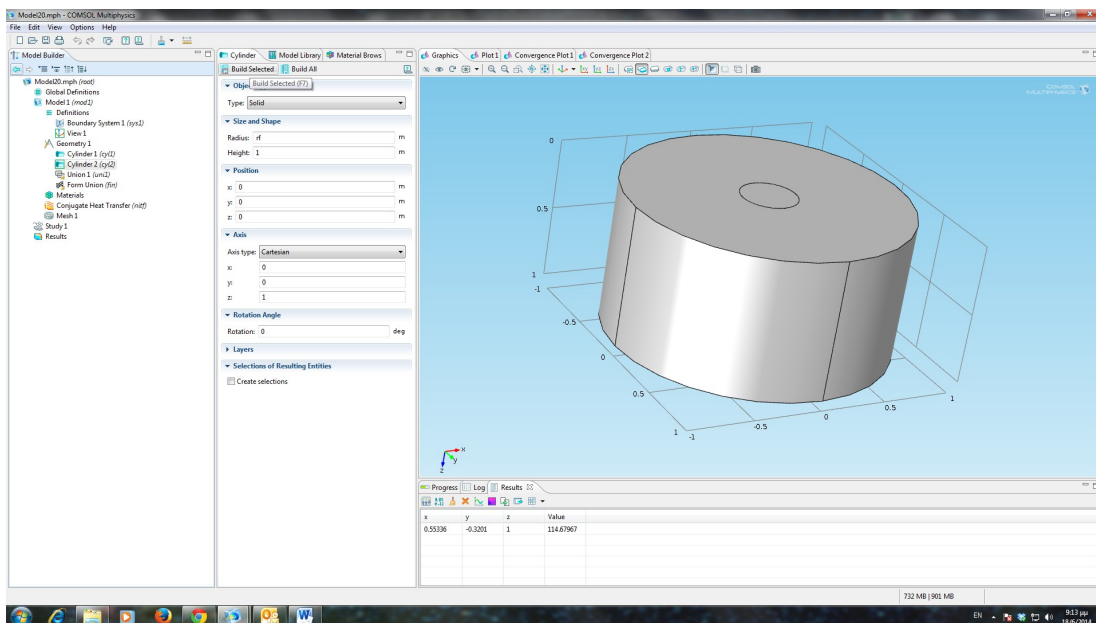
Όστε να δημιουργηθεί ο κύλινδρος στο Model space .



Σχήμα 7.5  
Εμφάνιση κυλινδρικής δεξαμενής PCM

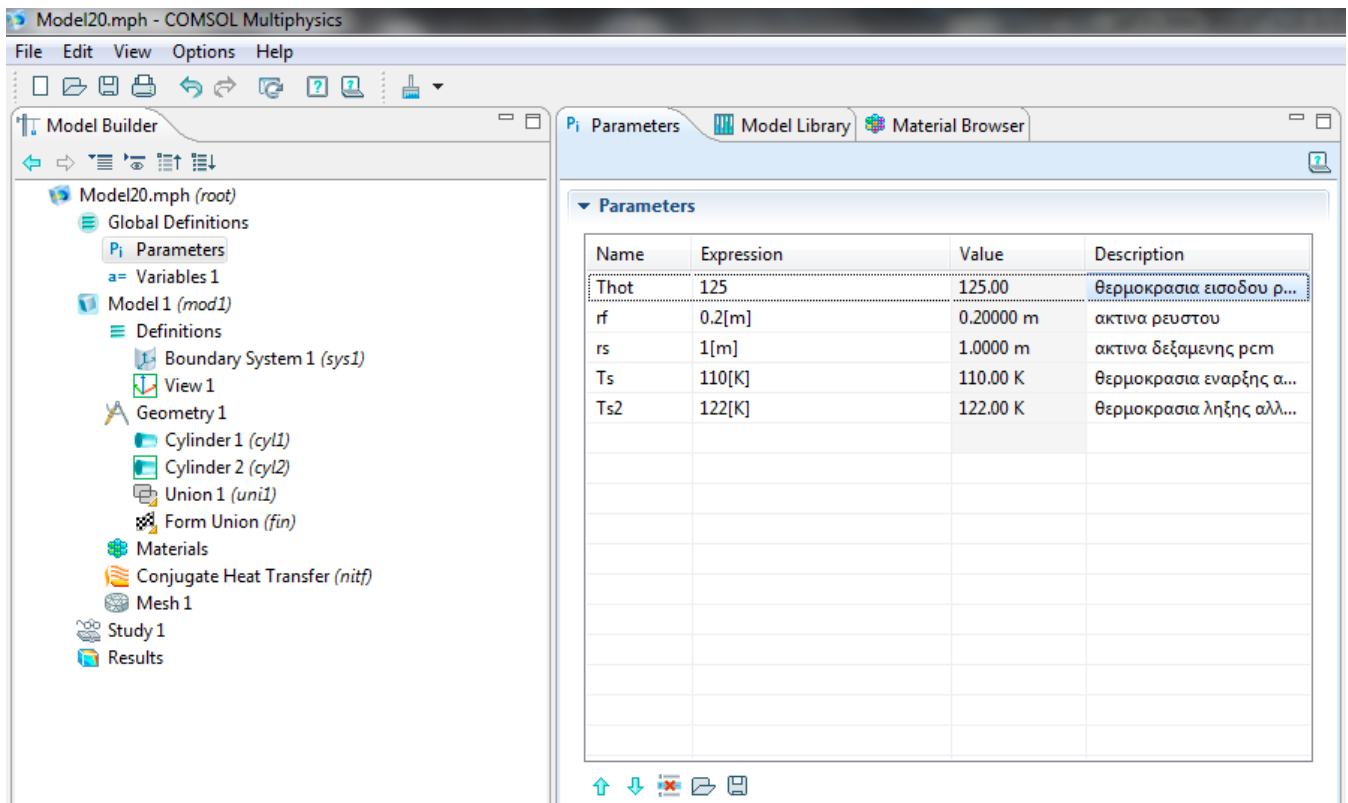
Επίσης στο στάδιο αυτό σχεδιάζουμε τον κύλινδρο του σωλήνα μεταφοράς του θερμού ρευστού με διαστάσεις :

- Ακτίνα 0,2 m
- Ύψος 1 m



Σχήμα 7.6  
Εμφάνιση κυλινδρικής δεξαμενής PCM και Σωλήνα HTF

Όλες τις παραπάνω διαστάσεις τις εισάγουμε με τη μορφή παραμέτρων, για να έχουμε ένα μοντέλο παραμετροποιήσιμο προς τα μεγέθη αυτά.  
Αυτό γίνεται στο παράθυρο parameters σύμφωνα με το σχήμα :



Σχήμα 7.7  
Πινάκας δήλωσης παραμέτρων

Επίσης εισάγουμε ως παραμέτρους :

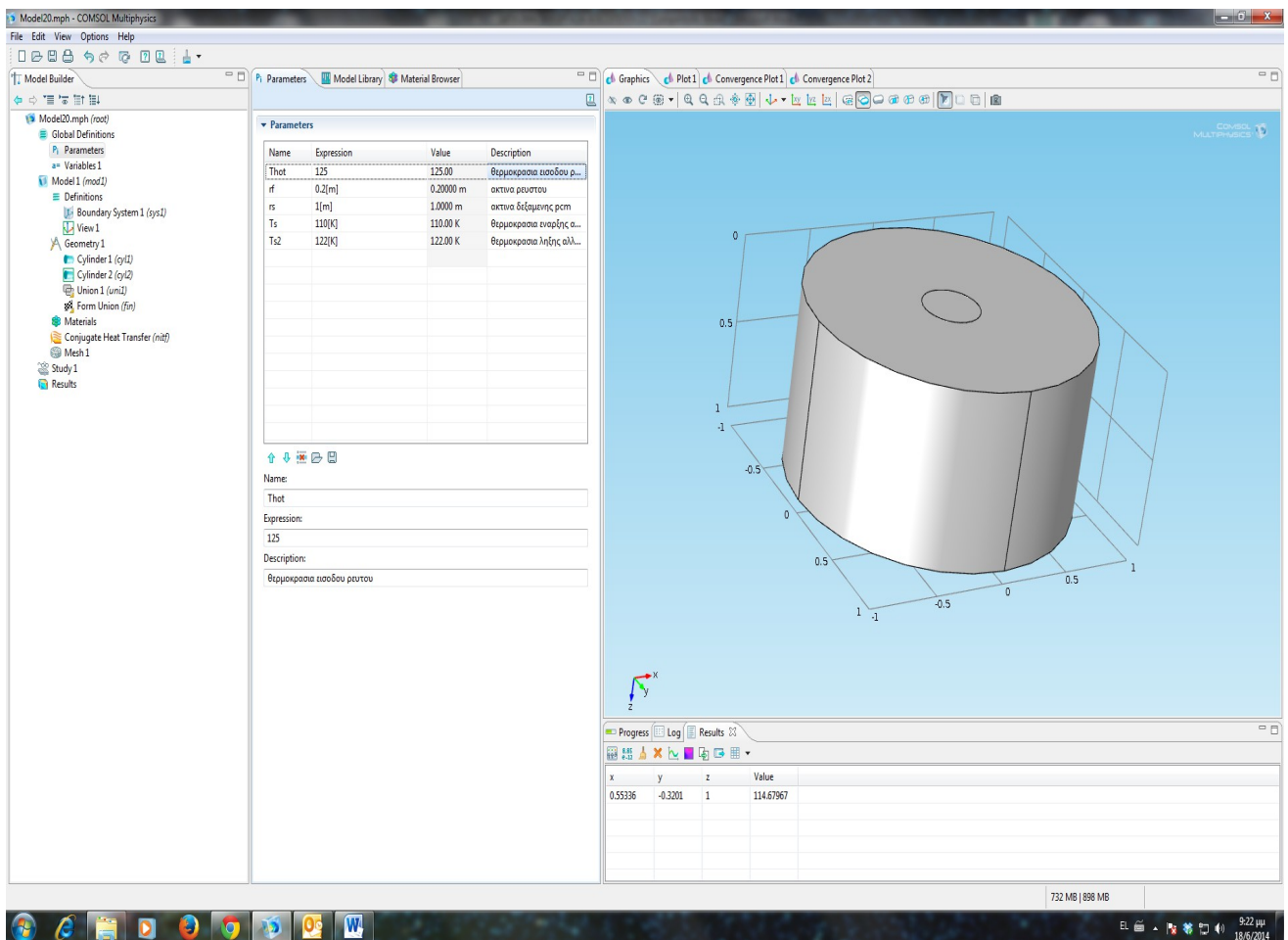
- θερμοκρασία εισόδου του ρευστού (Thot)
- θερμοκρασία έναρξης αλλαγής φάσης (Ts)
- θερμοκρασία λήξης αλλαγής φάσης (Ts2)

για να δημιουργήσουμε το μοντέλο ως σύνθεση των δυο κυλίνδρων χρησιμοποιούμε την εντολή :

Geometry>Boolean operations > Union>



Επιλέγουμε τους κυλίνδρους cyl1 και cyl2 σύμφωνα με το σχήμα



Σχήμα 7.8  
Ένωση κυλινδρικής δεξαμενής PCM και σωλήνα HTF

Δίνουμε εντολή

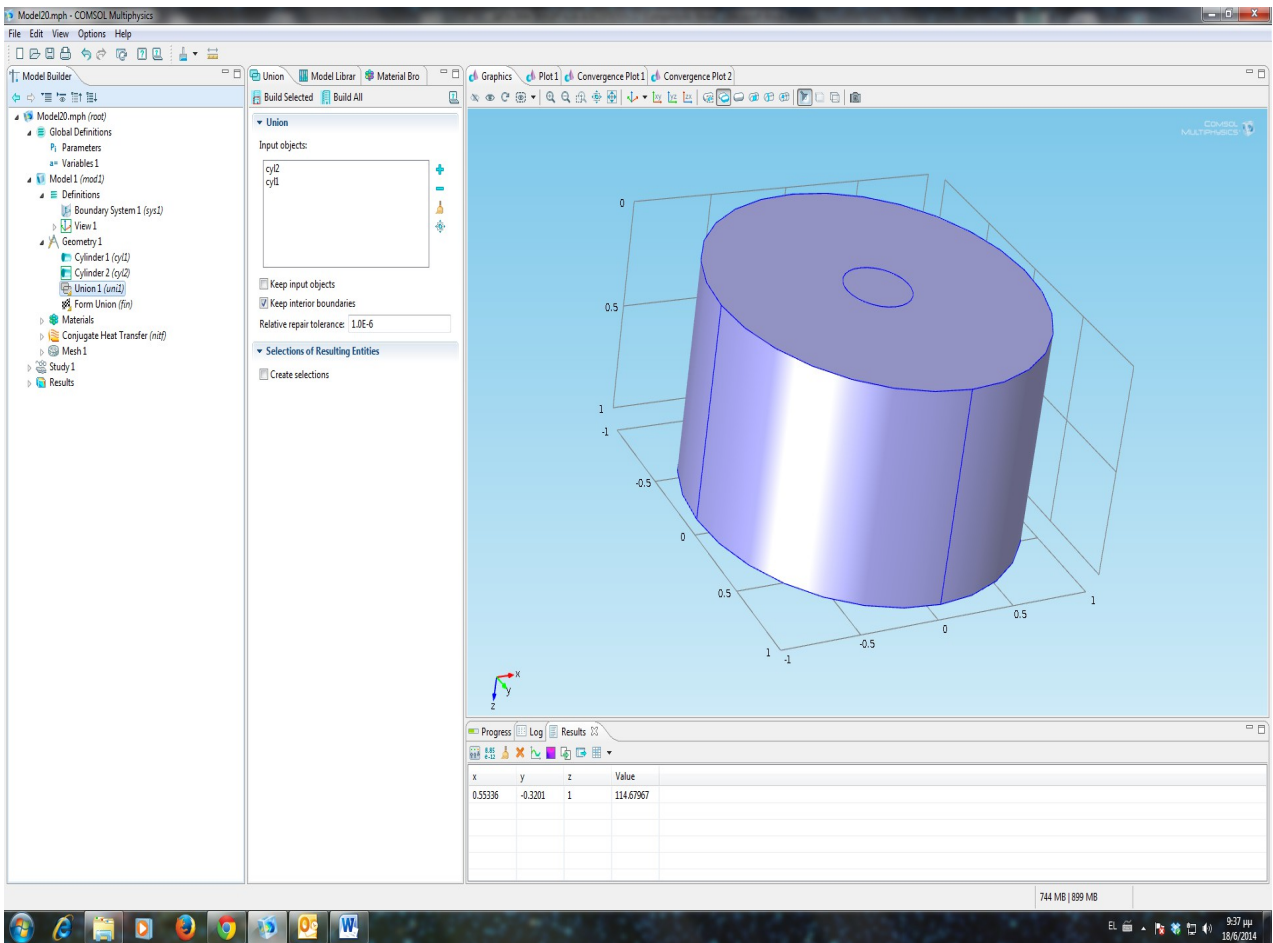
> Build all

Έχοντας κάνει την επιλογή

> keep interior boundaries

Τέλος στο παράθυρο της γεωμετρίας επιλέγουμε :

Form union > build all



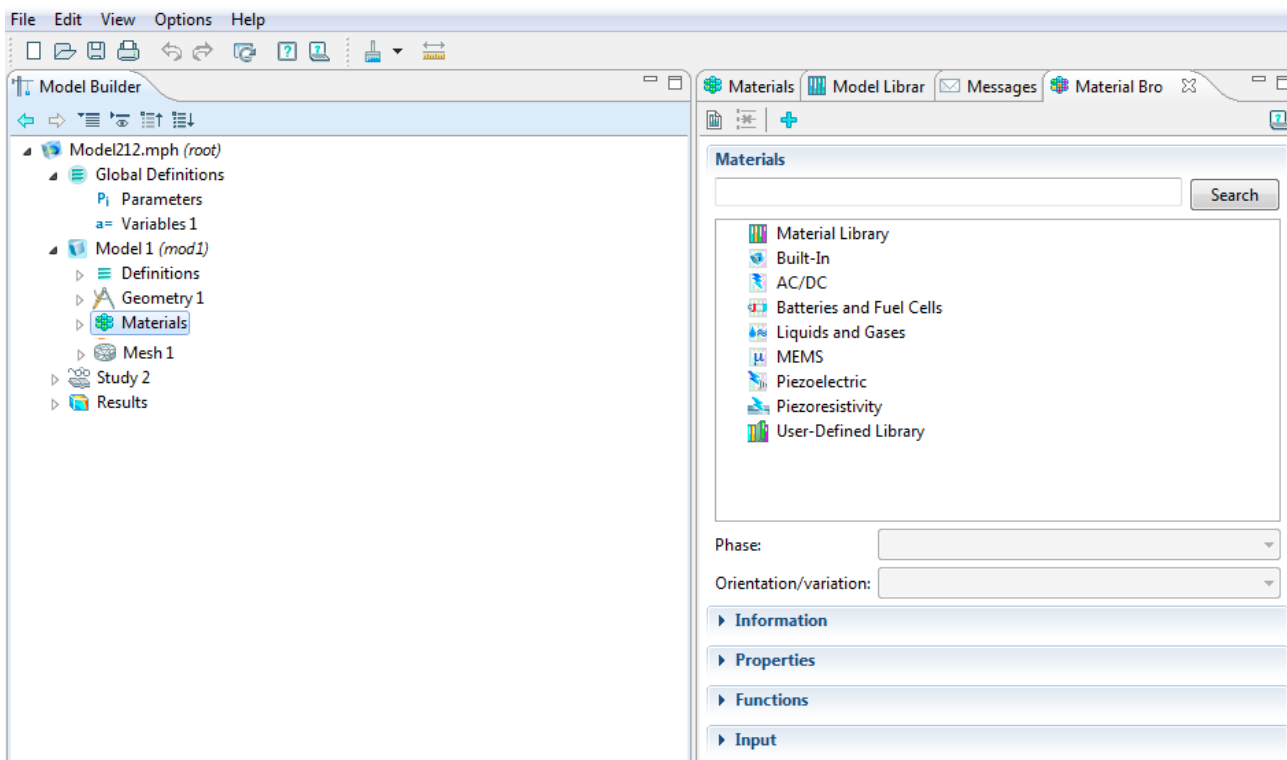
Σχήμα 7.9  
Ενωμένο μοντέλο κυλινδρικής δεξαμενής PCM και σωλήνα HTF

## 7.3 ΔΗΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

### 7.3.1 Στερεό Υλικό PCM - Δωδεκάυδρο μονόξινο φωσφορικό νάτριο Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>-12H<sub>2</sub>O

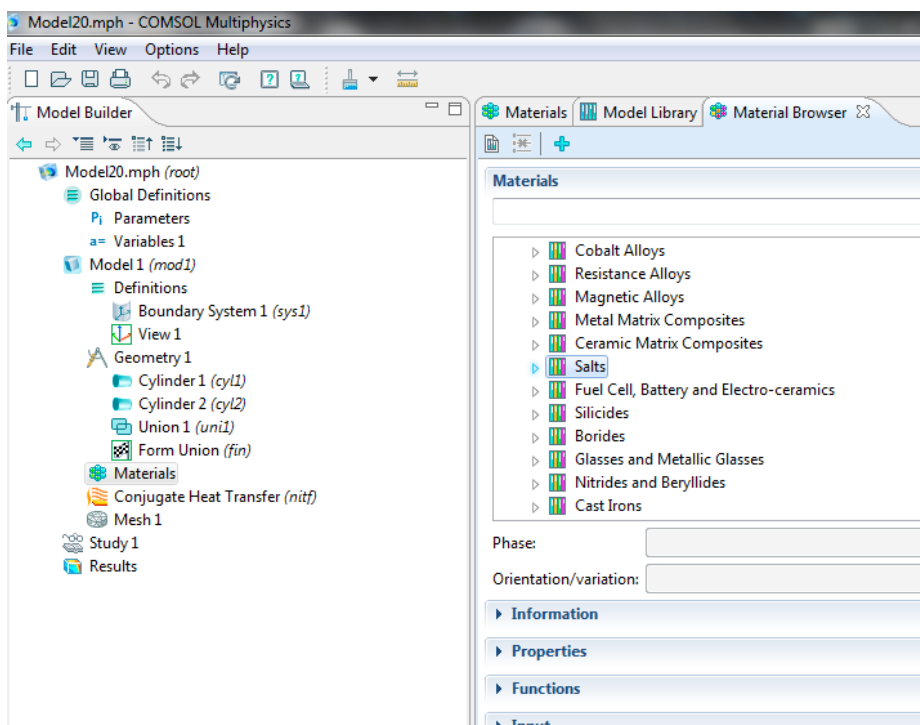
Κατόπιν ανοίγουμε την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος για να εισάγουμε στο μοντέλο τα υλικά :

- Αιθυλενογλυκόλη για HTF
- Δωδεκάυδρο μονόξινο φωσφορικό νάτριο Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>-12H<sub>2</sub>O ως υλικό pcm



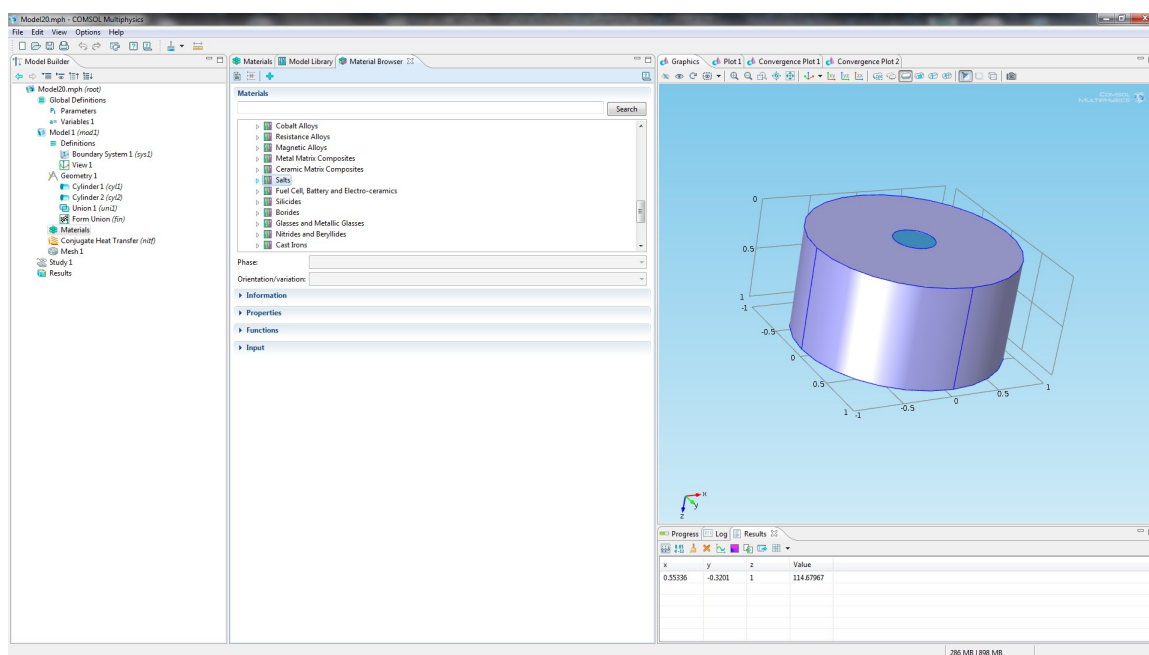
Σχήμα 7.10  
Βιβλιοθήκη υλικών

Ανοίγουμε τη λίστα των υλικών και επιλέγουμε το υπομενού > άλατα (salts)

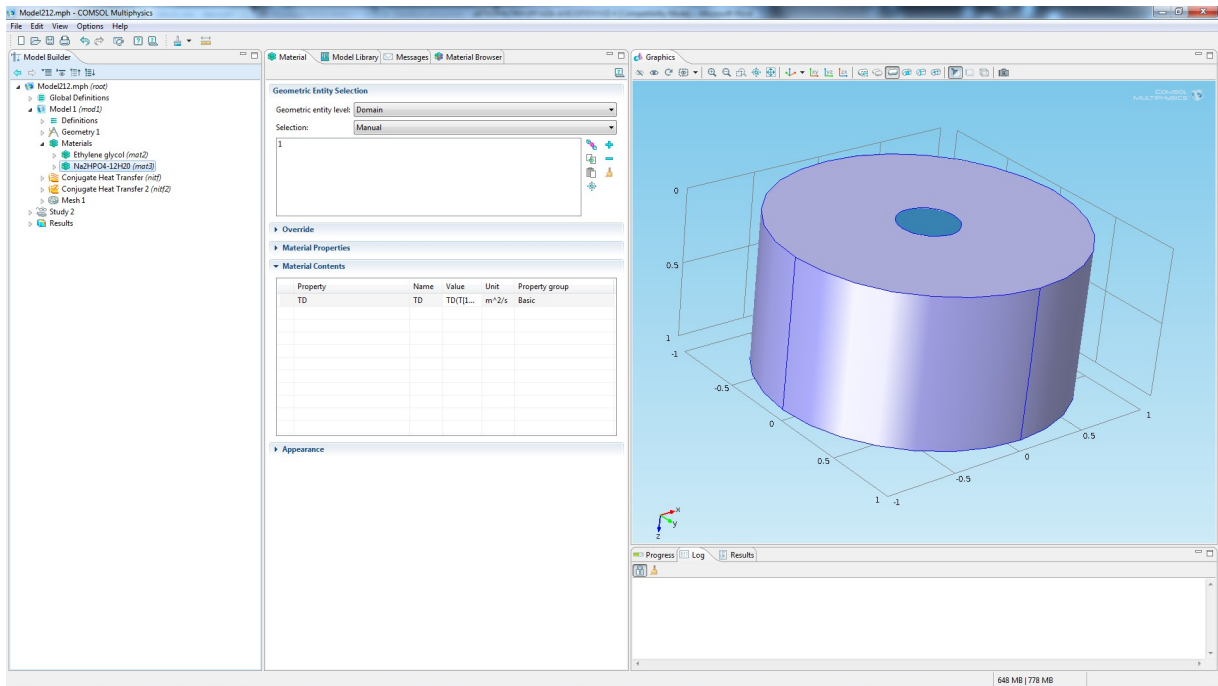


Σχήμα 7.11  
Βιβλιοθήκη υλικών - Άλατα

Από τη λίστα των αλάτων που αναπτύχθηκε επιλέγουμε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$



Σχήμα 7.12  
Βιβλιοθήκη υλικών – Λίστα Αλάτων

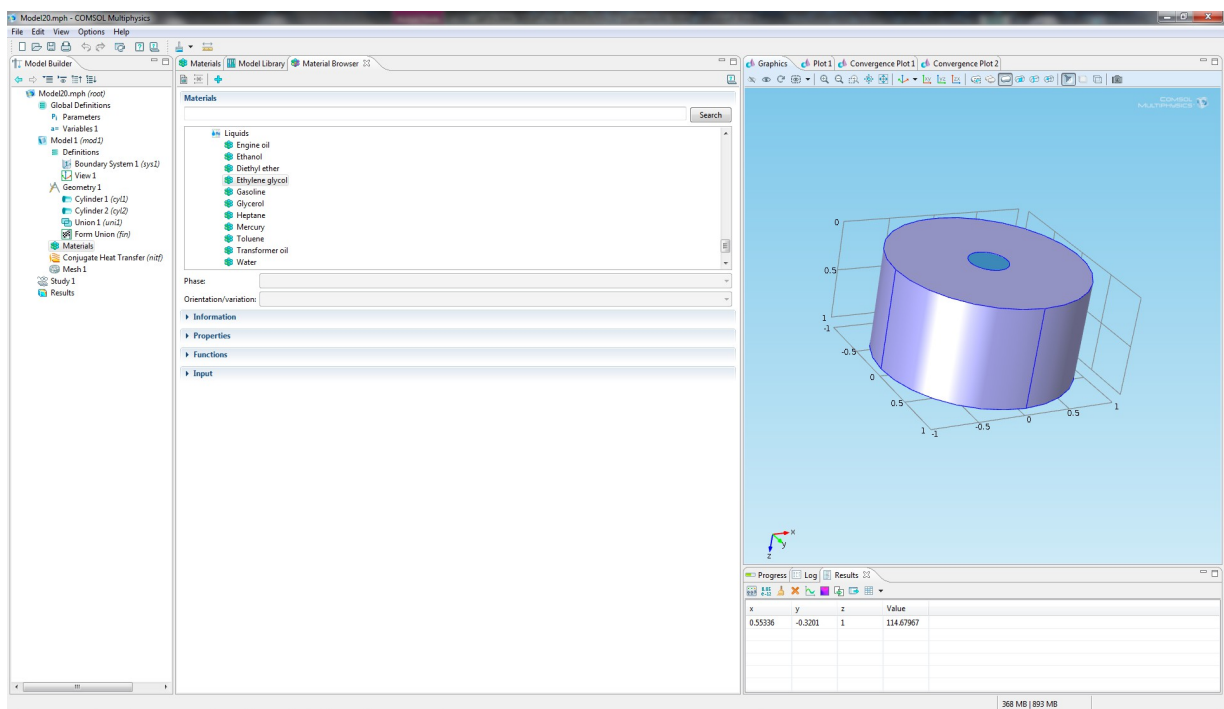


Σχήμα 7.13  
Βιβλιοθήκη υλικών – επιλογή  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

➤ Επιλέγουμε προσθήκη στο μοντέλο (add to model)

### 7.3.2 Αιθυλενογλυκόλη για HTF

Ομοίως ανοίγουμε την κατηγορία υγρά > liquid  
Επιλέγουμε Αιθυλενογλυκόλη για HTF

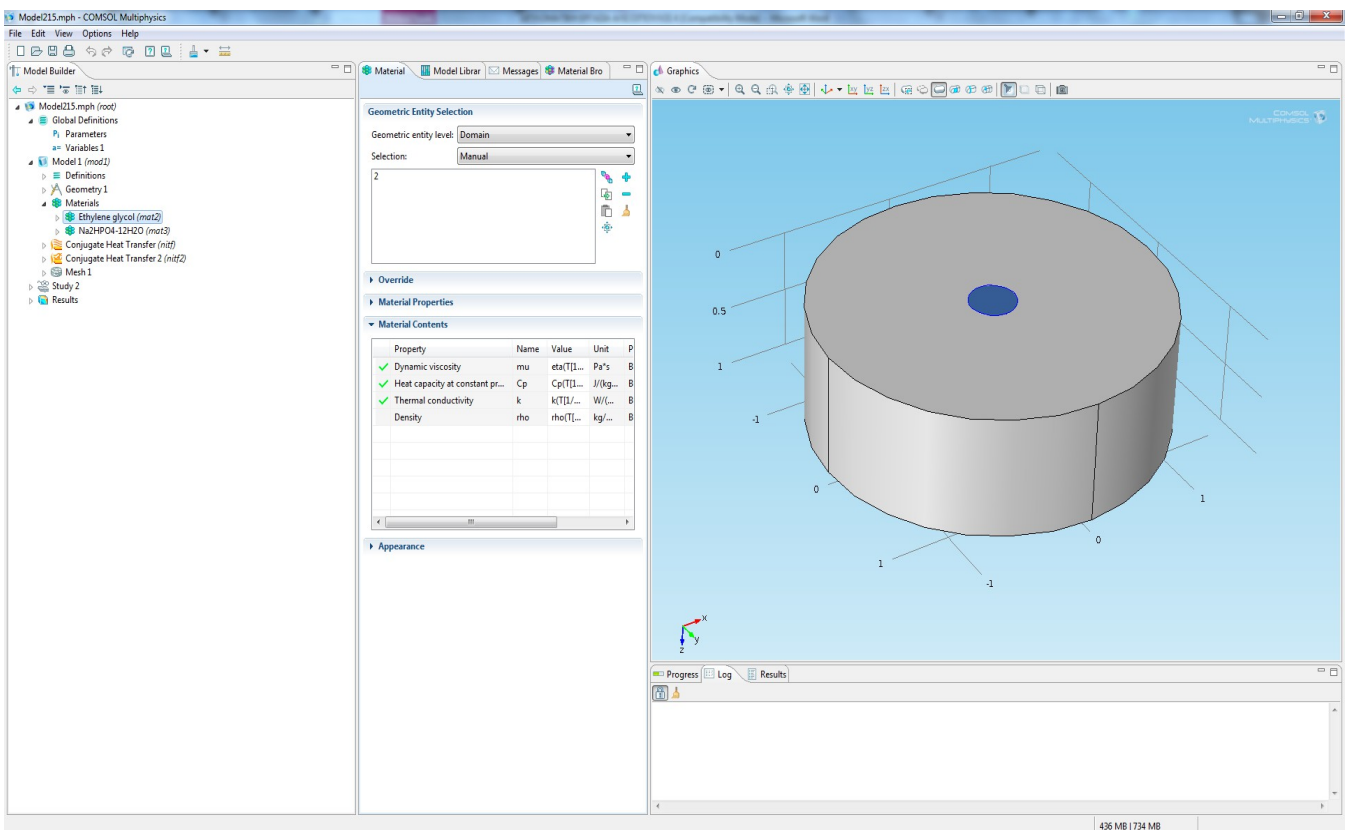


Σχήμα 7.14  
Βιβλιοθήκη υλικών – επιλογή HTF

Επιπλέον θα ορίσουμε τα υλικά αυτά που επιλέξαμε σε ποιο γεωμετρικό χώρο αντιστοιχούν προσδίδοντας έτσι τις ιδιότητες τους στο χώρο αυτό .

Ανοίγοντας το μενού > materials  
επιλέγουμε > Αιθυλενογλυκόλη

Στο διπλανό πεδίο Geometric entity selection δηλώνουμε ότι η Αιθυλενογλυκόλη αντιστοιχεί στο χωρίο 2 (τον κύλινδρο 2 με το ρευστό) .



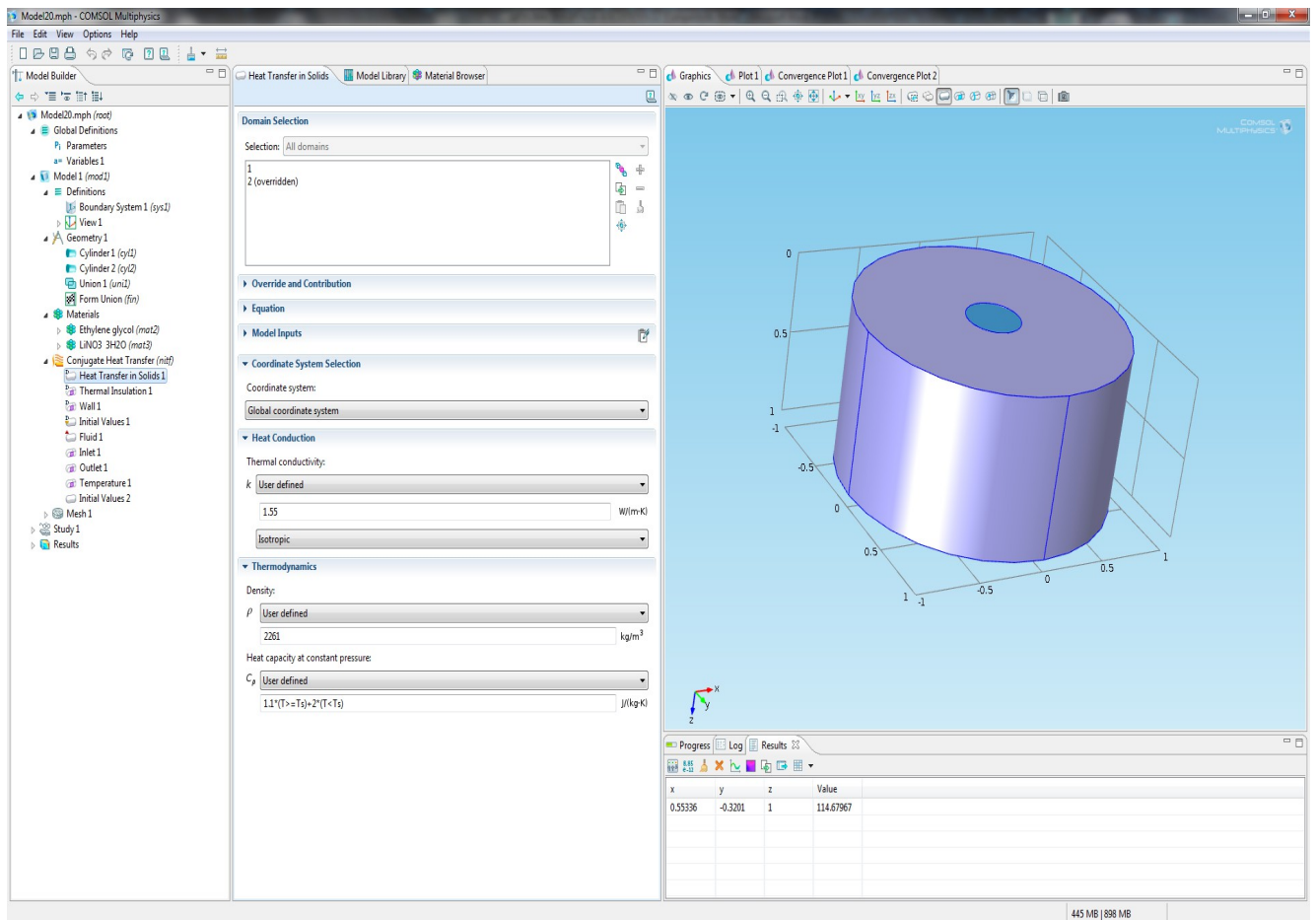
Σχήμα 7.15  
Αντιστοίχιση υλικών – γεωμετρικού χωρίου

## 7.4 ΦΥΣΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

### 7.4.1 Συζυγής Μεταφορά Θερμότητας

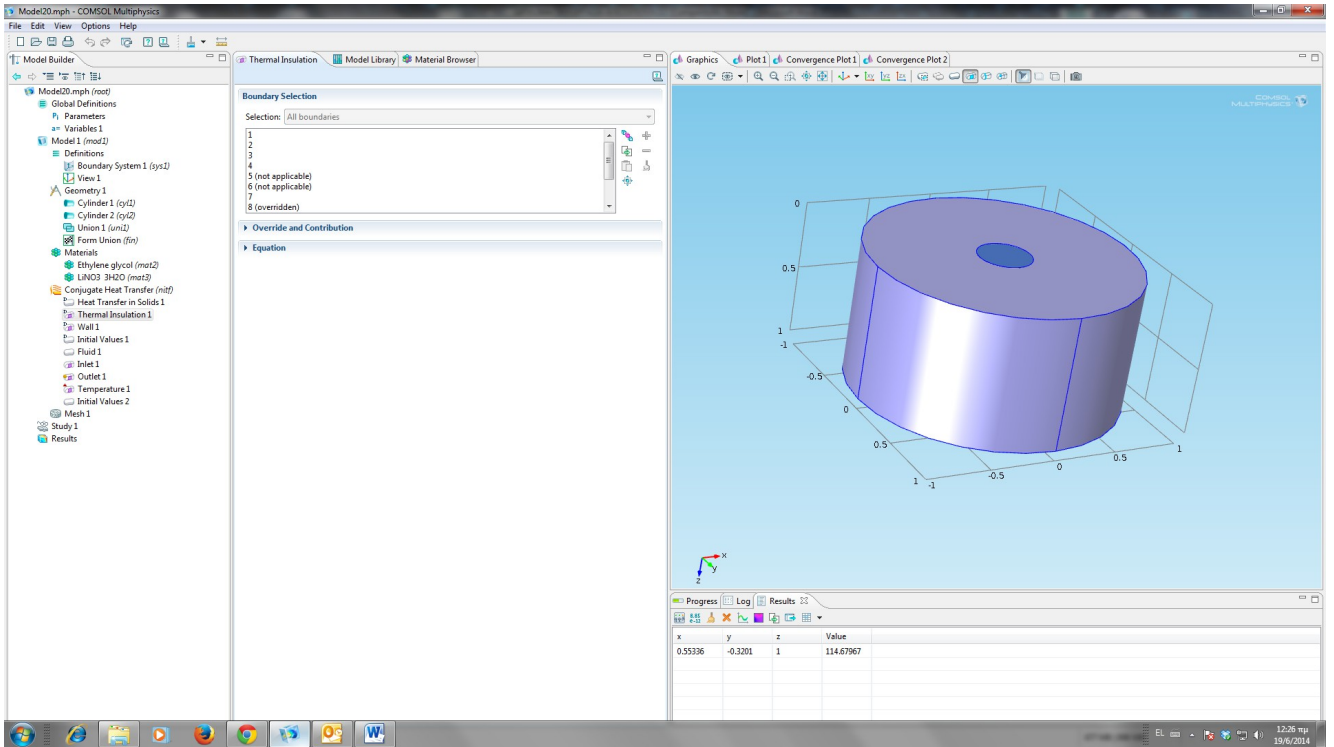
Στον κόμβο αυτό δηλώνουμε τα χωρία στα οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο.

Δηλαδή τα χωρία 1 και 2 PCM και HTF αντίστοιχα .



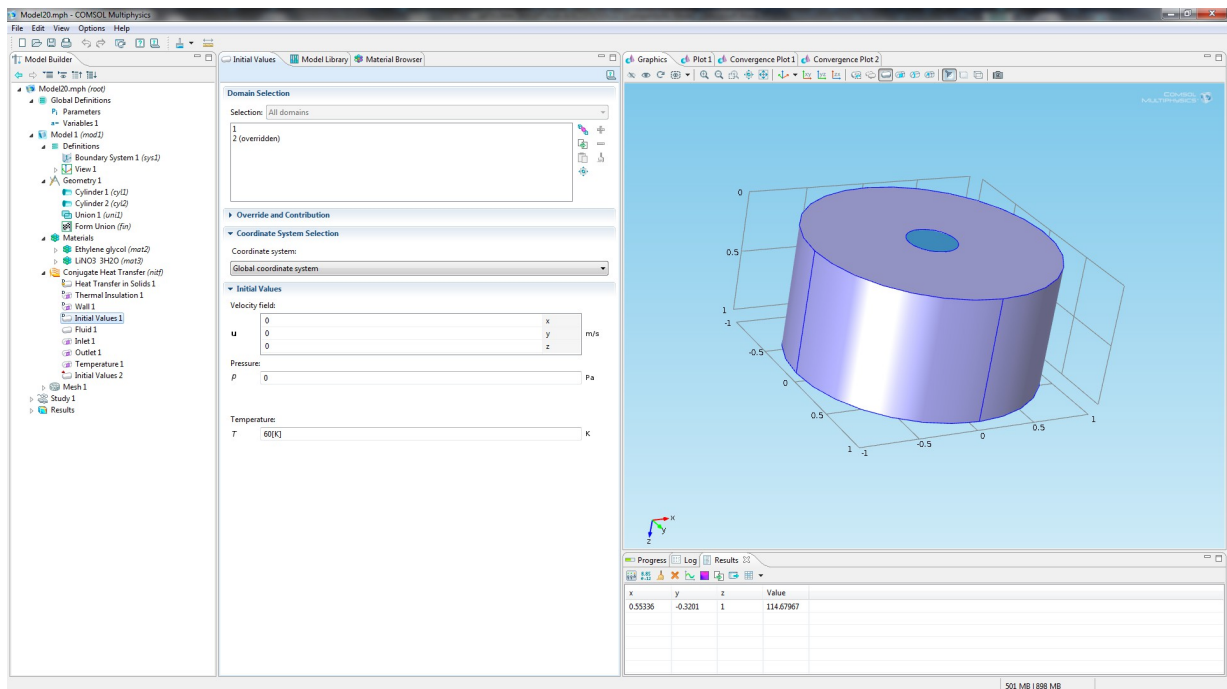
Σχήμα 7.16  
Αντιστοίχιση Φυσικού φαινομένου με γεωμετρικό χωρίο

Κατόπιν στο πεδίο Thermal Insulation εμφανίζονται όλα τα θερμικά όρια (μόνωση δεξαμενής) του προβλήματος που αποτελούν θερμική μόνωση όπως τα εξωτερικά όρια της δεξαμενής PCM.



Σχήμα 7.17  
Δήλωση Θερμικών ορίων

Στο πεδίο αρχικές συνθήκες δηλώνονται οι αρχικές τιμές για παράγοντες, όπως η θερμοκρασία PCM κατά τη εκκίνηση της προσομοίωσης .



Σχήμα 7.18  
Δήλωση αρχικών Θερμοκρασιών

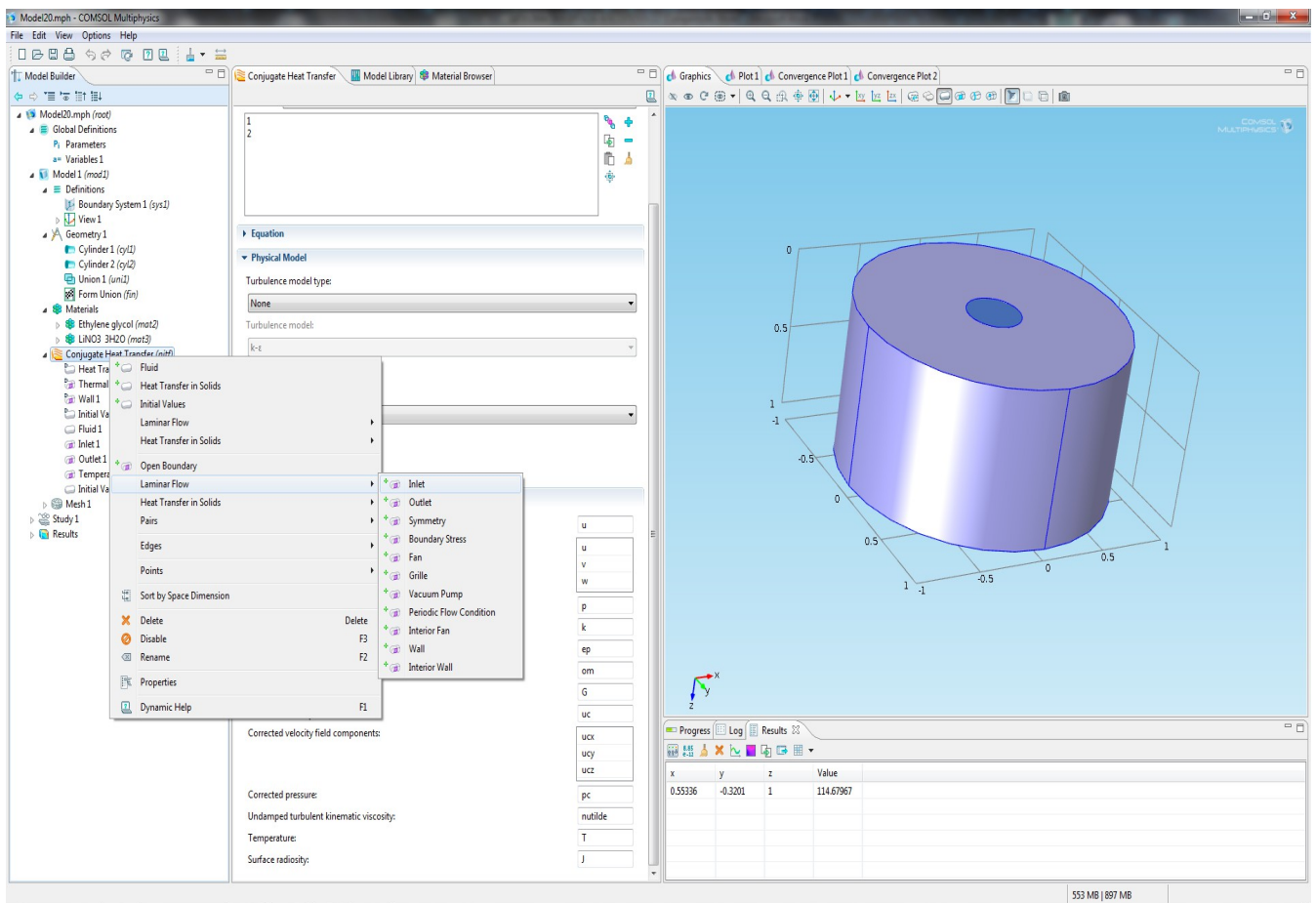


## 7.5 ΡΕΥΣΤΟ

### 7.5.1 Επιφάνεια Εισόδου Του Ρευστού (Inlet)

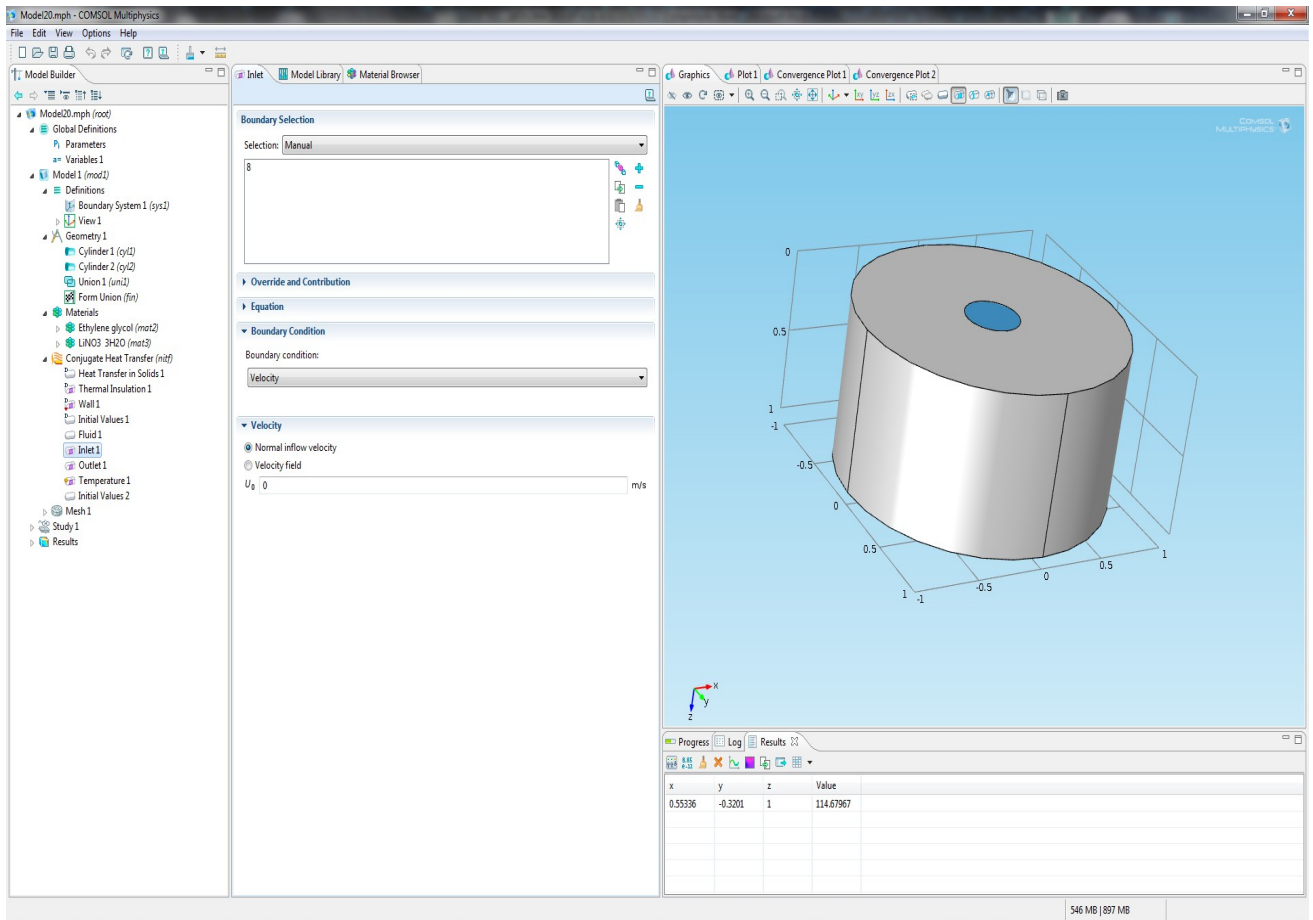
Στη συνέχεια θα πρέπει να ορίσουμε ποια επιφάνεια αποτελεί την είσοδο του ρευστού σύμφωνα με το πρόβλημα καθώς και την έξοδό του, αφού έχει αποδώσει θερμικό φορτίο στο υλικό της δεξαμενής .

Επιλέγουμε στο αριστερό μενού > conjugate heat transfer



Σχήμα 7.19  
Επιφάνεια εισόδου του ρευστού HTF

- Επιλέγουμε laminar flow > inlet .
- Αφού προστεθεί το inlet στο δεξι πεδίο το επιλέγουμε .
- Δηλώνουμε την επιφάνεια εισόδου του ρευστού > επιφάνεια 8 .



Σχήμα 7.20  
Ορισμός επιφάνειας εισόδου του ρευστού ΗΤΦ

## 7.5.2 Επιφάνεια Εξόδου Του Ρευστού (Outlet)

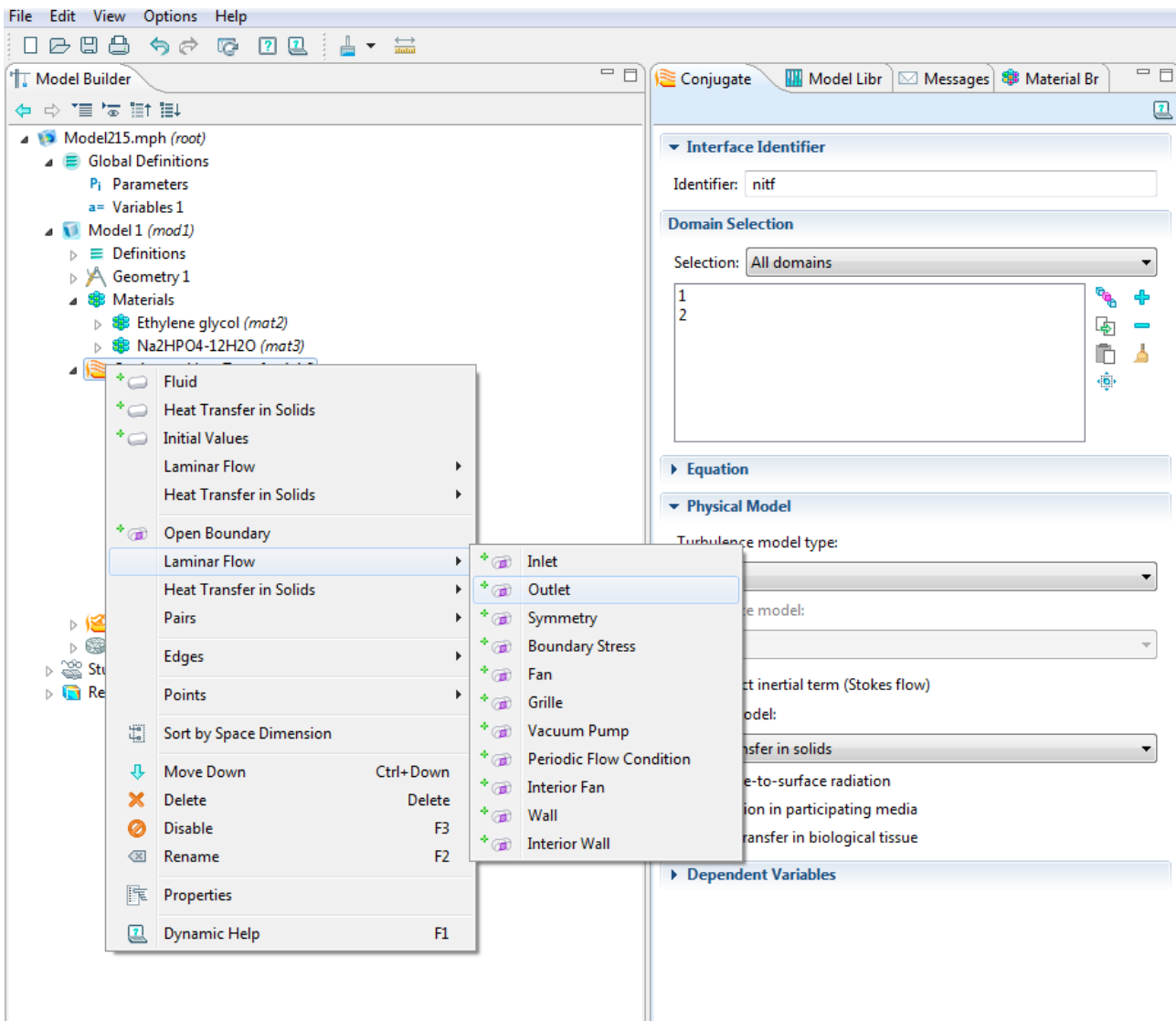
Με τον ίδιο τρόπο θα ορίσουμε την επιφάνεια εξόδου του ρευστού > την επιφάνεια 7.

Επιλέγουμε στο αριστερό μενού > conjugate heat transfer .

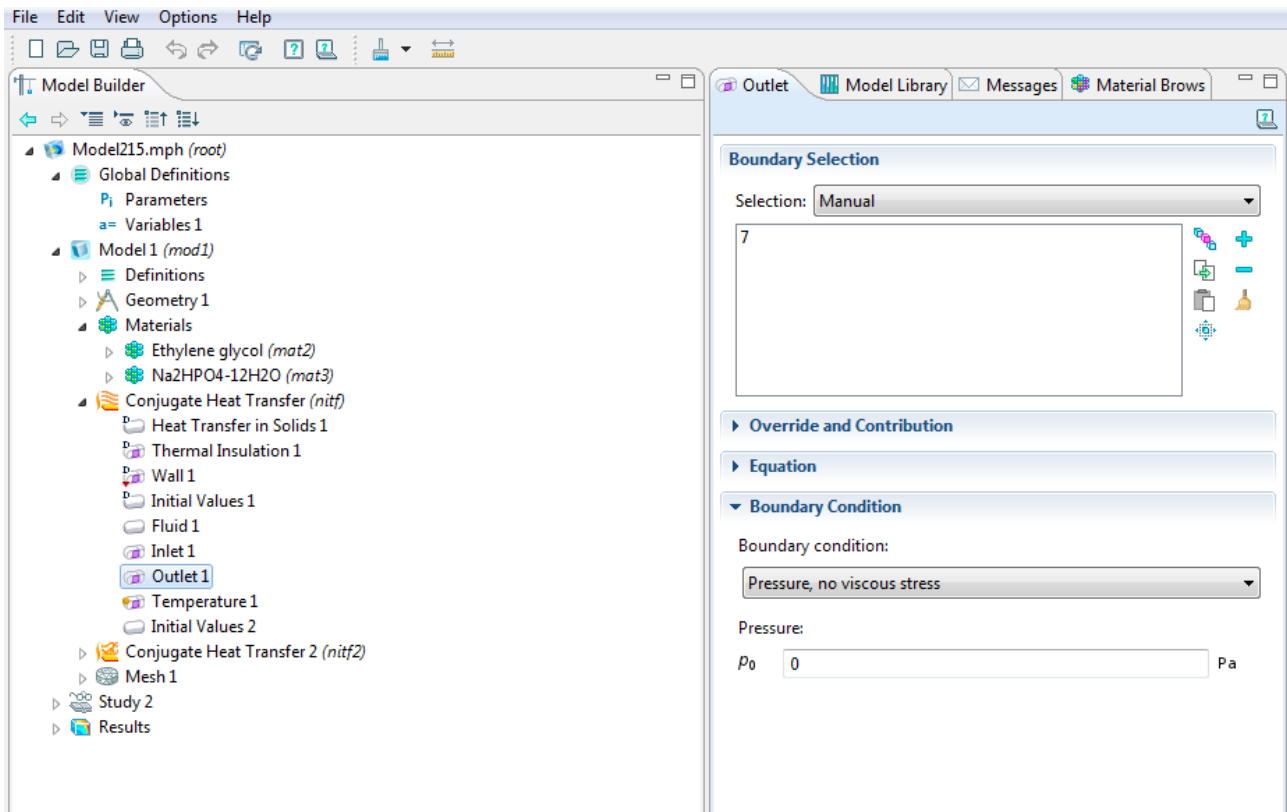
Επιλέγουμε laminar flow > outlet ,

Αφού προστεθεί το outlet στο παράθυρο αριστερά , στο δεξιά πεδίο επιλέγουμε την επιφάνεια > 7.

Με δεξί κλικ την ορίζουμε ως επιφάνεια εξόδου του ρευστού .

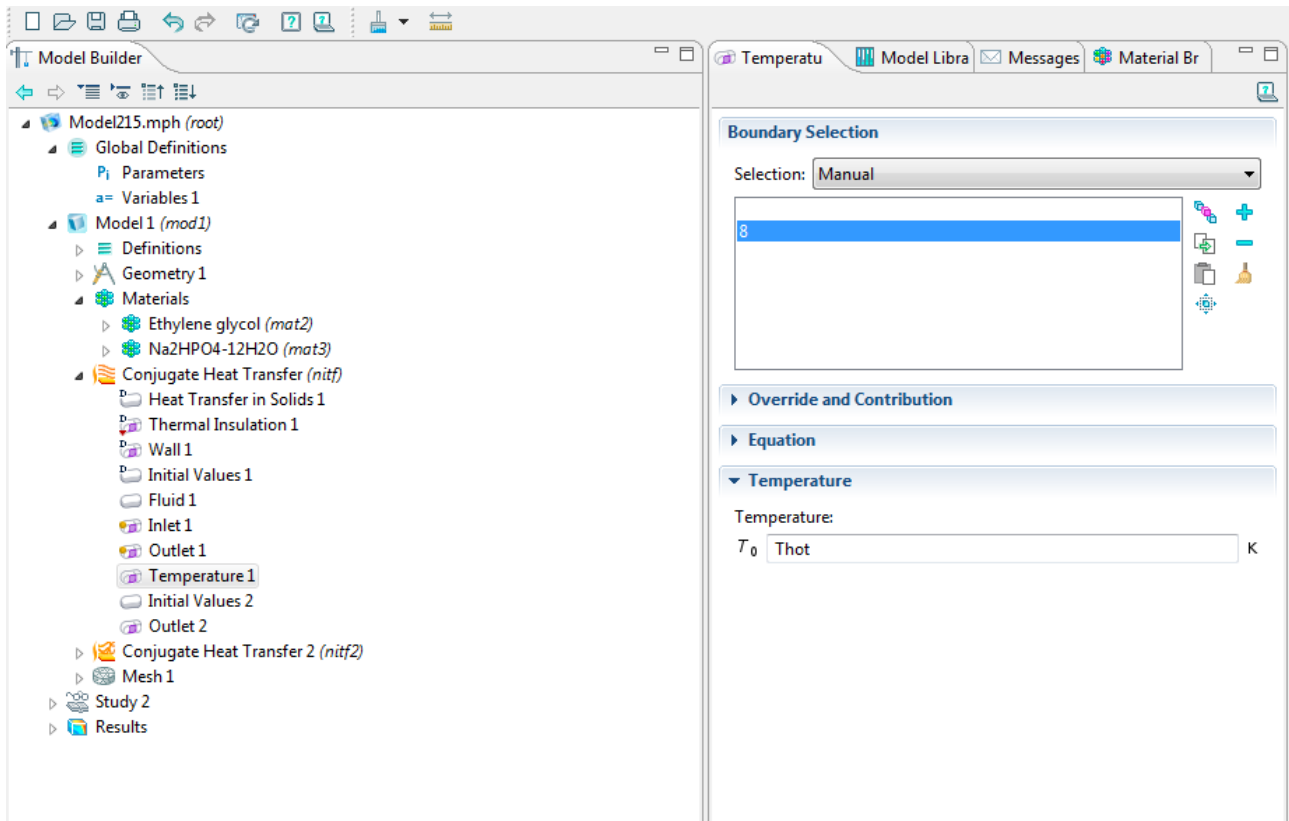


Σχήμα 7.21  
Δημιουργία επιφάνειας εξόδου του ρευστού HTF



Σχήμα 7.22  
Ορισμός επιφάνειας εξόδου του ρευστού HTF

### 7.5.3 Αρχική Θερμοκρασία Του Ρευστού



Σχήμα 7.23  
Ορισμός θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού HTF

- Στην καρτέλα Temperature 1 θα δηλώσουμε την θερμοκρασία εισόδου του HTF που θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή της διαδικασίας .
- Επιλέγουμε την επιφάνεια 8 είσοδος του HTF
- Στο πεδίο Temperature δηλώνουμε Thot

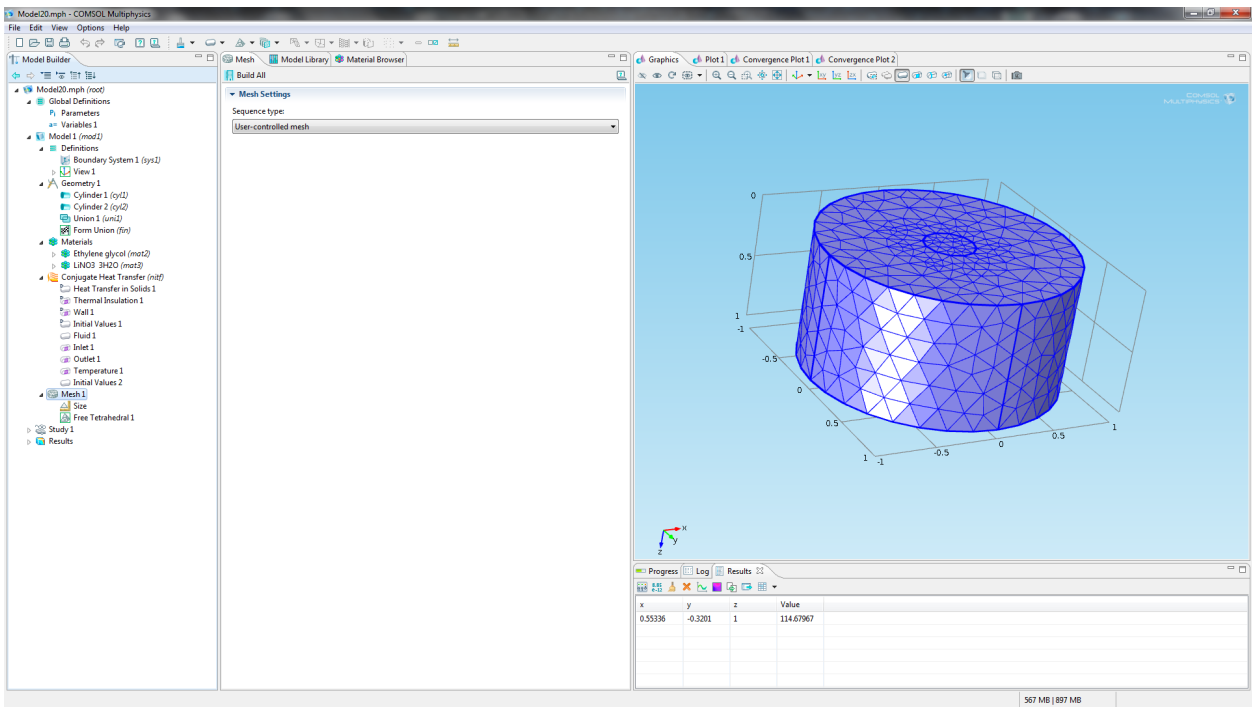
Την παράμετρο Thot την έχουμε δηλώσει στον πίνακα παραμέτρων στην αρχή και μας επιτρέπει να μεταβάλουμε τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ανάλογα και με την πηγή δηλώνοντας οποιαδήποτε τιμή στον πίνακα παραμέτρων χωρίς άλλη διαδικασία .

## 7.6 ΠΛΕΓΜΑ

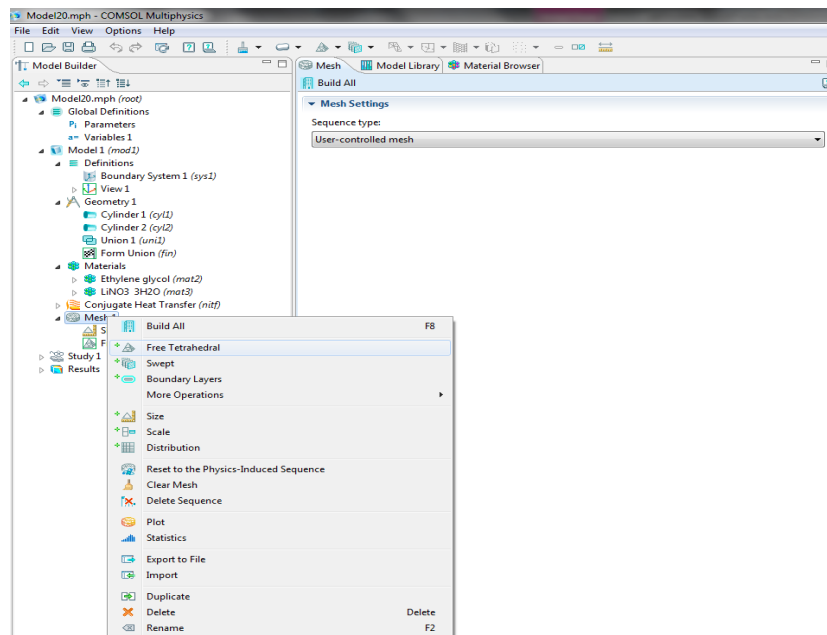
Για την εκτέλεση της προσομοίωσης και των υπολογισμών τα χωριά πρέπει να διαιρεθούν σε στοιχειώδη κομμάτια

Στο αριστερά πεδίο επιλέγουμε mesh για να ορίσουμε τον τύπο τον κανναβου στο χώρο βάση του οποίου θα γίνει η διαίρεση .

Επιλέγουμε Free tetrahedral (ελεύθερα τετράεδρα) .



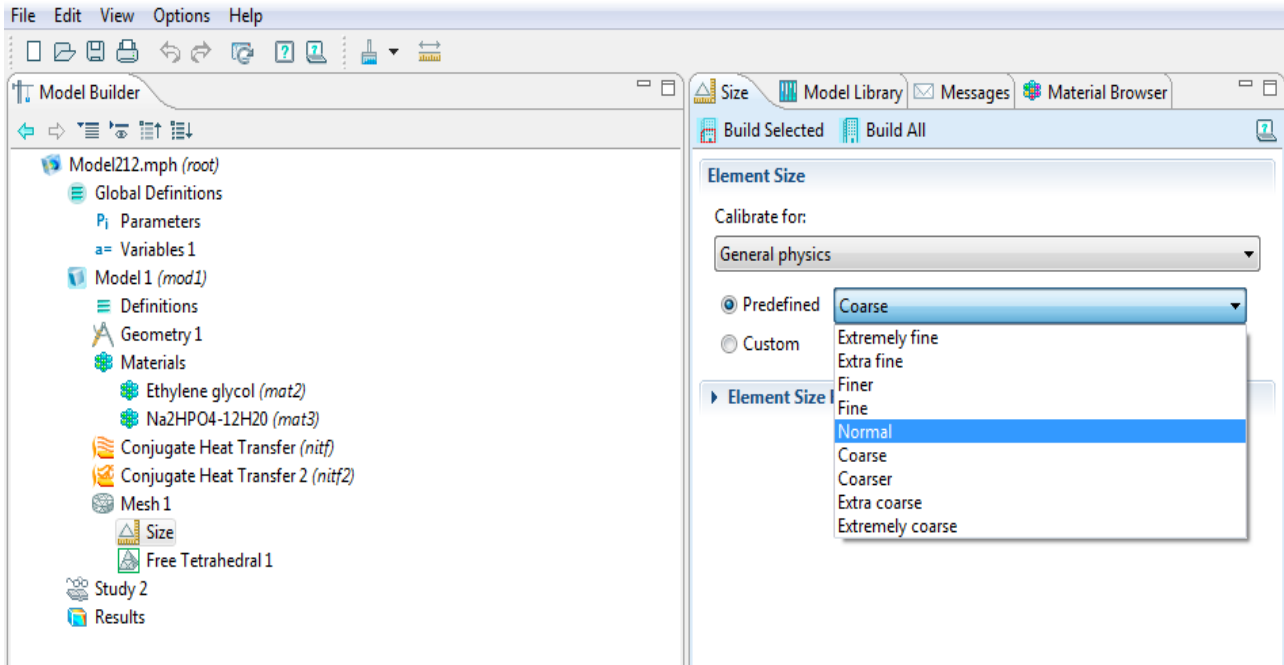
Σχήμα 7.24  
Ορισμός πλέγματος στα χωρία ενδιαφέροντος



Σχήμα 7.25  
Ορισμός γεωμετρίας πλέγματος

## 7.6.1 Μέγεθος Πλέγματος

Το μέγεθος του πλέγματος θα καθορίσει σε πόσα στοιχειώδη κομμάτια θα γίνει η διαίρεση του χώρου .



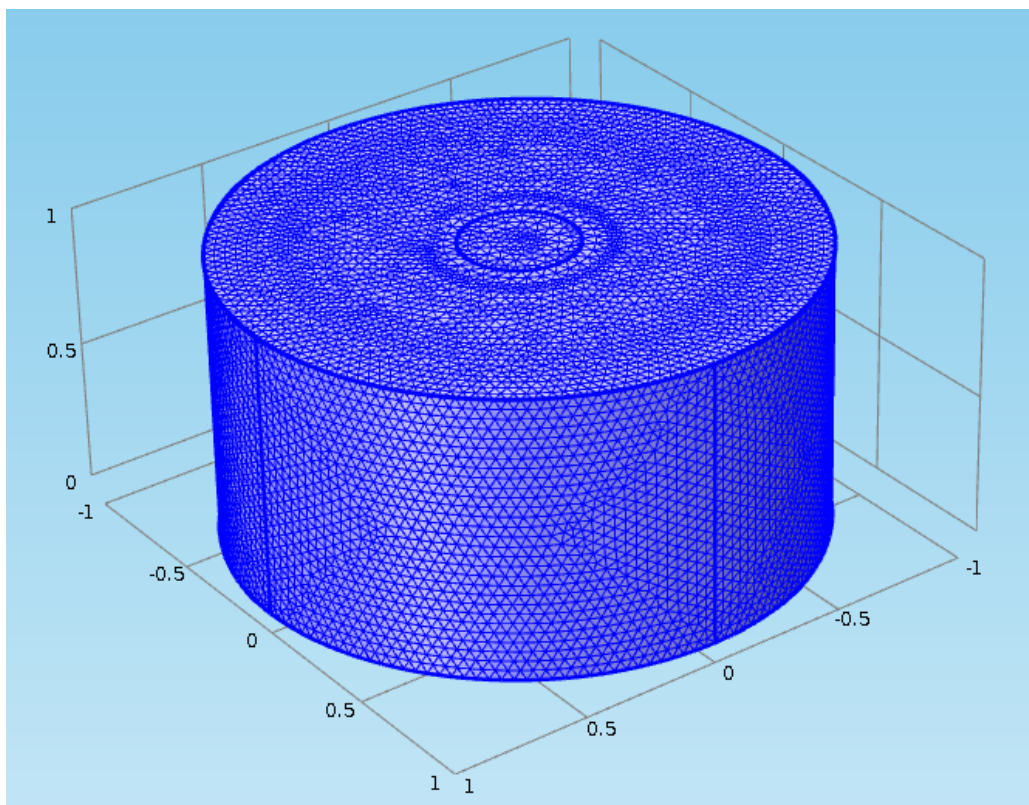
Σχήμα 7.26  
Ορισμός μεγέθους πλέγματος

Οι επιλογές που έχουμε είναι :

- Εξαιρετικά ψιλό
- Πολύ ψιλό
- Πιο ψιλό
- Ψιλό
- Κανονικό
- Χοντρό
- Πιο Χοντρό
- Πολύ Χοντρό
- Εξαιρετικά Χοντρό

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στη επιλογή του μεγέθους πλέγματος καθώς αυτή έχει μεγάλη επίδραση στο μέγεθος της πληροφορίας, την λεπτομέρεια και την επεξεργαστική ισχύ που θα απαιτηθεί για τον υπολογισμό του μοντέλου που θέλουμε να προσομοιώσουμε .

Οι απαιτήσεις στον τομέα αυτό είναι αντικρουόμενες καθώς μια επιλογή μεγέθους **extremely fine** θα αποδώσει μεγαλύτερη ακρίβεια και πληροφορία, αλλά, επίσης μπορεί να απαιτήσει τεράστιο χρόνο υπολογισμού του μοντέλου εξαντλώντας την επεξεργαστική ισχύ και μνήμη του υπολογιστή.



Σχήμα 7.27  
Extremely fine μέγεθος πλέγματος

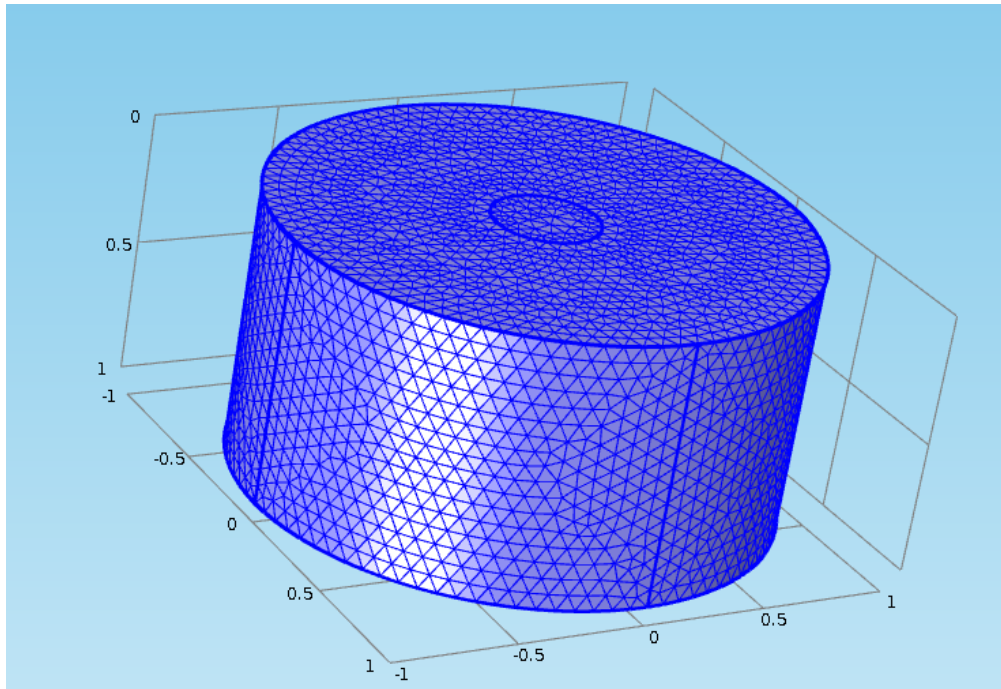
Επίσης μια επιλογή μεγέθους **extra fine** θα αποδώσει μεγαλύτερη ακρίβεια και πληροφορία, αλλά, επίσης μπορεί να απαιτήσει τεράστιο χρόνο υπολογισμού του μοντέλου.

Αντίστροφα μια επιλογή **extra coarse** μπορεί μεν να δώσει πιο γρήγορα αποτελέσματα, αλλά θα έχει χρησιμοποιήσει λιγότερα ενδιάμεσα σημεία για τους υπολογισμούς δίνοντας λιγότερη πληροφορία και ακρίβεια .

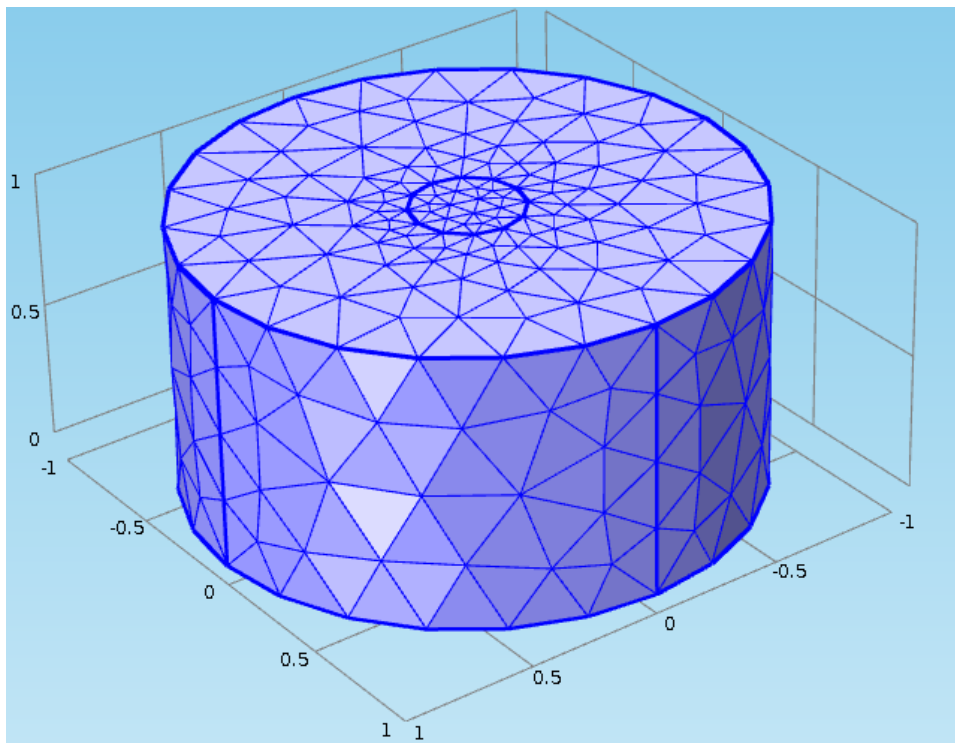
Τέλος , μια επιλογή **extremely coarse** αντενδείκνυται αυστηρά, αφού μπορεί μεν να δώσει πάρα πολύ γρήγορα αποτελέσματα, αλλά θα έχει χρησιμοποιήσει πάρα πολύ λίγα ενδιάμεσα σημεία για τους υπολογισμούς δίνοντας λιγότερη πληροφορία και χάνοντας σε ακρίβεια .

Με την πολύ αραιή επιλογή κόμβων είναι πιθανό ορισμένα σημεία και ζώνες ενδιαφέροντος να μην υπολογιστούν καθόλου πέφτοντας σε ενδιάμεσα σημεία επιλογής . Παραμένει όμως χρήσιμη για την γρήγορη μεταφορά της 'ποιοτικής αισθησης', για την εξέλιξη του φαινομένου και τη γρήγορη συγκομιδή συμπερασμάτων κατά τις δοκιμές και αλλαγές παραμέτρων.

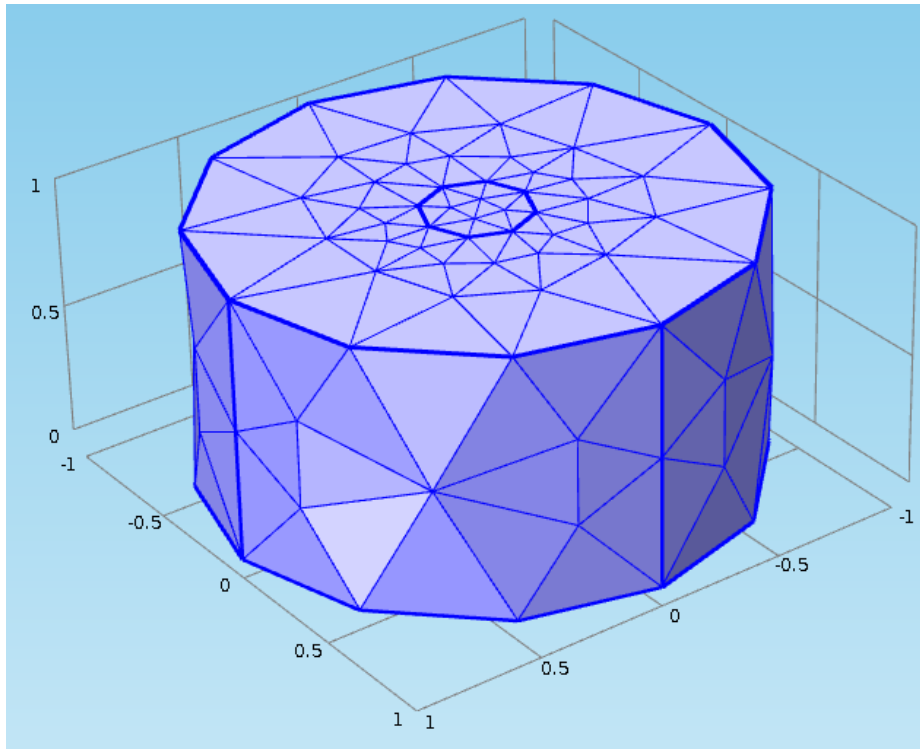




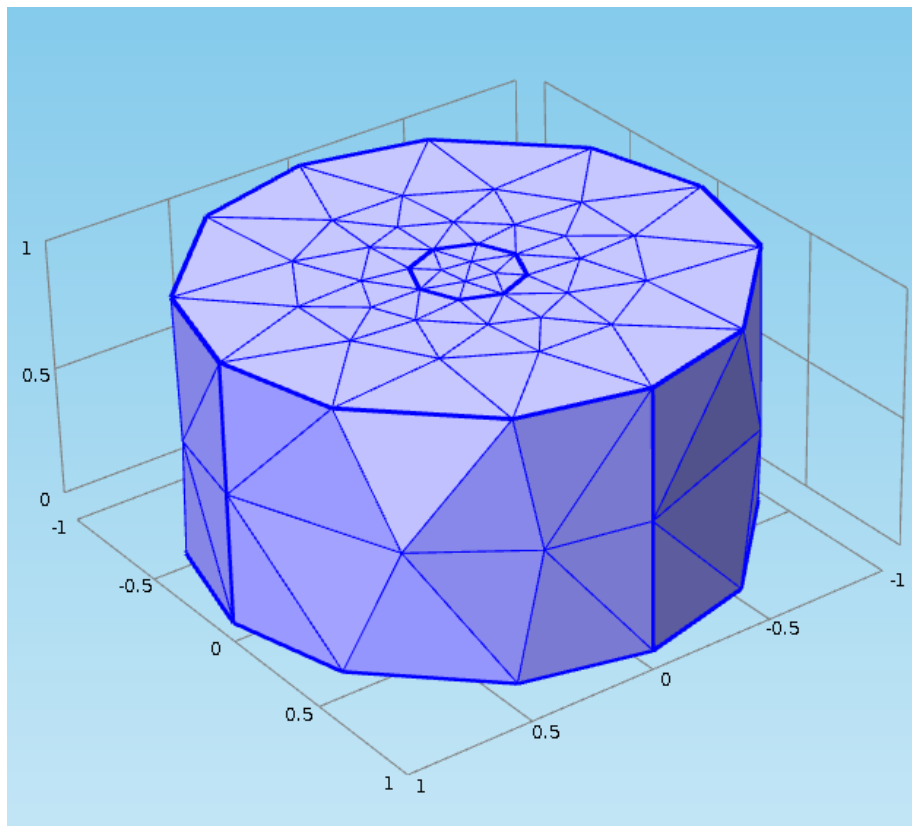
Σχήμα 7.28  
Extra fine μέγεθος πλέγματος



Σχήμα 7.29  
Coarse μέγεθος πλέγματος

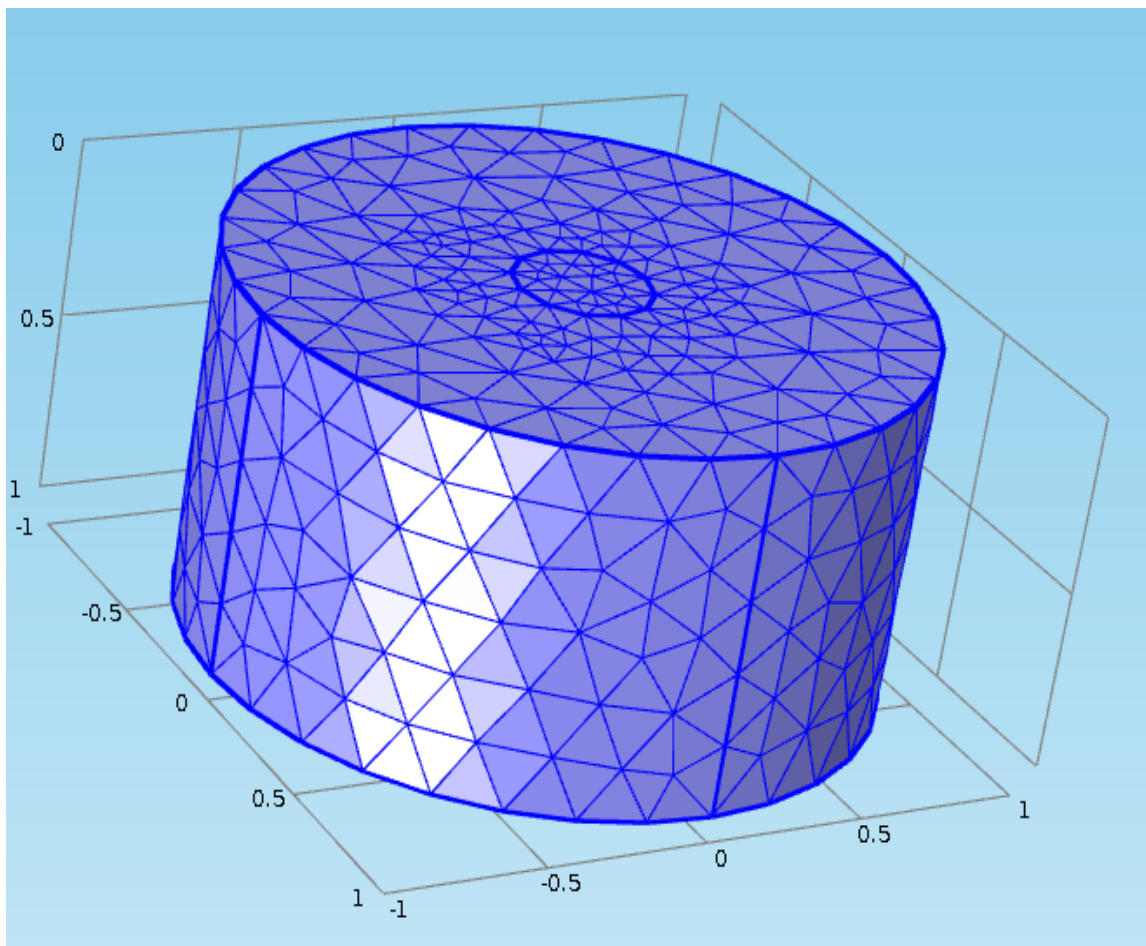


Σχήμα 7.30  
Extra coarse μέγεθος πλέγματος

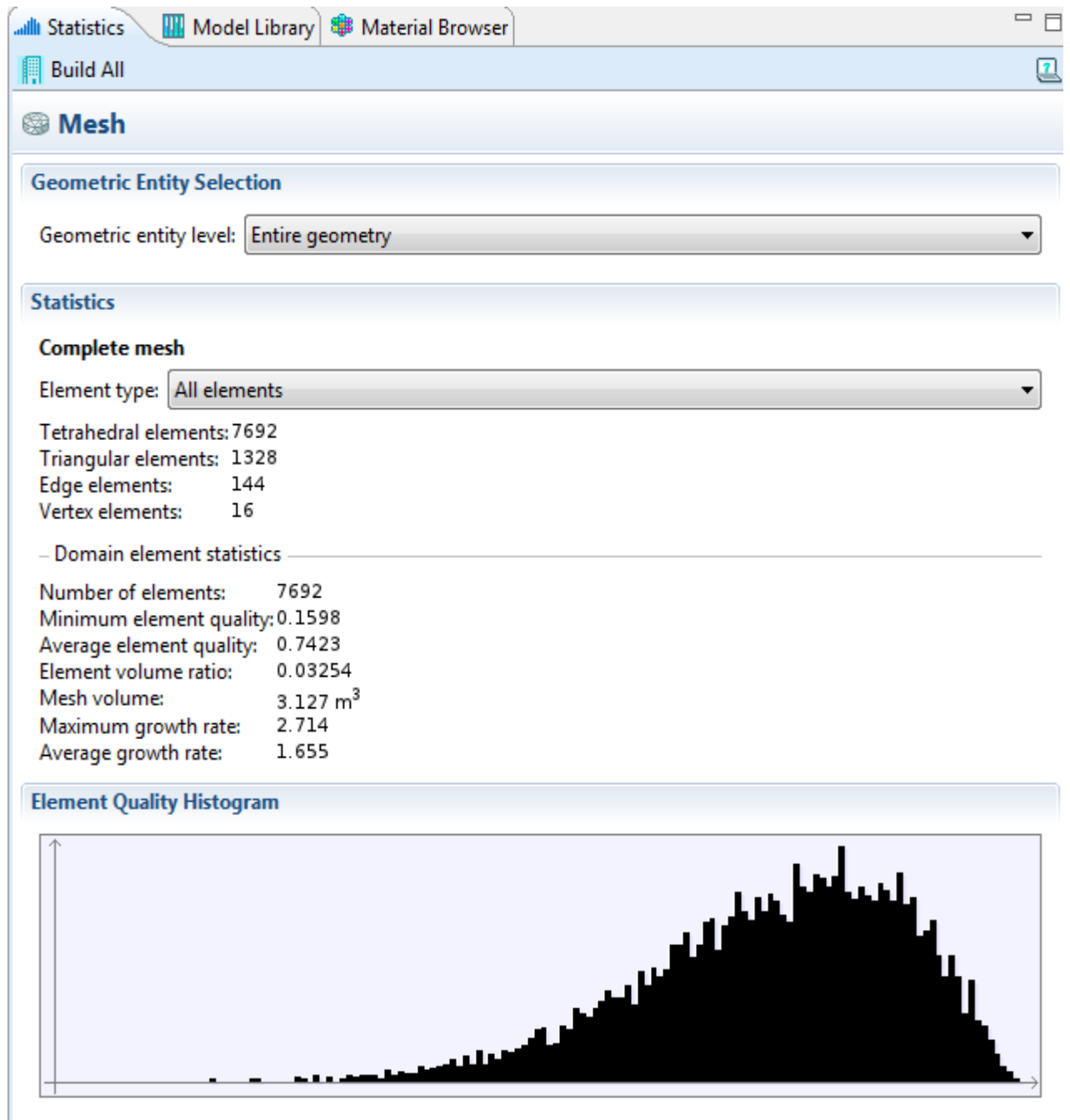


Σχήμα 7.31  
Extremely coarse μέγεθος πλέγματος

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης έγινε επιλογή του μεγέθους πλέγματος μεγέθους **normal** παρέχοντας έτσι μια ισορροπία μεταξύ χρόνου υπολογισμού, οικονομίας υπολογιστικής ισχύος, αλλά και ακρίβειας .

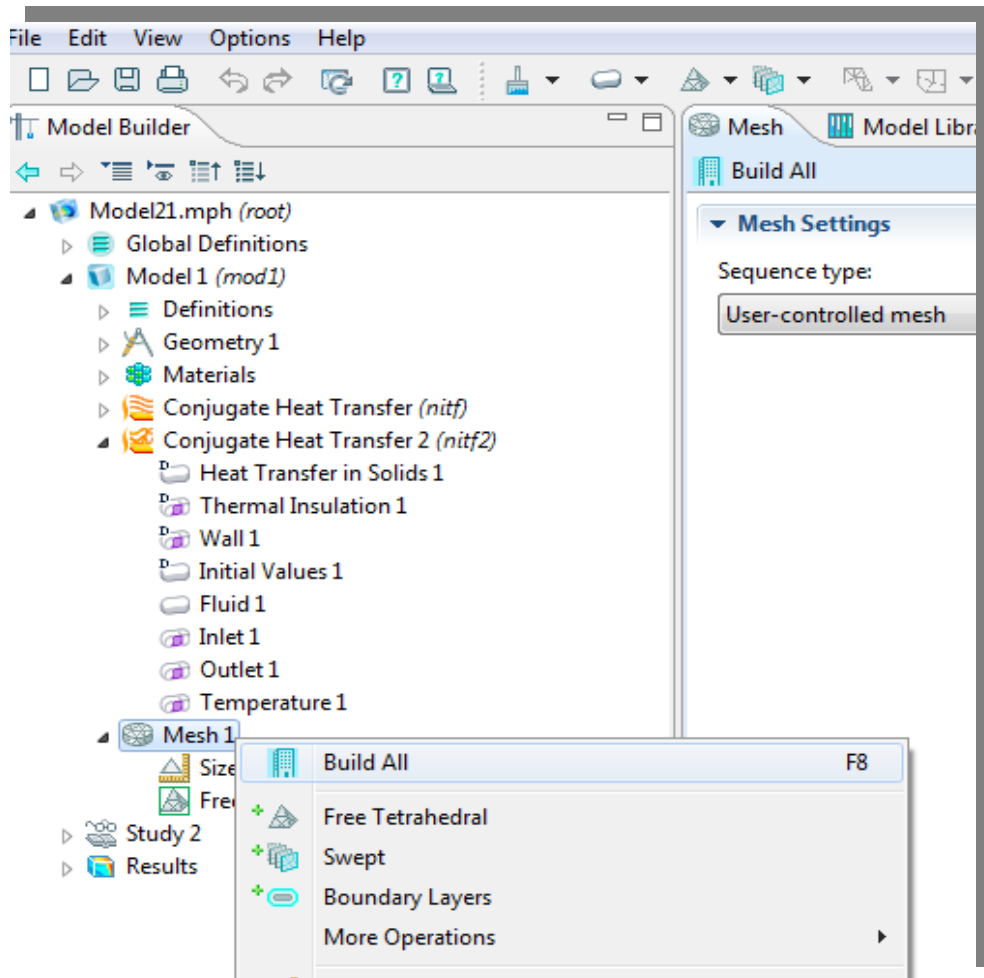


Σχήμα 7.32  
Normal μέγεθος πλέγματος



Σχήμα 7.33  
 Στατιστικά στοιχεία για το επιλεγμένο Normal μέγεθος πλέγματος

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται στοιχεία για το πλέγμα που επιλέχθηκε και εφαρμόσθηκε πάνω σε όλη τη γεωμετρία της δεξαμενής PCM και του σωλήνα HTF (χωρία 1,2) .



Σχήμα 7.34  
Δημιουργία πλέγματος

Τέλος επιλέγουμε **build all** για να υλοποιηθεί η δημιουργία πλέγματος στο χώρο του μοντέλου .

## 7.7 Μελέτη Μοντέλου

Στο αριστερά παράθυρο επιλέγουμε > Study

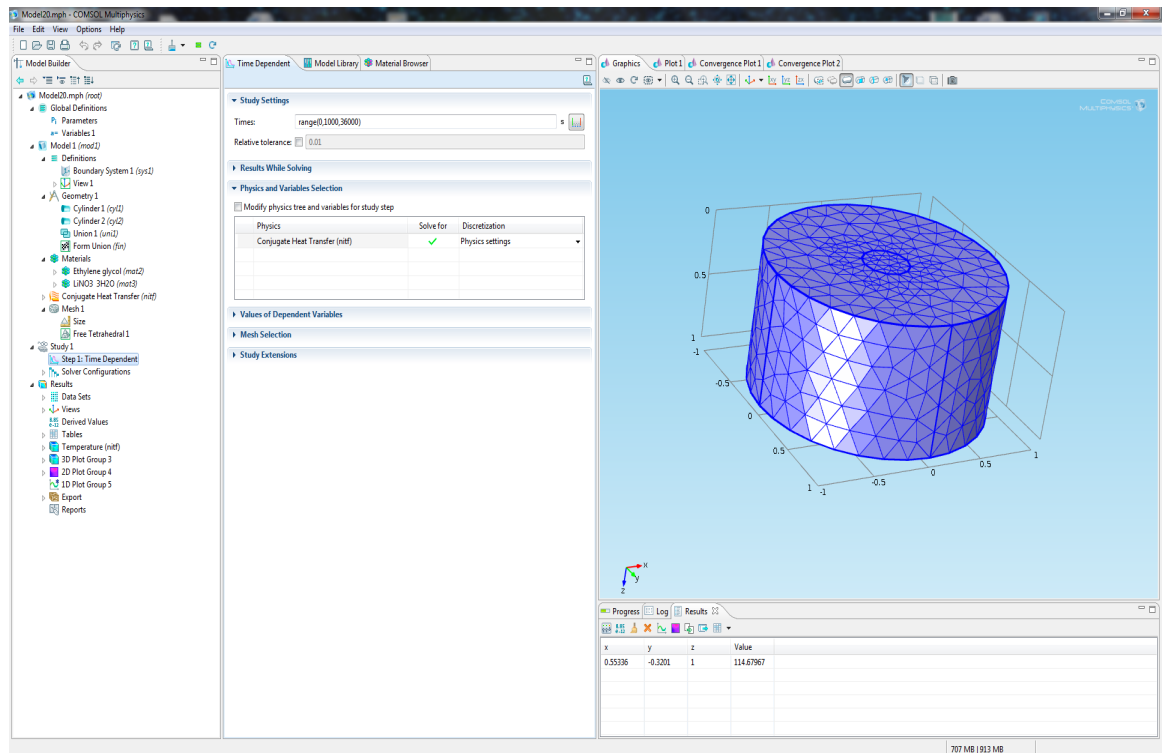
Επειδή το φαινόμενο που μελετάμε είναι χρονικά μεταβαλλόμενο επιλέγουμε

➤ Time dependent

Στο μεσαίο πλαίσιο πρέπει να ορίσουμε στο πεδίο

➤ Study settings

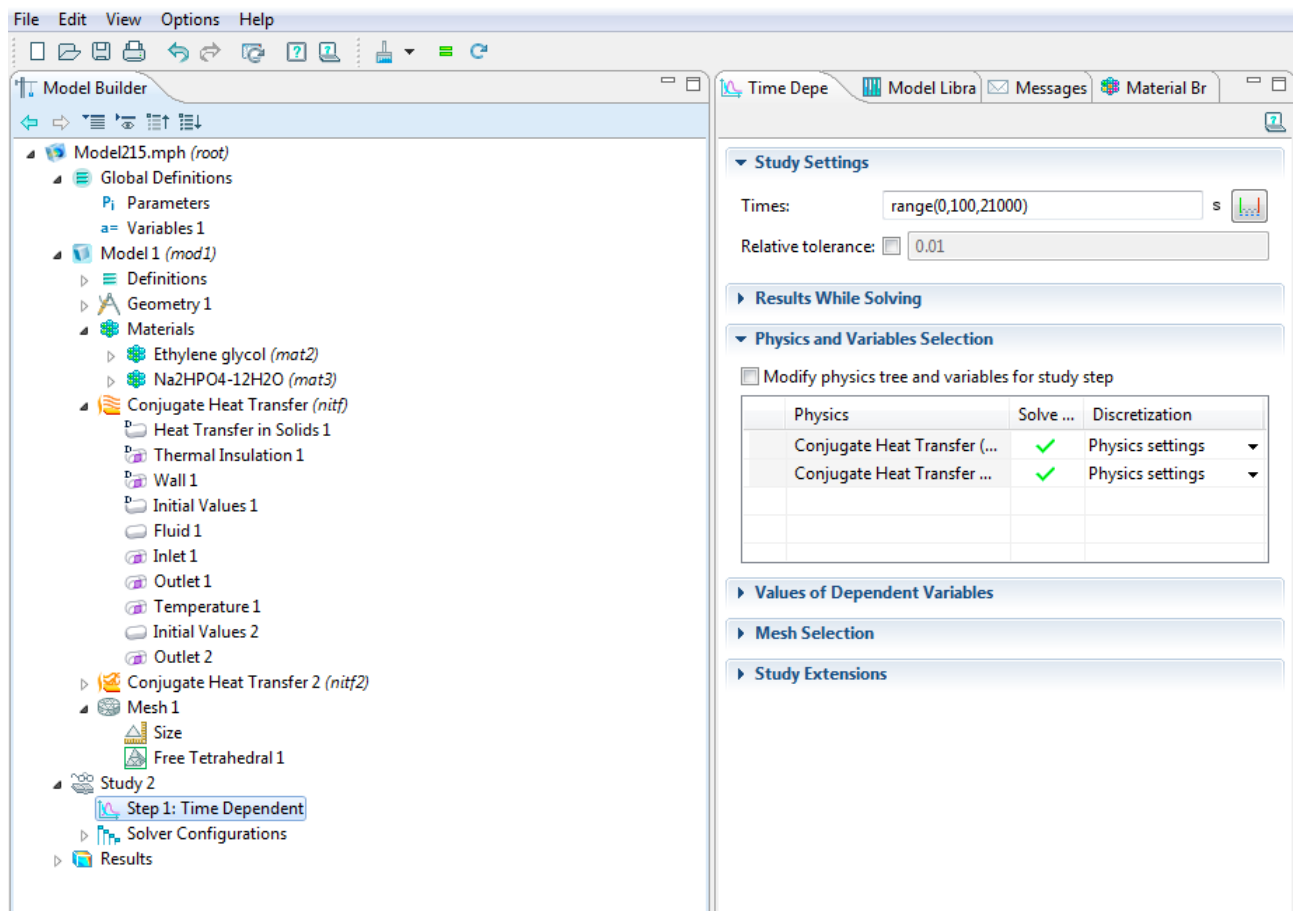
- τη χρονική αφετηρία
- το χρονικό βημα
- το συνολικό χρονικό διάστημα  
Times > range (Start,step,duration)



Σχήμα 7.35  
Ορισμός χρονικών παραμέτρων

➤ Η χρονική αφετηρία (sec)

Δηλώνει στο πρόγραμμα από ποια χρονική στιγμή εκκίνησης θέλουμε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη του φαινομένου π.χ.  $t = 0\text{sec}$



Σχήμα 7.36  
Ορισμός χρονικών παραμέτρων

- Το χρονικό βήμα (sec)

Δηλώνει στο πρόγραμμα ανά ποσά δευτερόλεπτα (time step) θέλουμε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη του φαινομένου π.χ.  $t = 500 \text{ sec}$  .

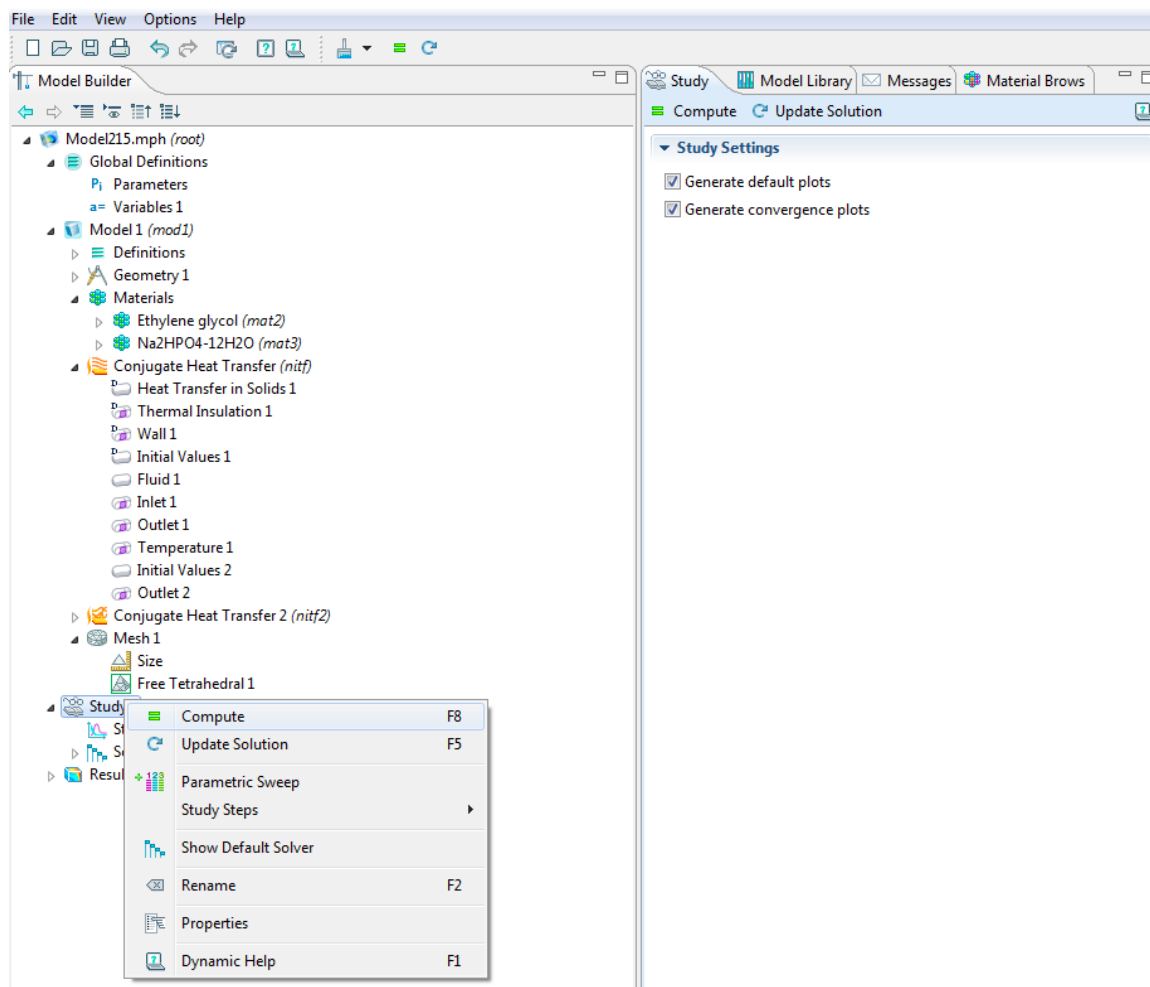
- Χρονικό διάστημα

Δηλώνει στο πρόγραμμα το βάθος χρονικού πεδίου για το οποίο θα υπολογίσει τα μεγέθη. Για ποσά δευτερόλεπτα δηλαδή χρονική διάρκεια (time ) θέλουμε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη του φαινομένου .  
π.χ. 5ωρες =  $18000 \text{ sec}$  .

## 7.8 Εκτέλεση Υπολογισμού

Αφού έχουμε ρυθμίσει όλες τις επιθυμητές παραμέτρους πηγαίνουμε στο αριστερό πλαίσιο και επιλέγουμε

study > Compute



Σχήμα 7.37  
Εκτέλεση προσομοίωσης

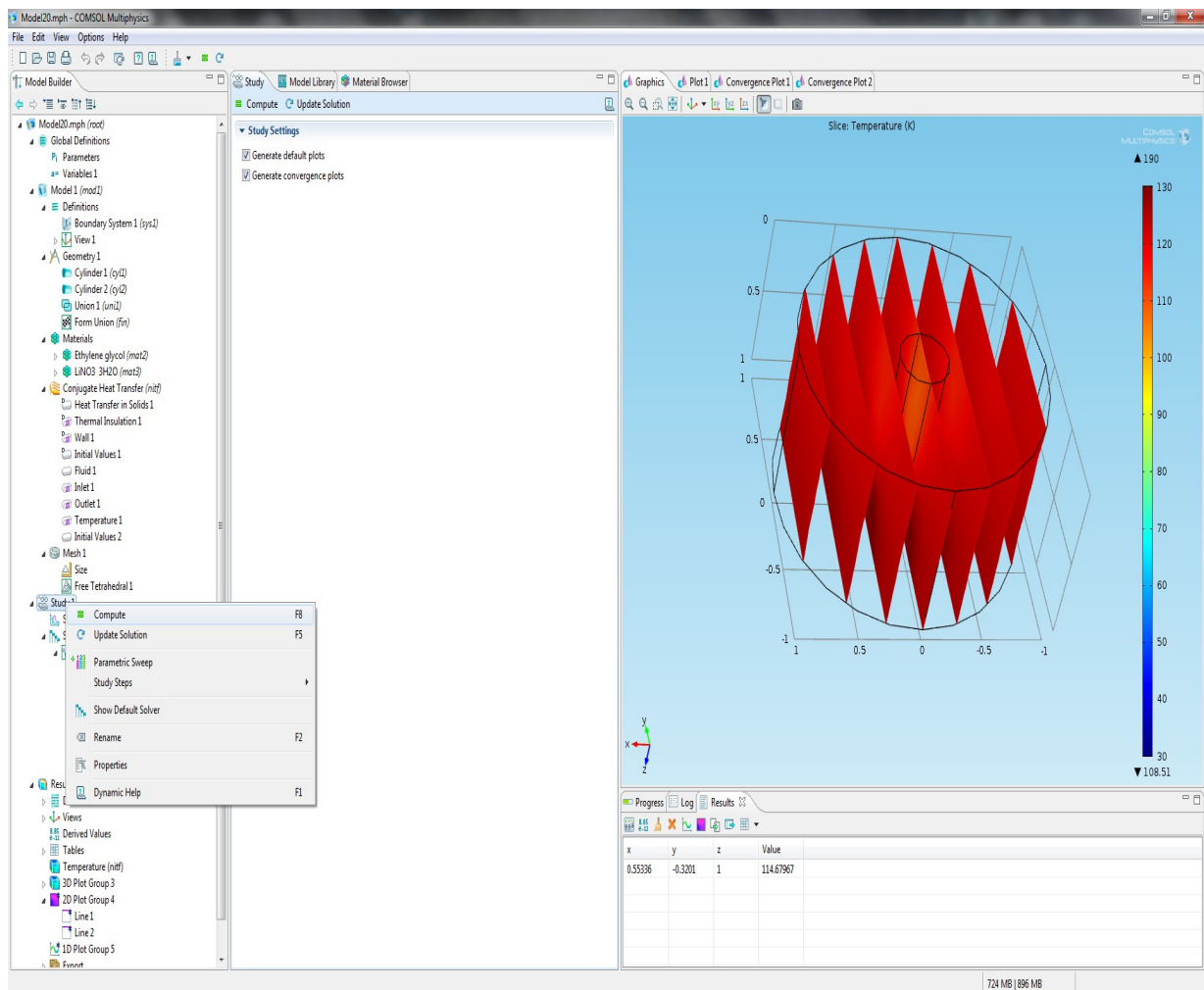
Το COMSOL θα υπολογίσει όλα τα μεγέθη για το επιλεγμένο χρονικό διάστημα δίνοντας στο δεξί τμήμα την έξοδο των αποτελεσμάτων για τα διαστήματα που έχουμε ορίσει.

Ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας εξαρτάται από :

- Το μέγεθος του μοντέλου  
Όσο πιο μεγάλο είναι το μοντέλο τόσο περισσότερος χρόνος θα απαιτηθεί
- Το φυσικό φαινόμενο  
Όσο πιο σύνθετο είναι το φυσικό φαινόμενο που μελετάμε τόσο μεγαλώνει και ο χρόνος επεξεργασίας .
- Τον αριθμό κόμβων που έχουμε ορίσει (Grid) .  
Όπως αναλύσαμε προηγουμένως μεγάλος αριθμός κόμβων επιβραδύνει την ταχύτητα επεξεργασίας αυξάνοντας όμως την ακρίβεια .



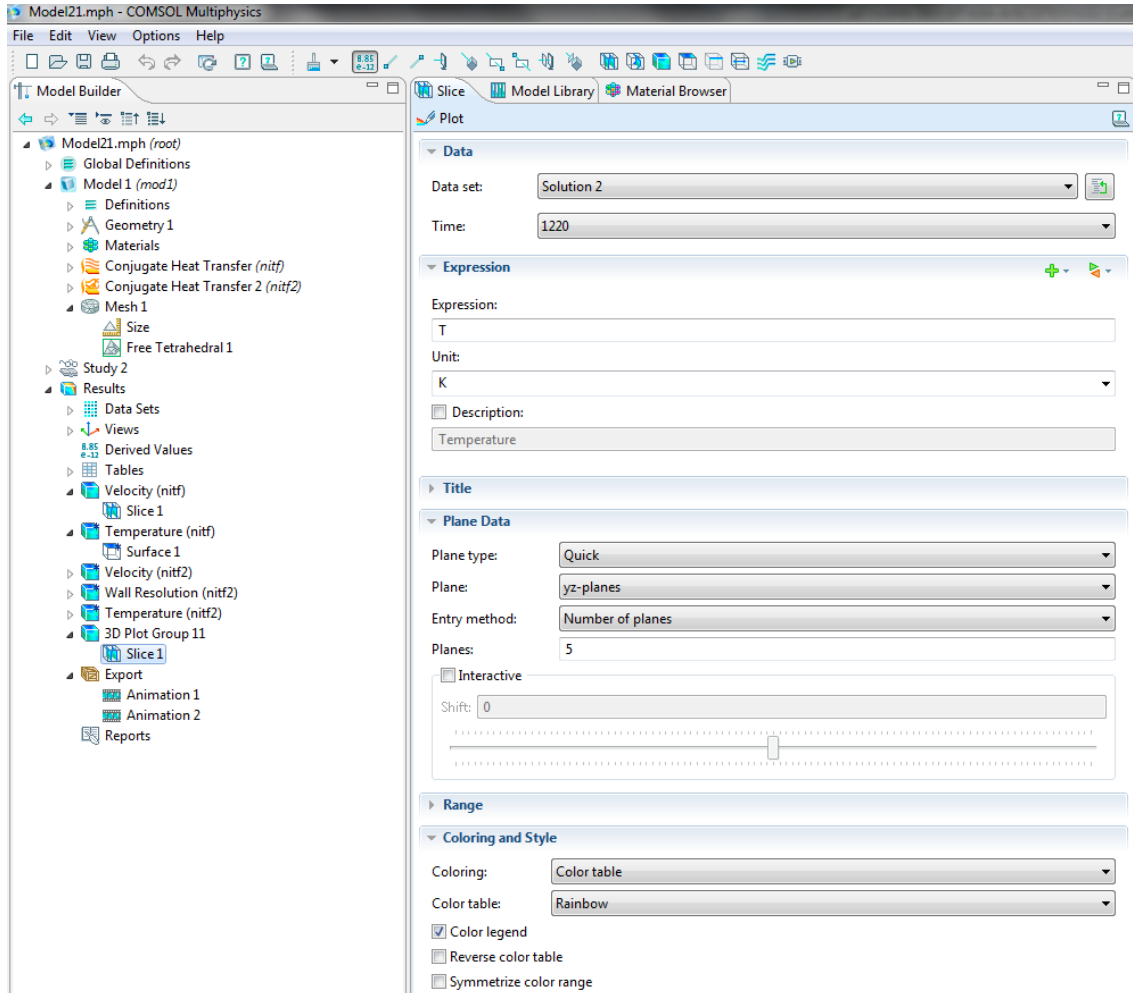
- Το χρονικό βήμα (time step).  
Πολλά μικρά χρονικά βήματα μας δίνουν καλύτερη εικόνα του υπό μελέτη μοντέλου σε ενδιάμεσες χρονικές στιγμές, επίσης όμως αυξάνουν το υπολογιστικό φορτίο .
- Το Χρονικό διάστημα (Διάρκεια μελέτης).  
Είναι σίγουρο ότι η μελέτη ενός φαινομένου σε μεγάλο βάθος χρόνου απαιτεί μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ και κατ' επέκταση χρόνο .



Σχήμα 7.38  
Εκκίνηση προσομοίωσης

## 7.9 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

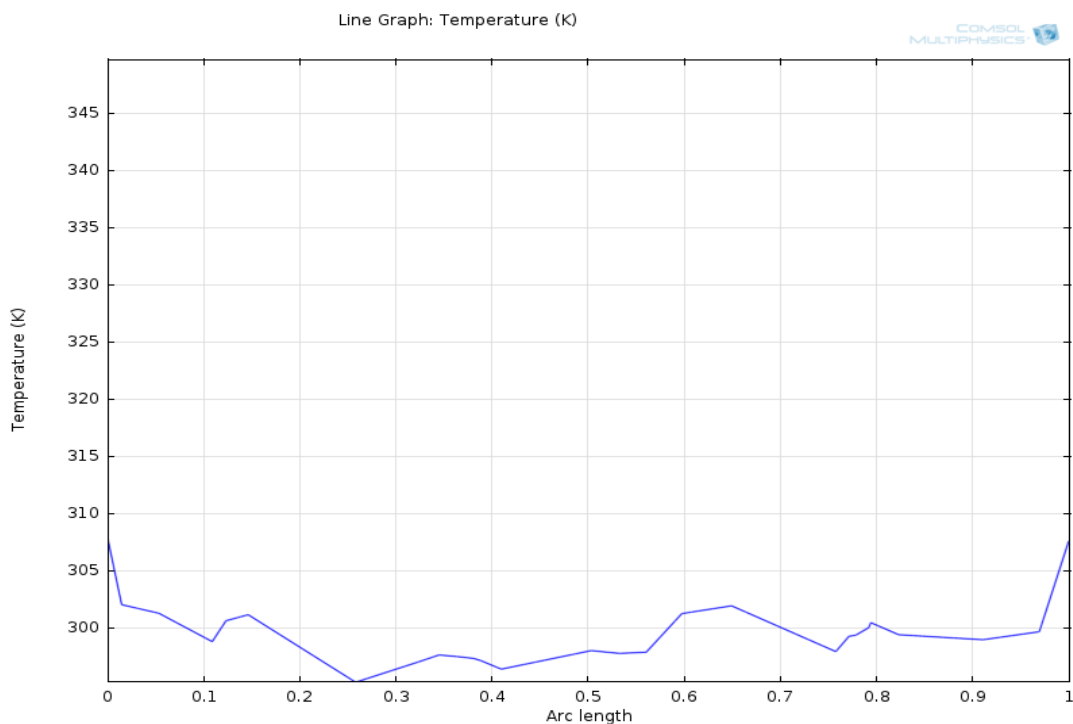
Μετά το τέλος των υπολογισμών τα αποτελέσματα μπορούν να βρεθούν Στο αριστερό πλαίσιο της οθόνης στον κόμβο results



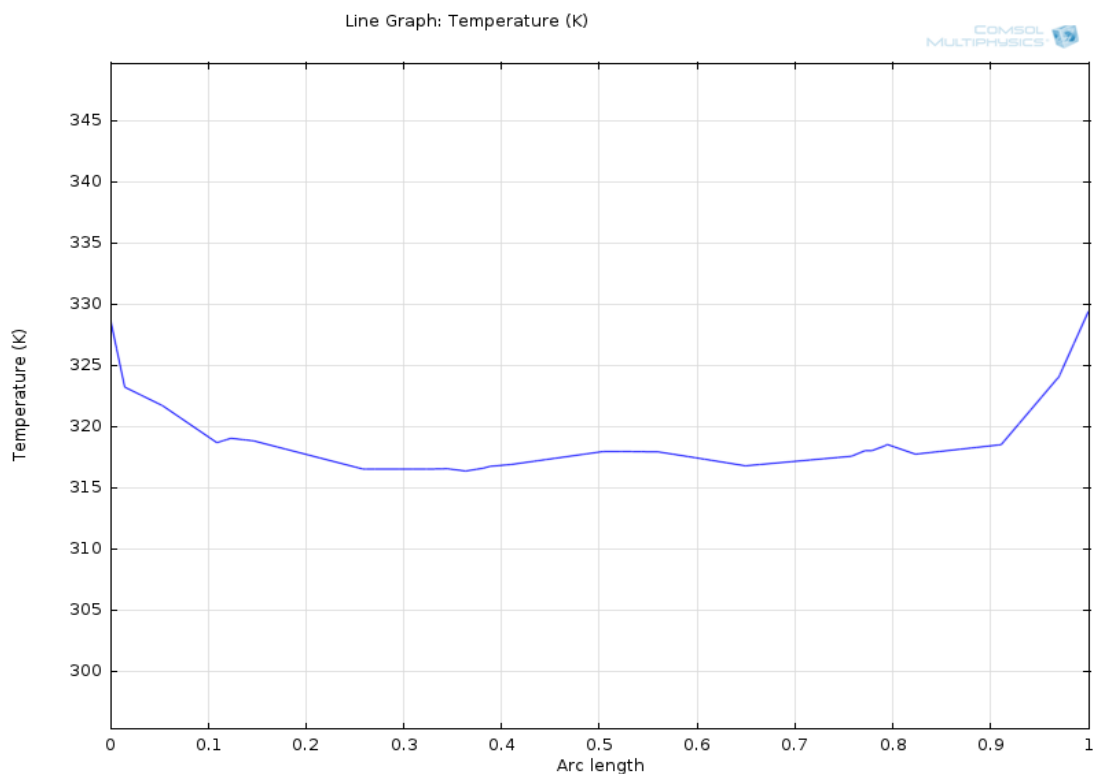
Σχήμα 7.39  
Δημιουργία διαγραμμάτων

Ο πιο χρήσιμος και αξιοποιήσιμος τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων για τον μηχανολόγο είναι με την μορφή διαγραμμάτων . Οι δυνατότητες που έχουμε είναι να δημιουργήσουμε διαγράμματα 1D, 2D και τρισδιάστατα 3D που δίνουν εξαιρετική εικόνα του φαινομένου .

### 7.9.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 1D Καθετος αξονας στη δεξαμενη r = 0.5m

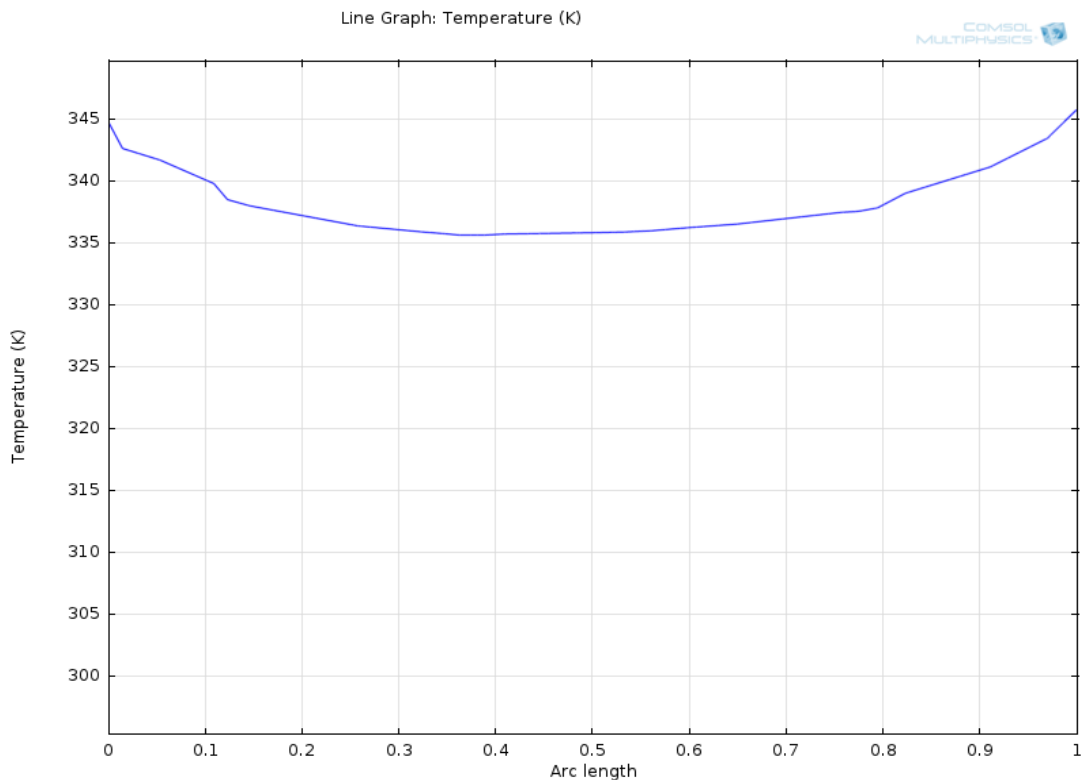


ΣχΣχήμα 7.34 ΔιΣχήΣχήμα 7.40  
Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά την εκκίνηση

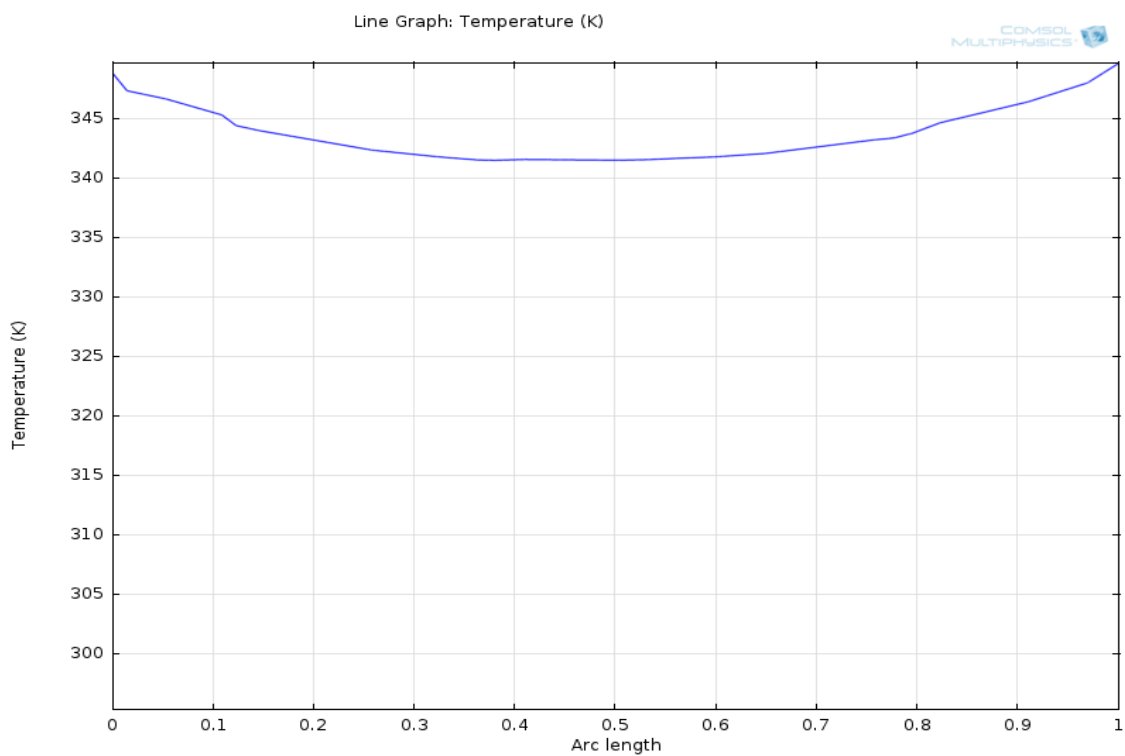


Σχήμα 7.41

Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά την εξέλιξη του φαινομένου



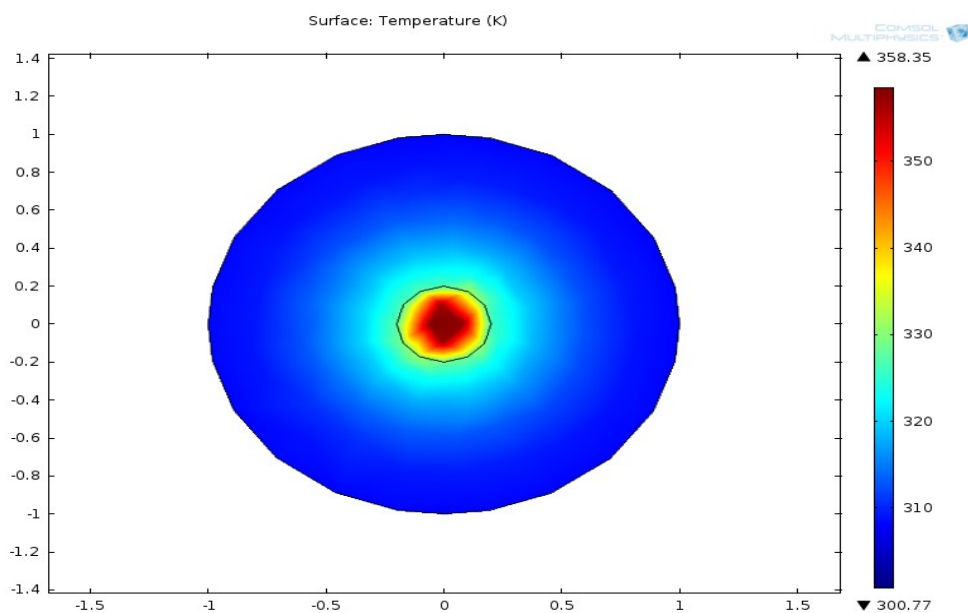
Σχήμα 7.42  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=10600\text{sec}$



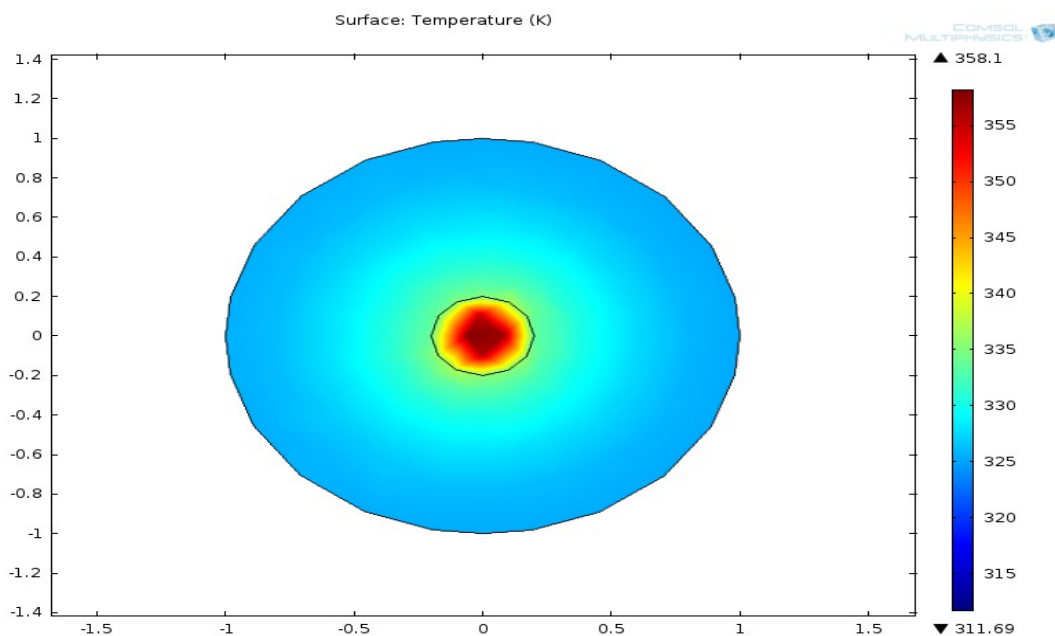
Σχήμα 7.43  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=18000\text{sec}$

## 7.9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 2D

Τομή σε επίπεδο παράλληλα με το επίπεδο της δεξαμενής που διέρχεται από το  $z = 0.5\text{m}$



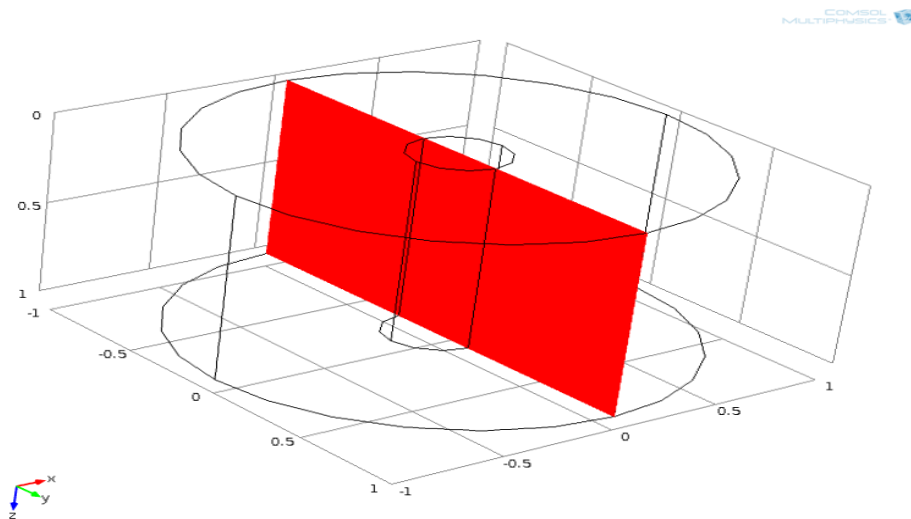
Σχήμα 7.44  
Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά την εκκίνηση



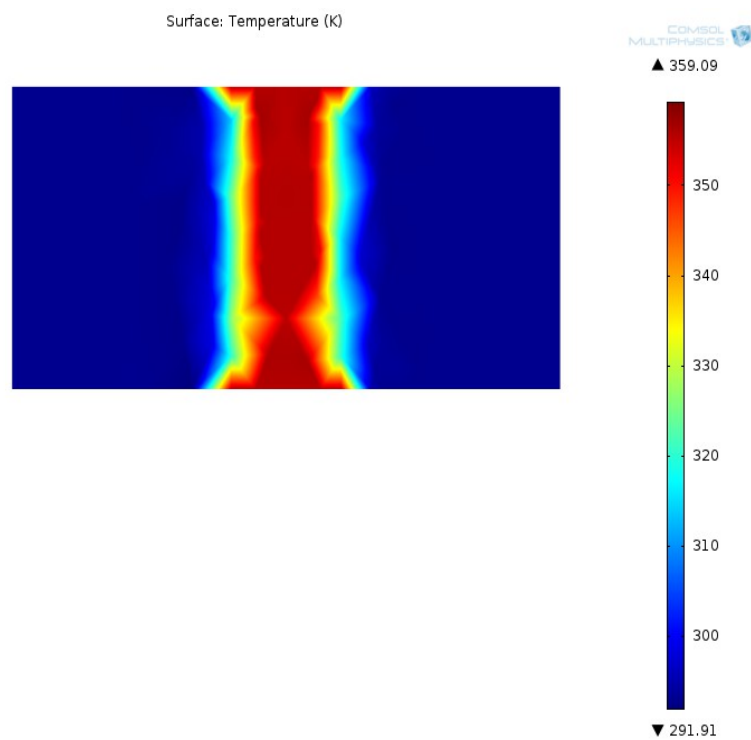
Σχήμα 7.45  
Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά την χρονική στιγμή  $t=600\text{sec}$

### 7.9.3 Παράλληλο Επίπεδο Στον Άξονα Της Δεξαμενής (2D)

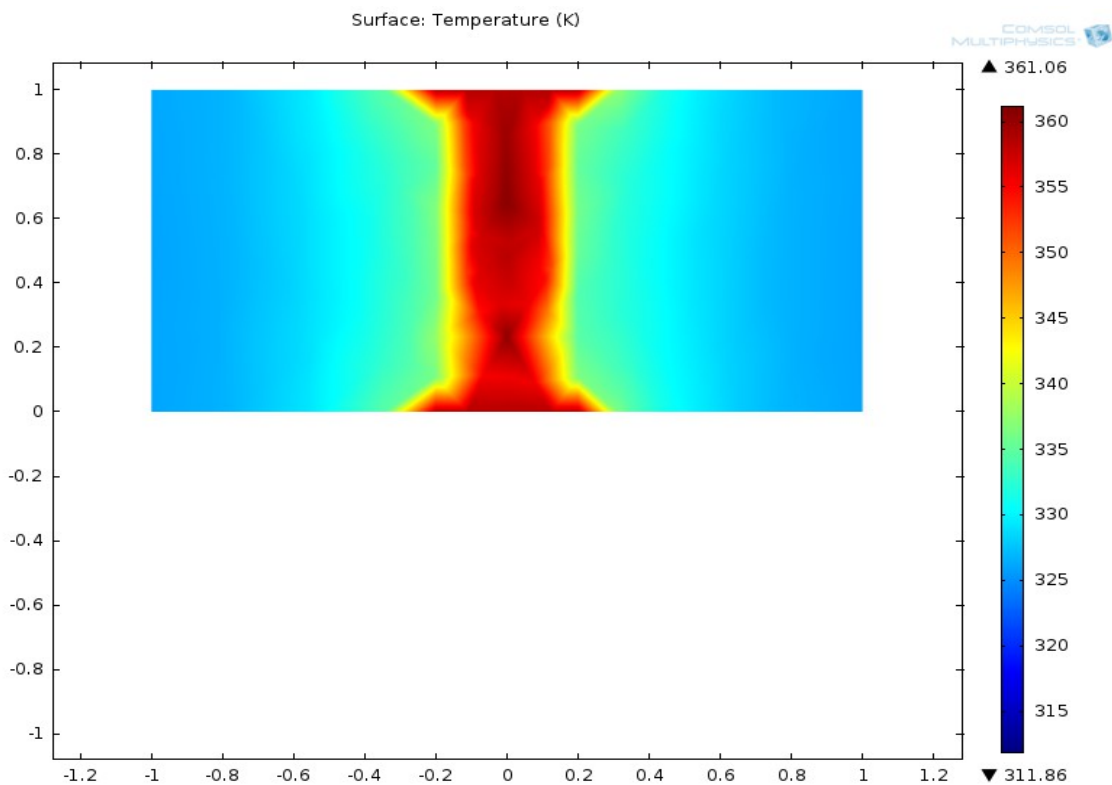
Για την καλύτερη μελέτη του φαινομένου της κάνουμε τομή σε επίπεδο παράλληλο στον άξονα της δεξαμενής που διέρχεται από το  $(x,y) (0,0)$



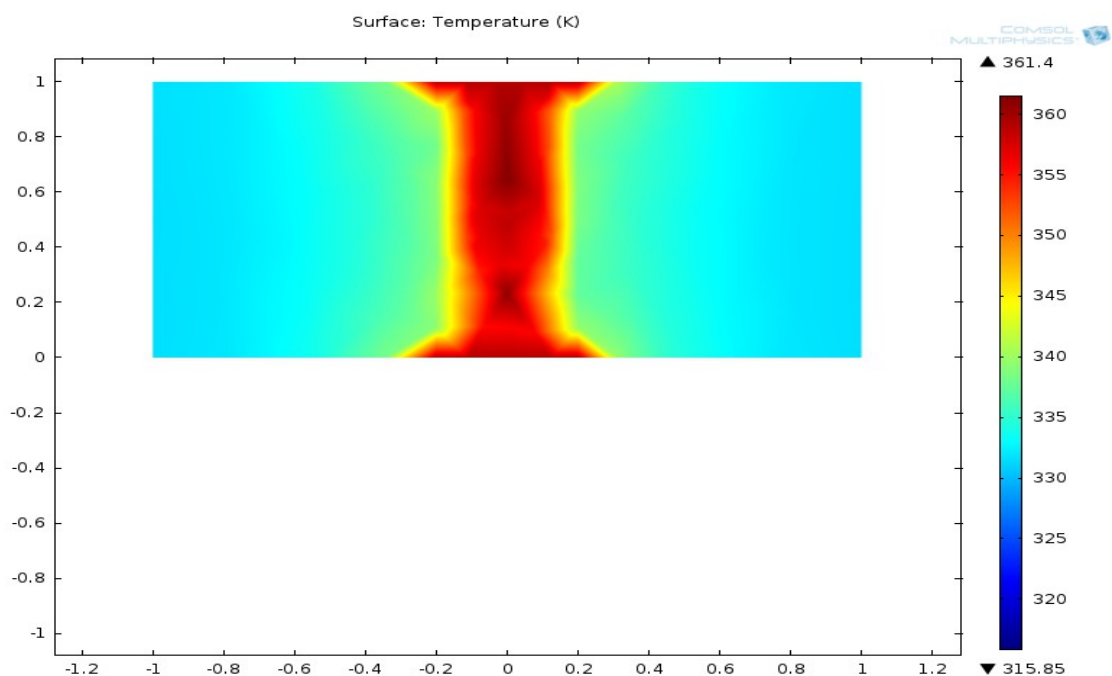
Σχήμα 7.46  
Τομή σε επίπεδο παράλληλο στον άξονα της δεξαμενής



Σχήμα 7.47  
Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά την χρονική στιγμή  $t=100\text{sec}$

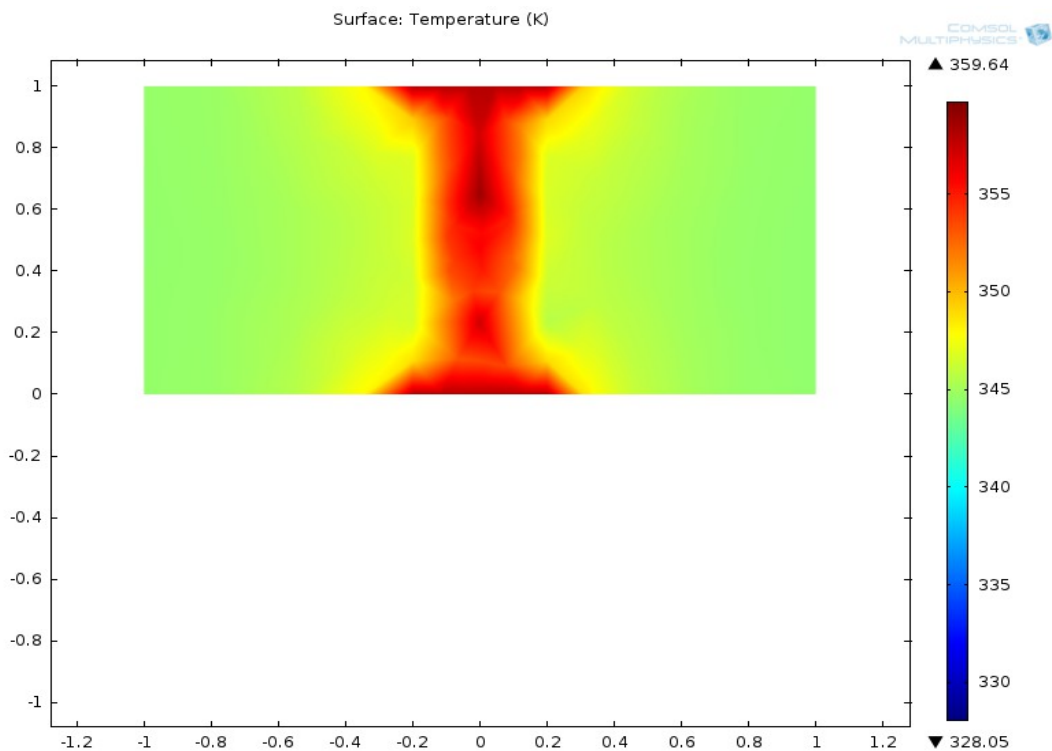


Σχήμα 7.48  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=1700\text{sec}$

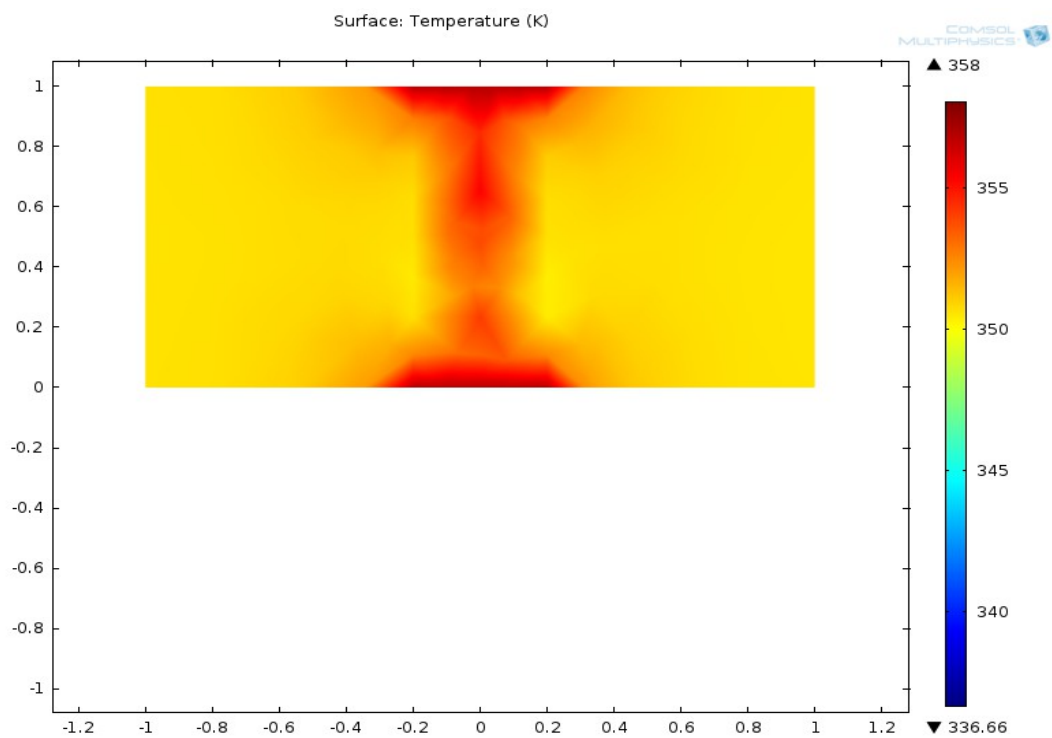


Σχήμα 7.49  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=2100\text{sec}$

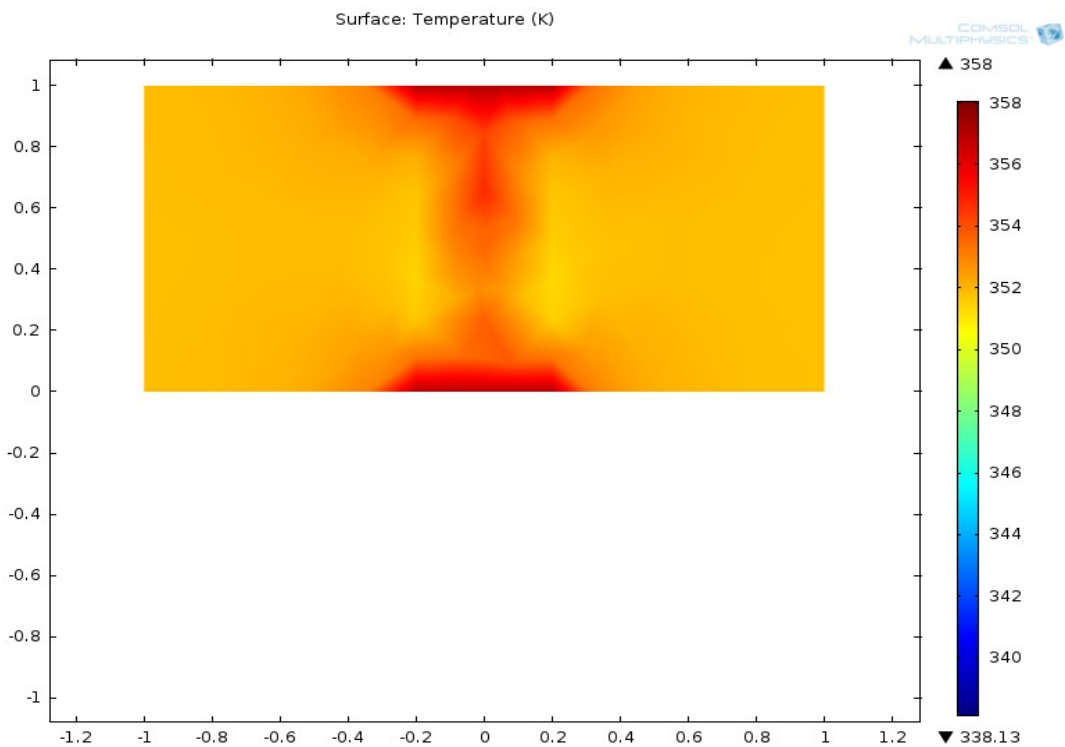




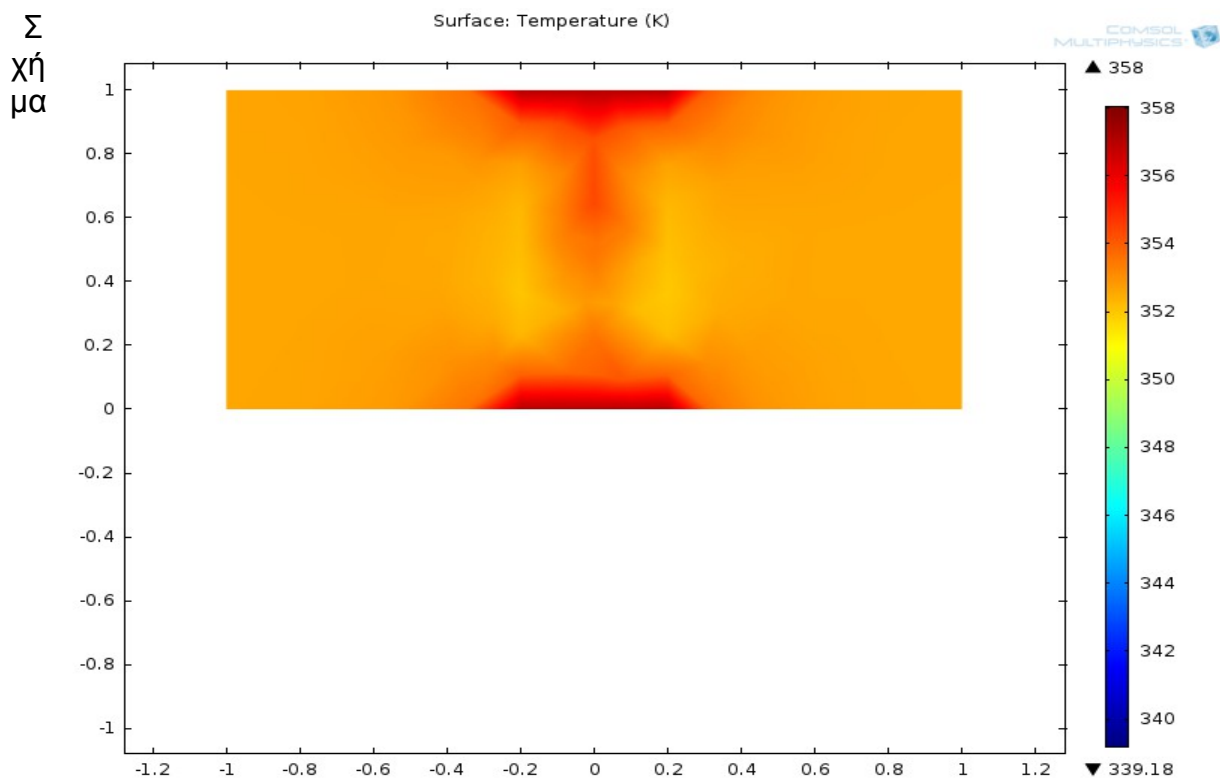
Σχήμα 7.50  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=6200\text{sec}$



Σχήμα 7.51  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=12700\text{sec}$

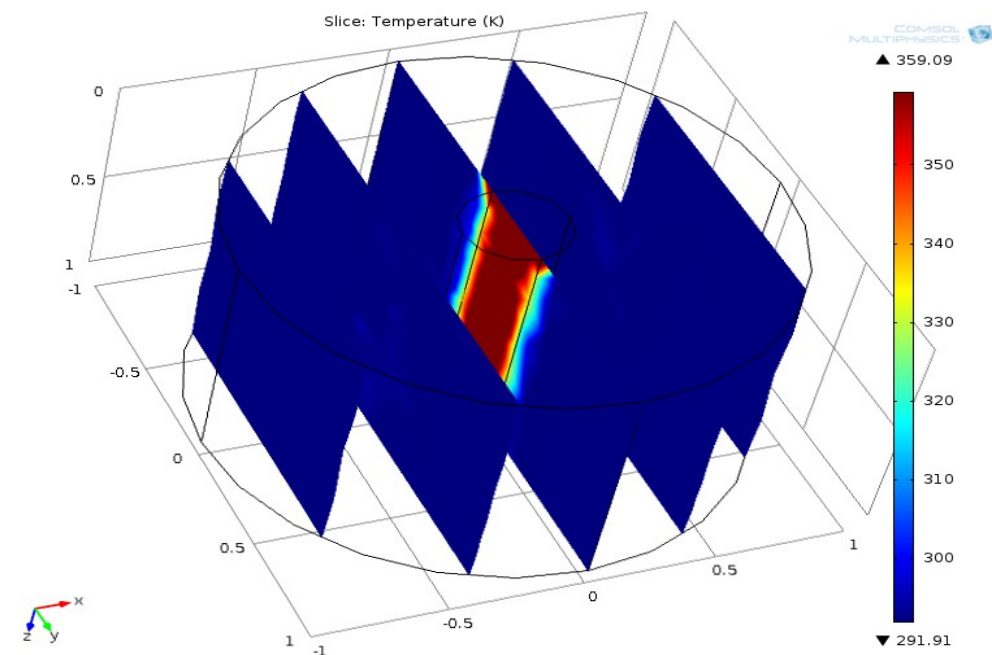


Σχήμα 7.52  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=15700\text{sec}$

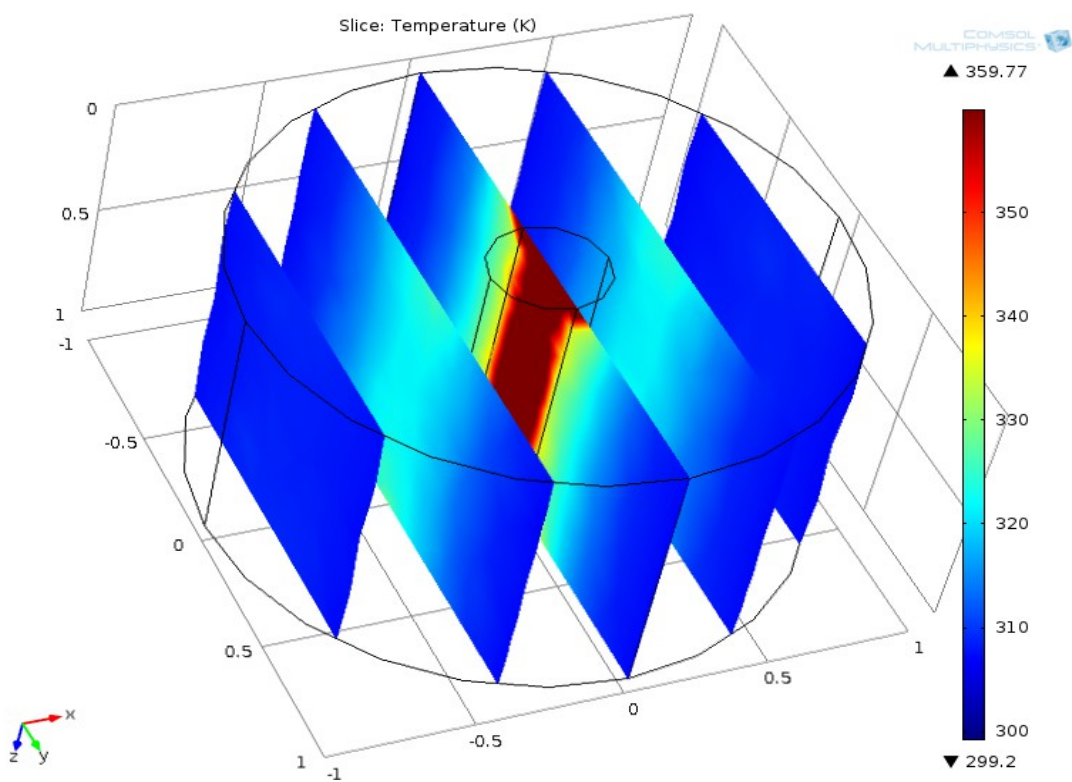


7.53  
 Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=18000\text{sec}$

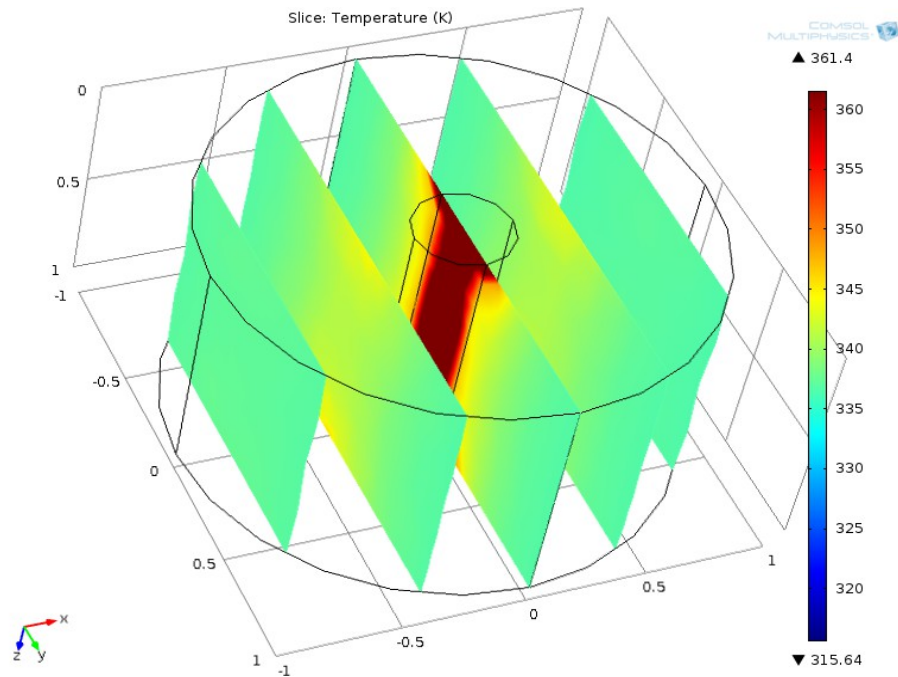
### 7.9.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D - Δεξαμενή με 1 Σωλήνα HTF



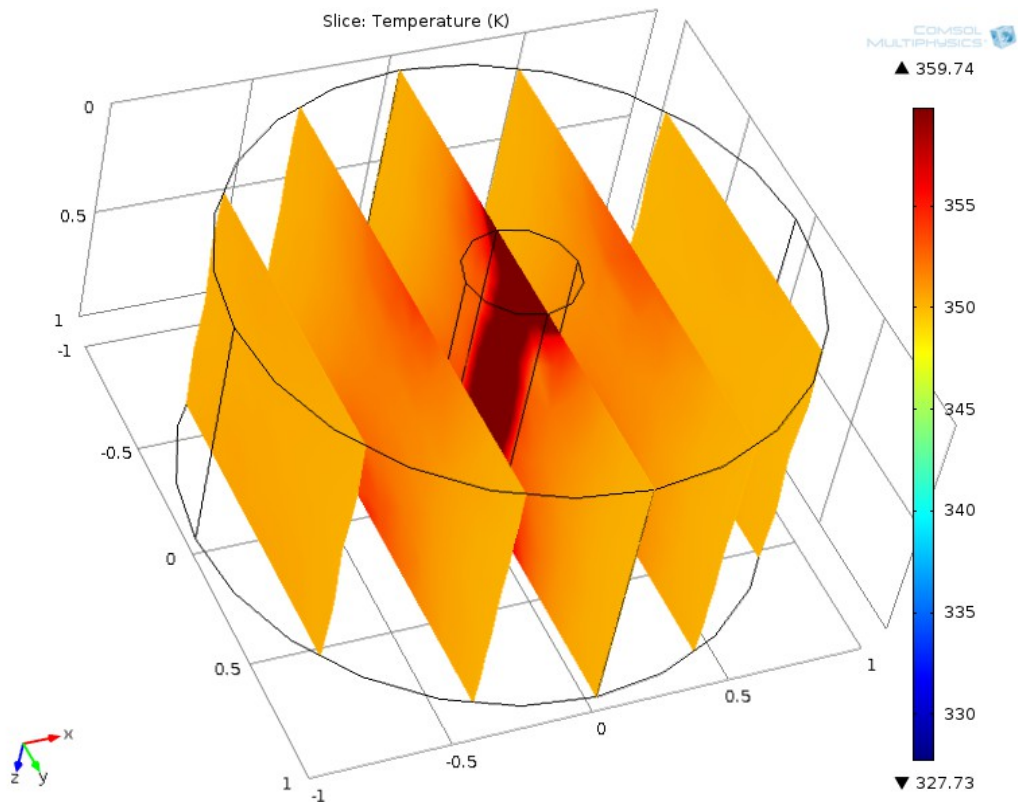
Σχήμα 7.54  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=50\text{sec}$



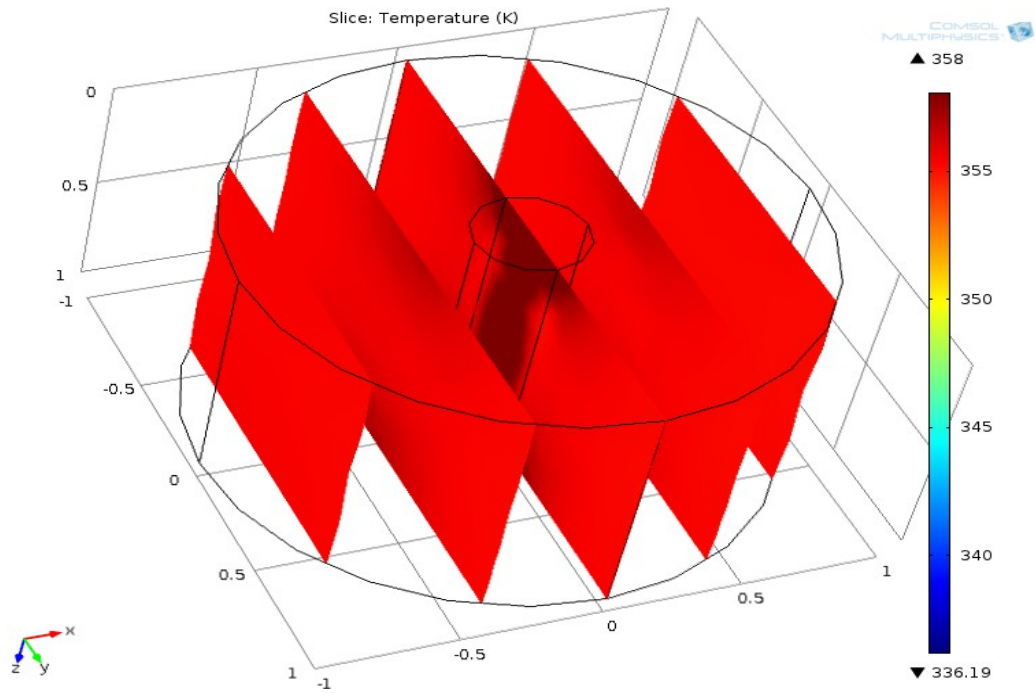
Σχήμα 7.55  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=700\text{sec}$



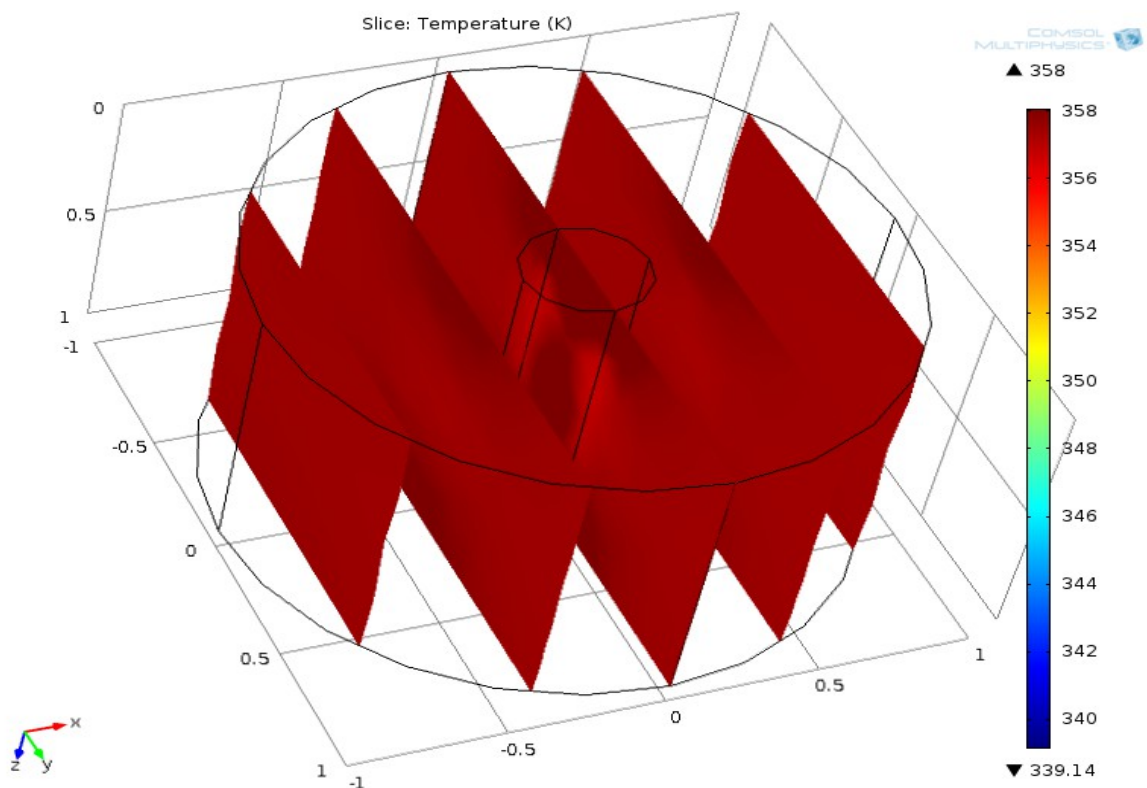
Σχήμα 7.56  
Τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=2100\text{sec}$



Σχήμα 7.57  
Τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=6200\text{sec}$

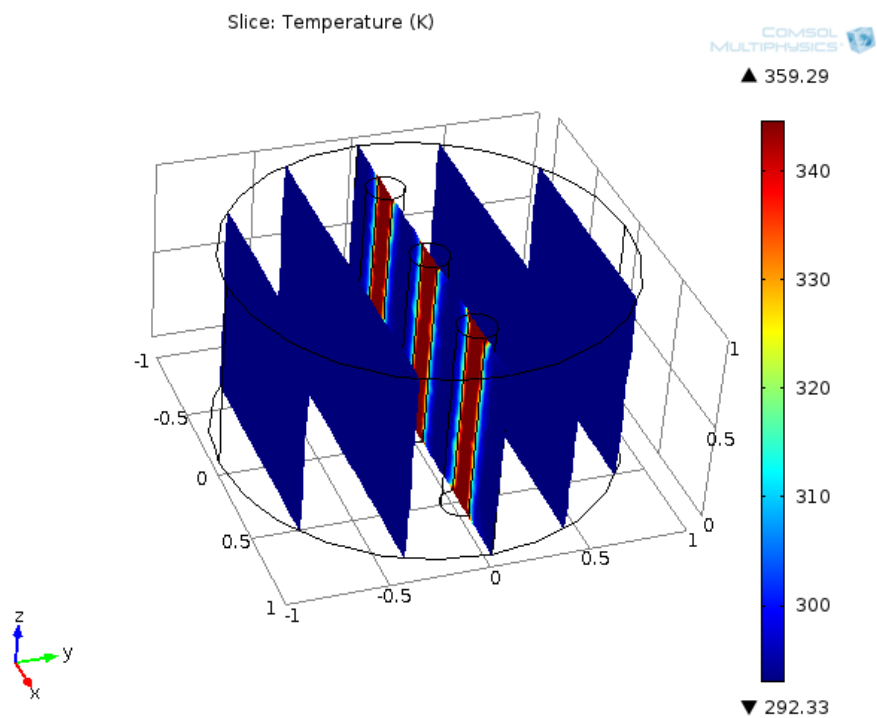


Σχήμα 7.58  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=12400\text{sec}$

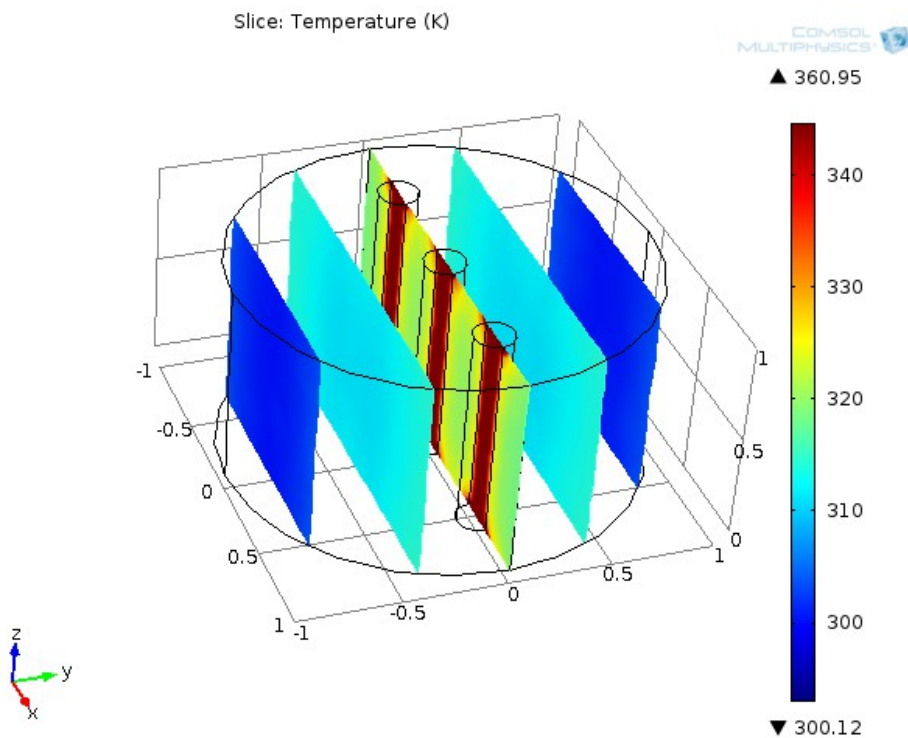


Σχήμα 7.59  
Τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=18400\text{sec}$

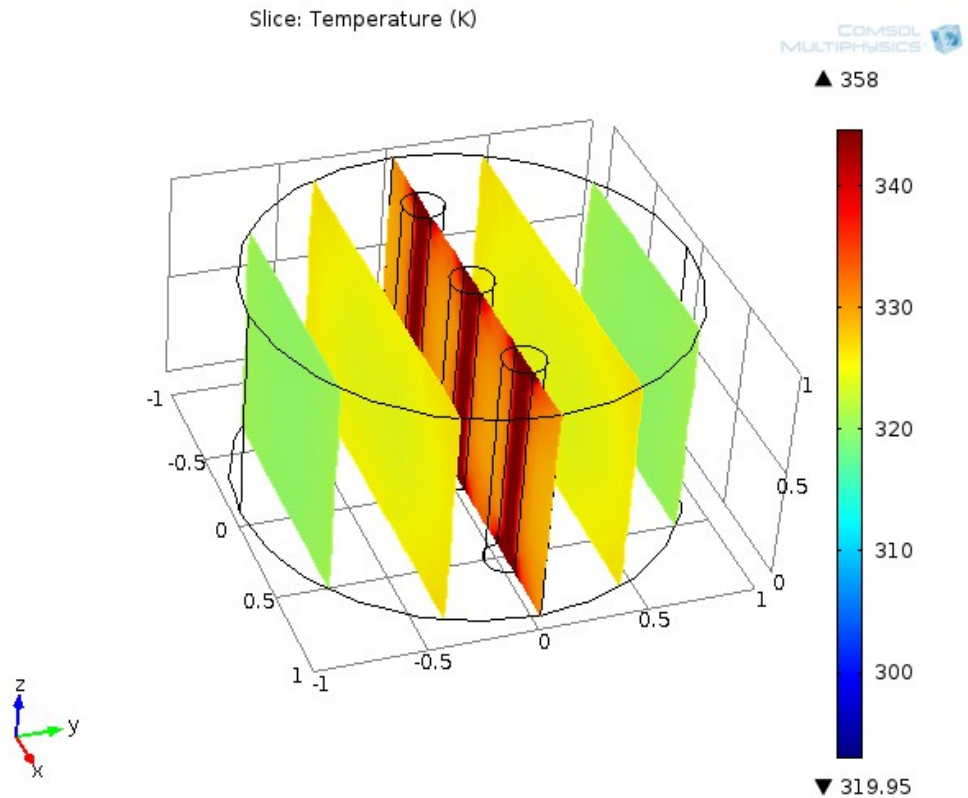
### 7.9.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D - Δεξαμενή με 3 Σωλήνες HTF



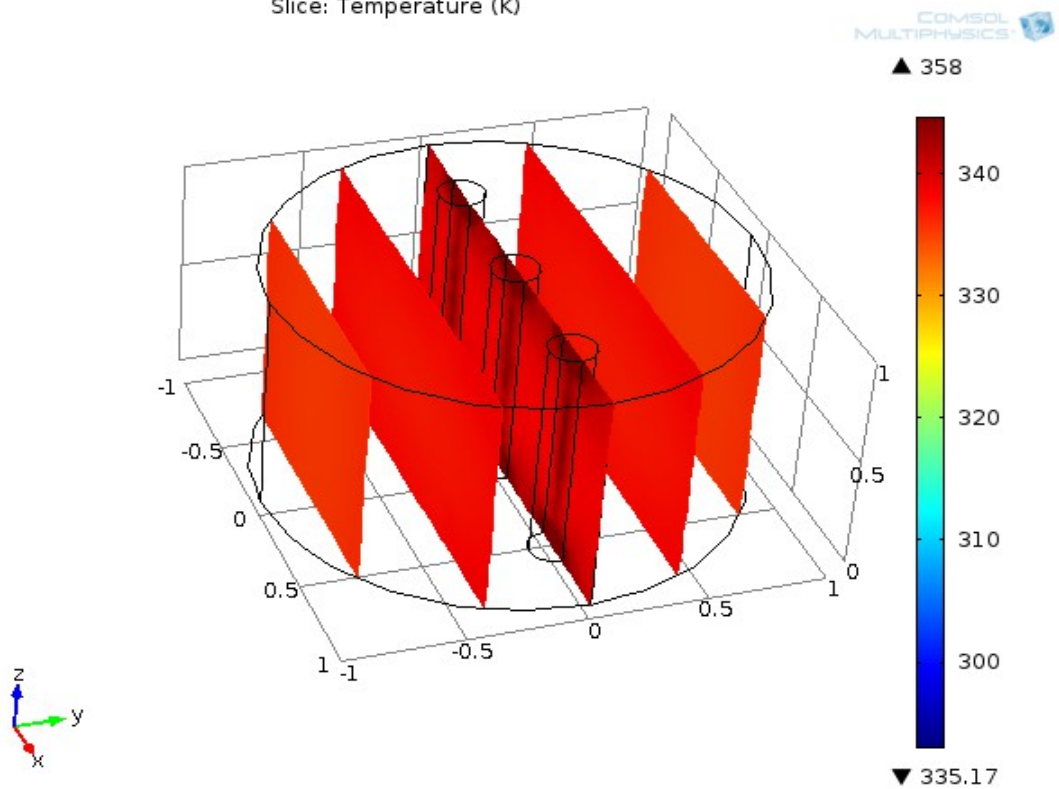
Σχήμα 7.60  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=50\text{sec}$



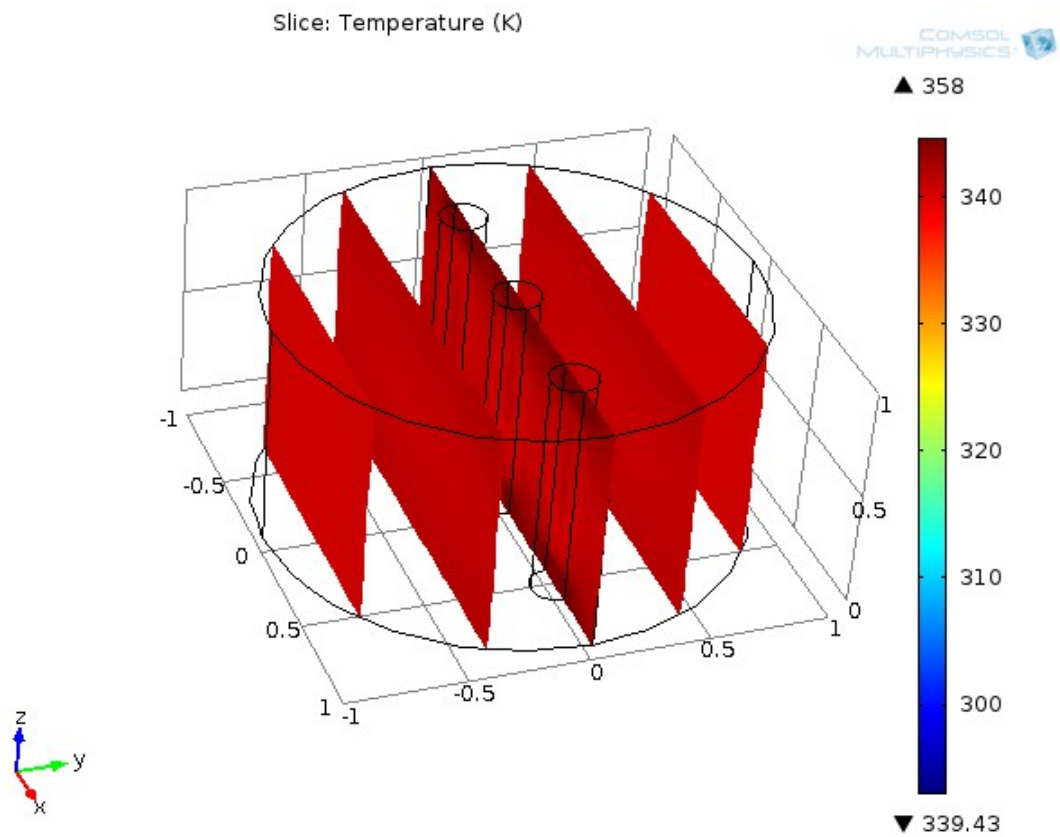
Σχήμα 7.61  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=700\text{sec}$



Σχήμα 7.62  
 Τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=2100\text{sec}$   
 Slice: Temperature (K)



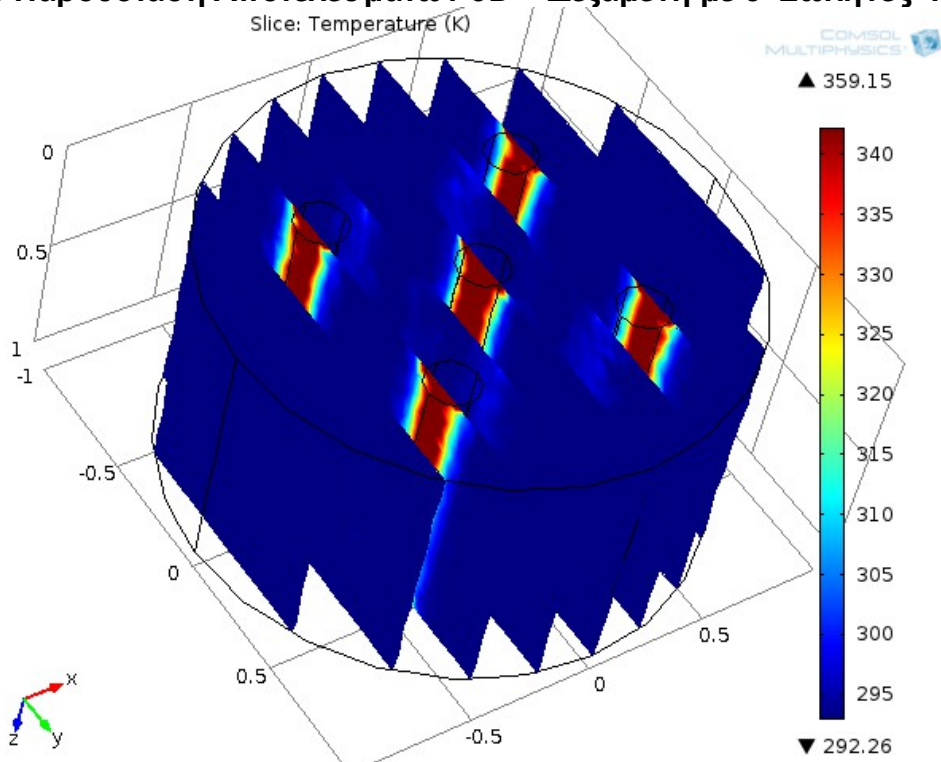
Σχήμα 7.63  
 Τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=6200\text{sec}$



Σχήμα 7.64  
Τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=9200\text{sec}$

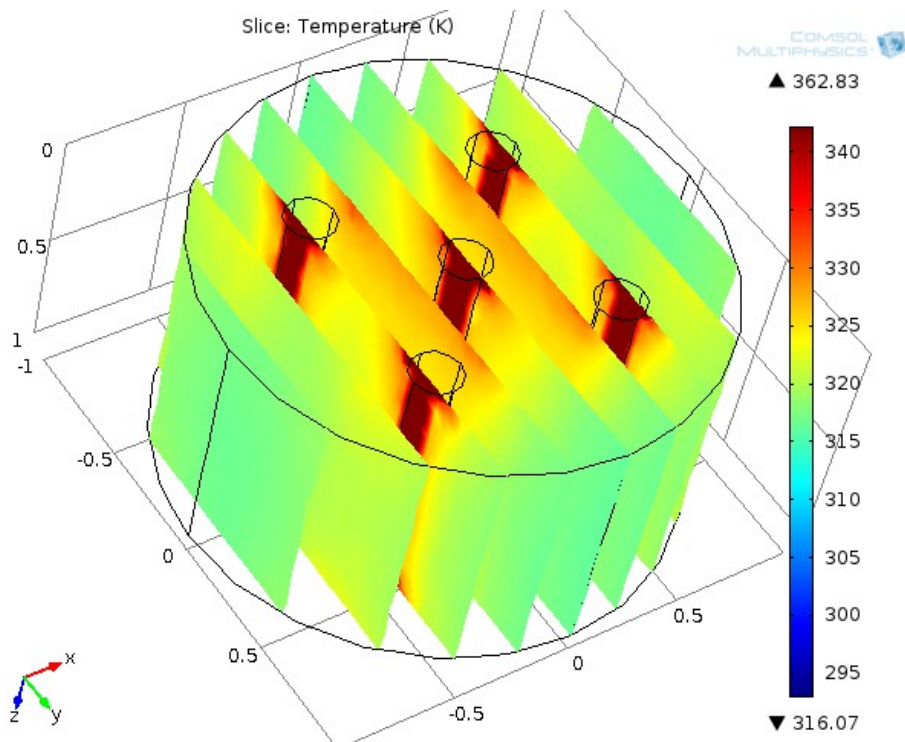


### 7.9.6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D - Δεξαμενή με 5 Σωλίνες HTF



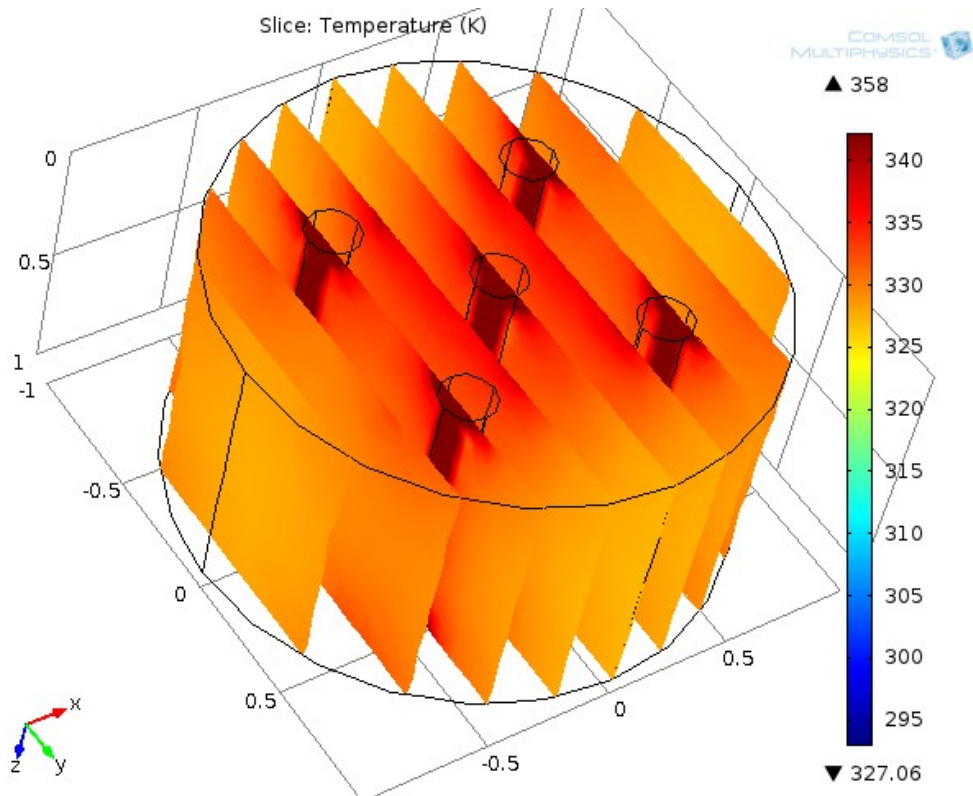
Σχήμα 7.65

Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά τη χρονική στιγμή  $t=50\text{sec}$

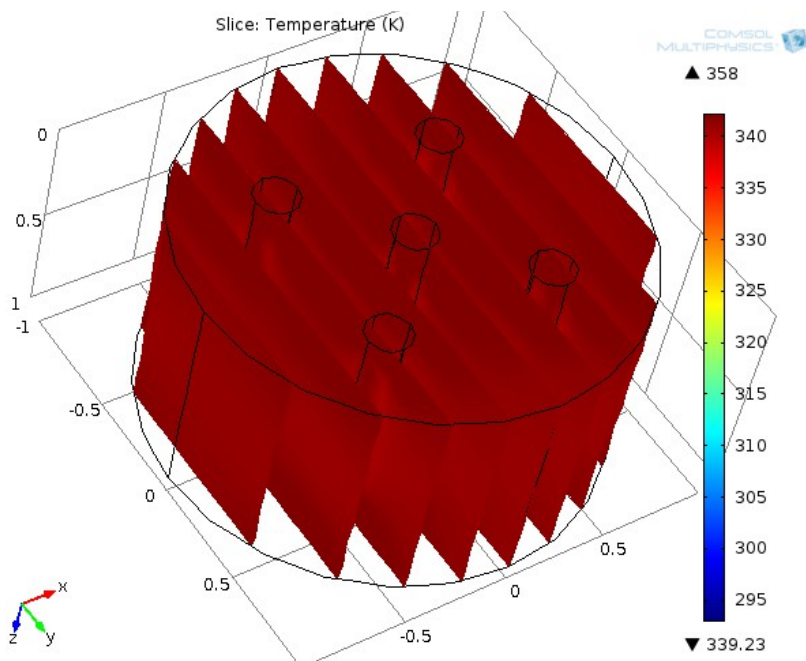


Σχήμα 7.66

Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά τη χρονική στιγμή  $t=700\text{sec}$



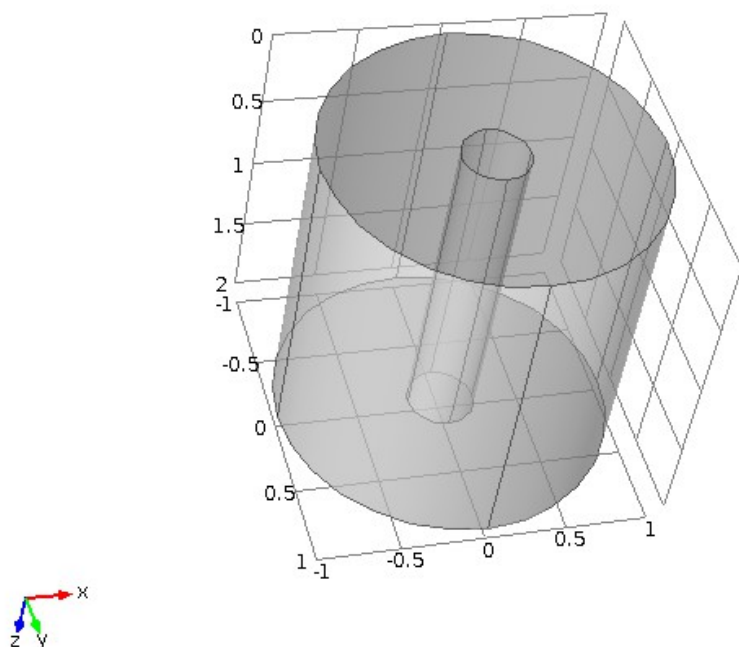
Σχήμα 7.67  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=2000\text{sec}$



Σχήμα 7.68  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=5400\text{sec}$

### 7.9.7 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D - Δεξαμενή με Ύψος (2m)

COMSOL  
MULTIPHYSICS



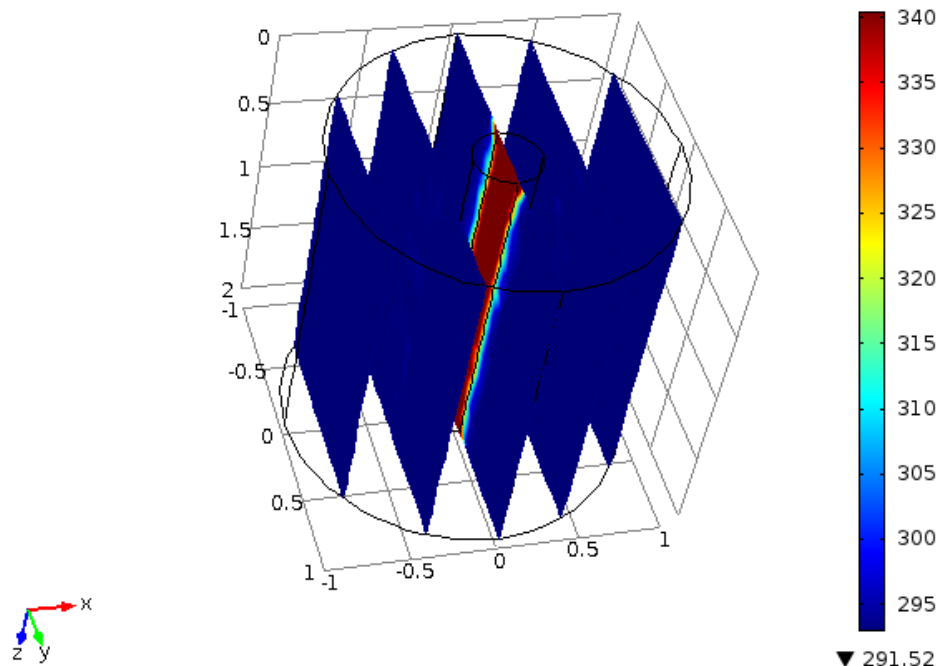
Σχήμα 7.69

Διαστάσεις δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας με ύψος 2m

Slice: Temperature (K)

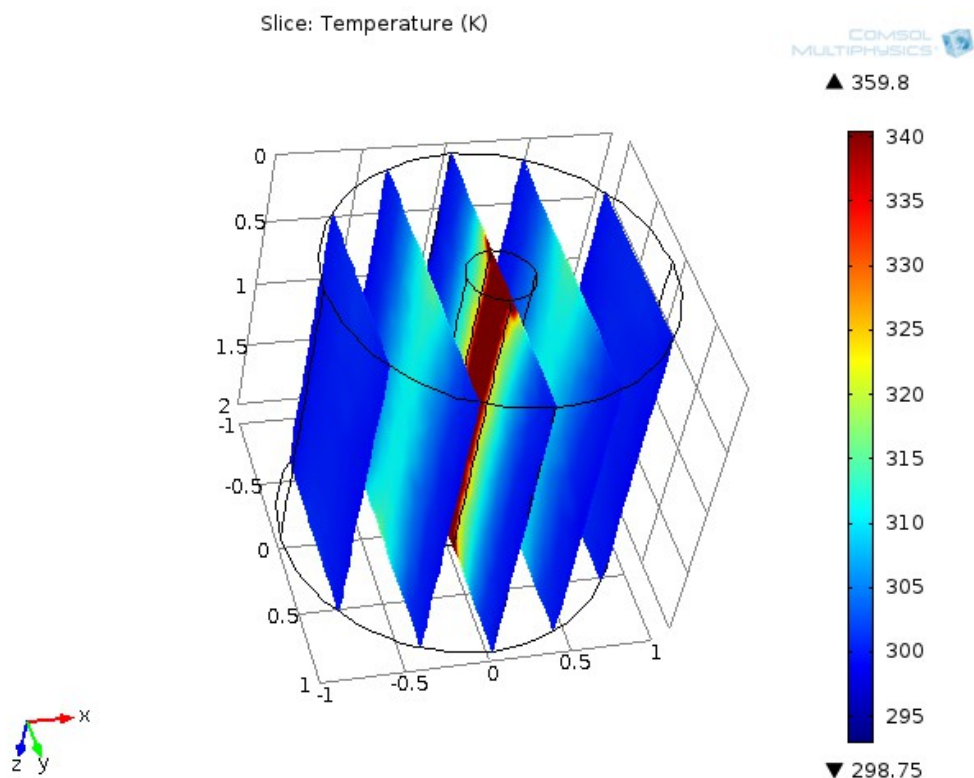
COMSOL  
MULTIPHYSICS

▲ 359.05

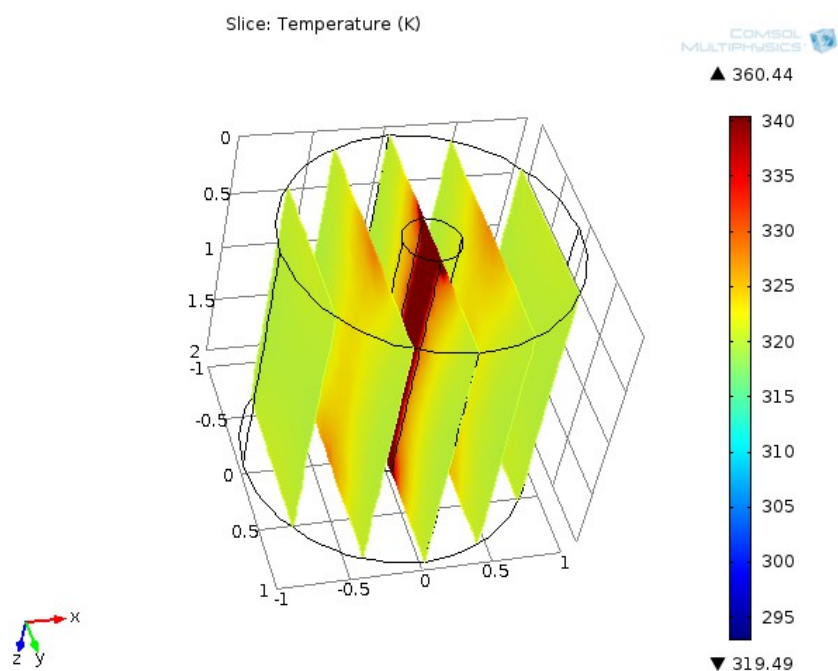


Σχήμα 7.70

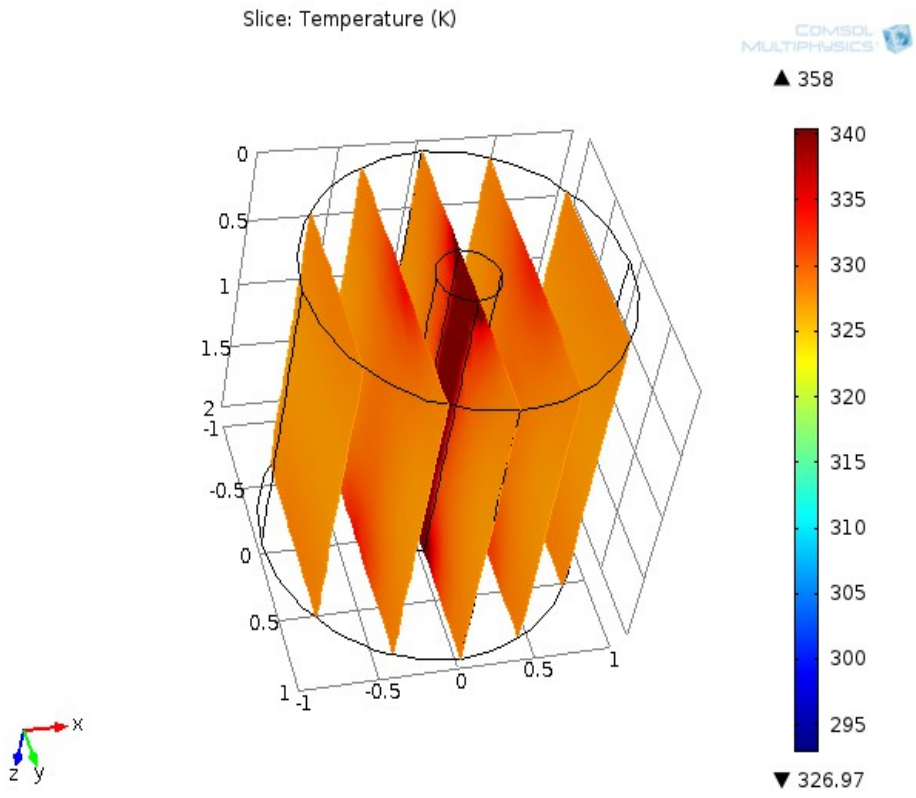
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά τη χρονική στιγμή  $t=0\text{sec}$



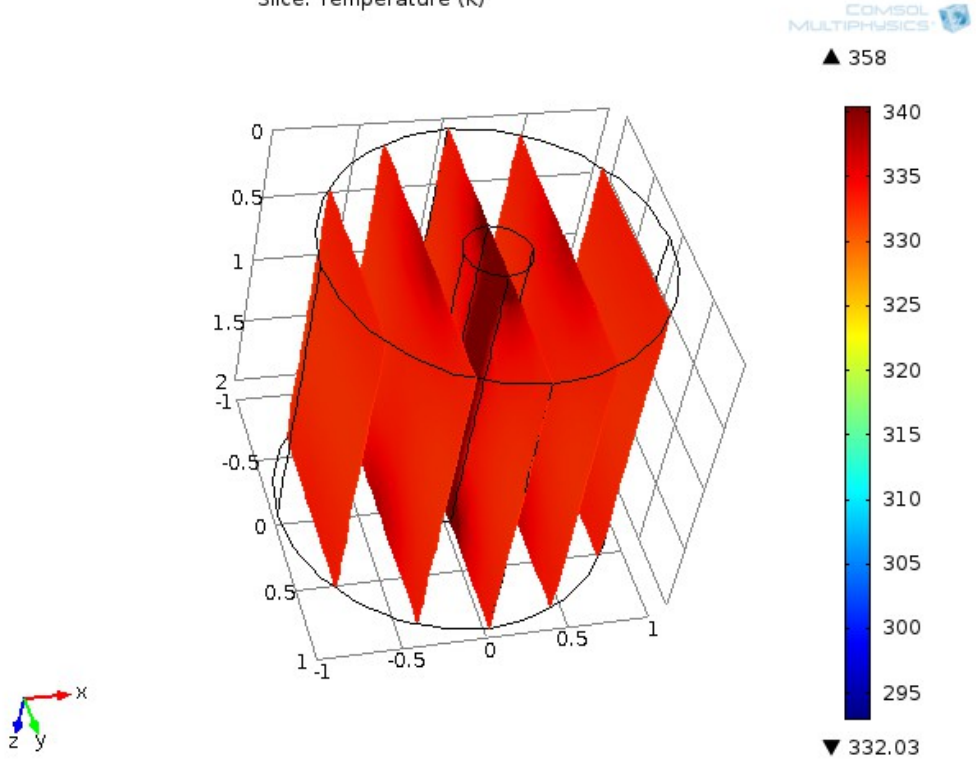
Σχήμα 7.71  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=700\text{sec}$



Σχήμα 7.72  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
κατά τη χρονική στιγμή  $t=3600\text{sec}$

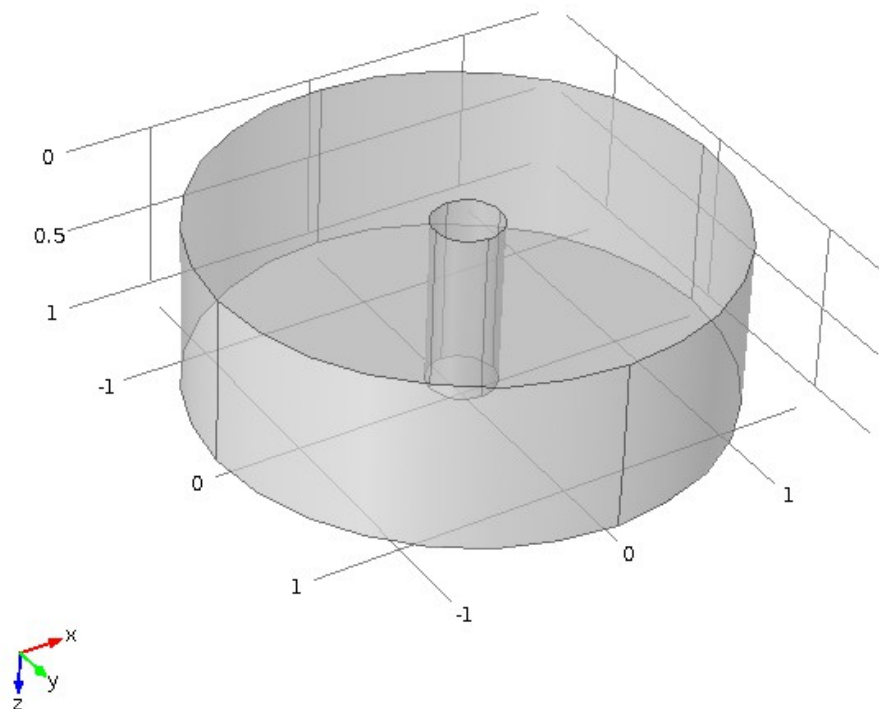


Σχήμα 7.73  
 Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=6800\text{sec}$   
 Slice: Temperature (K)

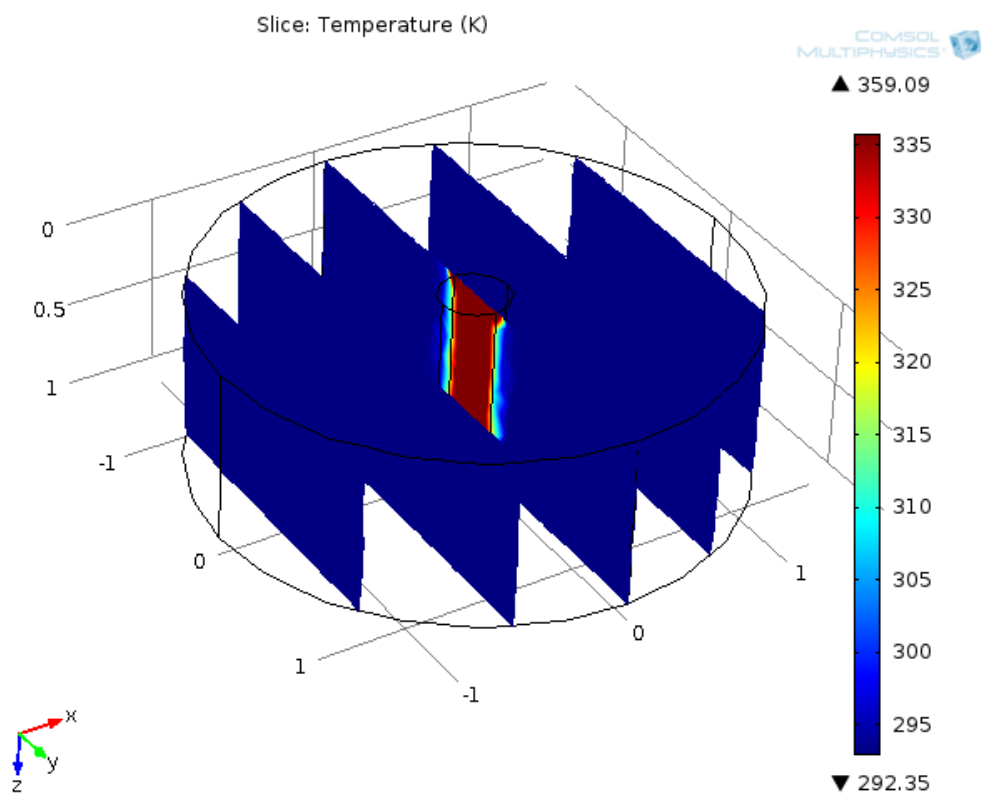


Σχήμα 7.74  
 Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=10800\text{sec}$

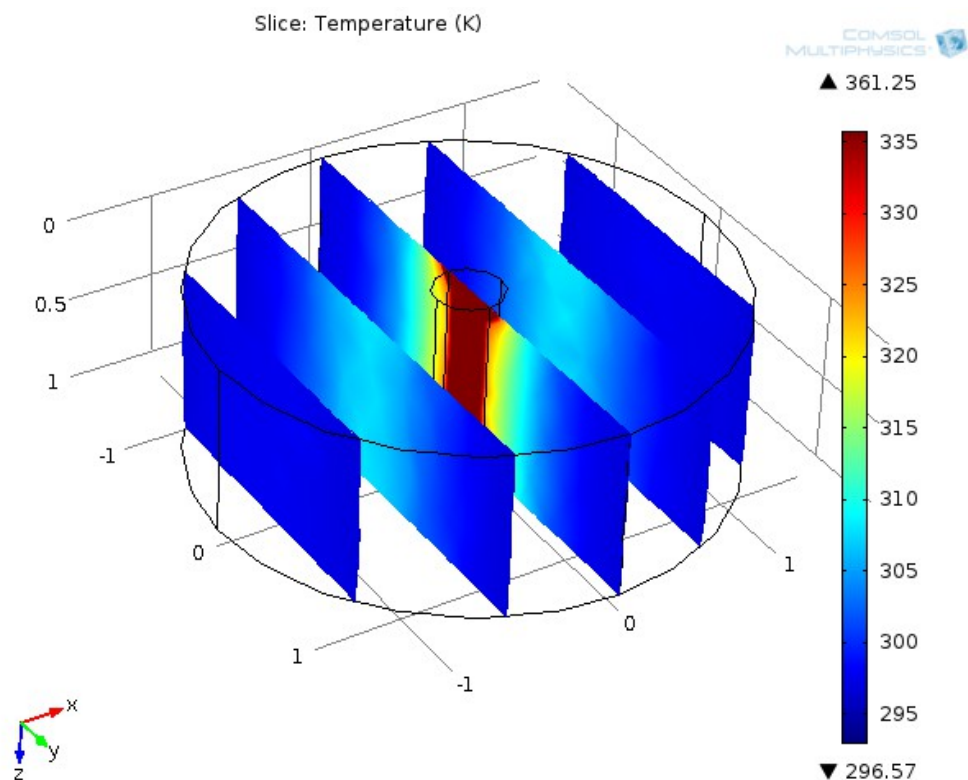
### 7.9.8 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 3D - Δεξαμενή με Πλάτος 3m



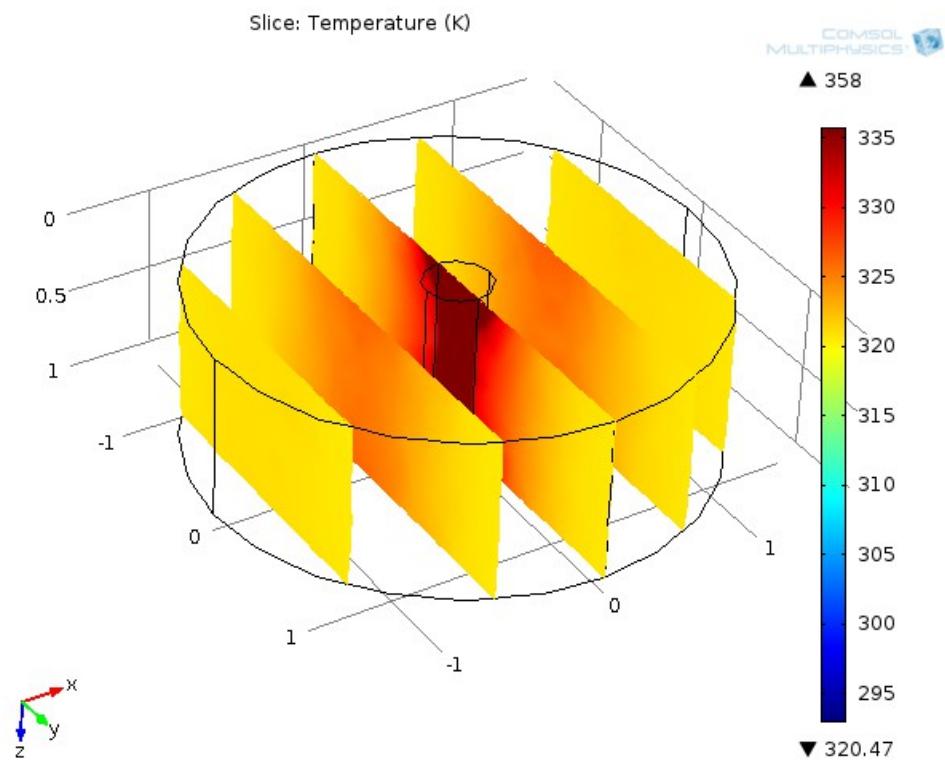
Σχήμα 7.75  
Διαστάσεις δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας με πλάτος 3m



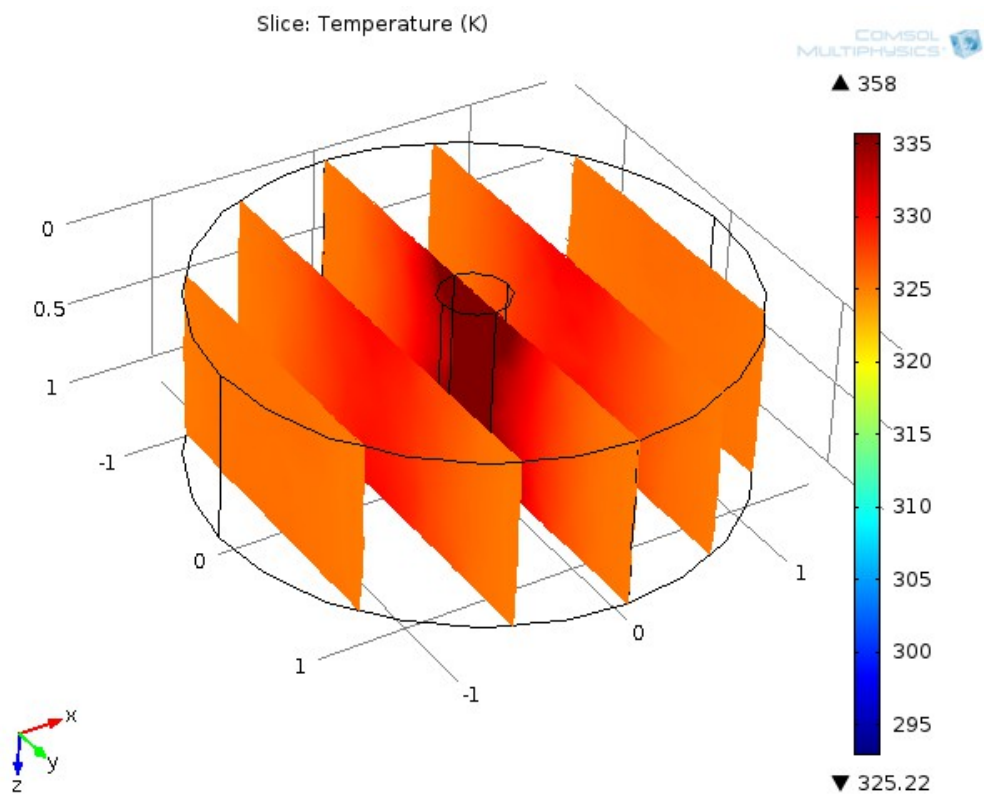
Σχήμα 7.76  
Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  κατά τη χρονική στιγμή  $t=0\text{sec}$



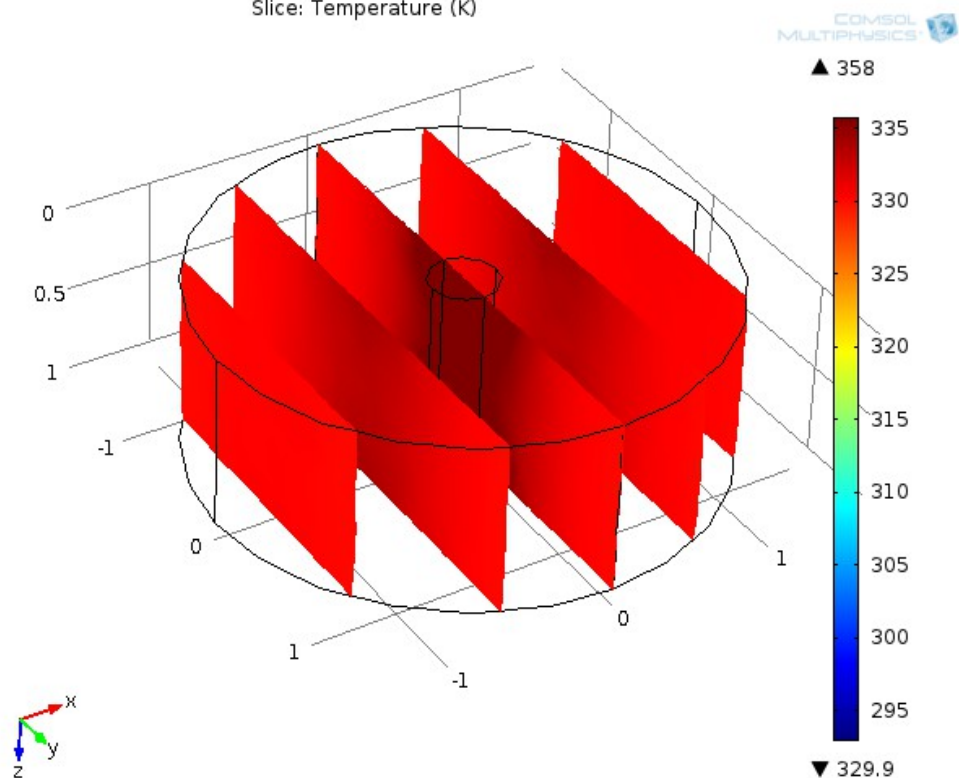
Σχήμα 7.77  
 Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=1400\text{sec}$



Σχήμα 7.78  
 Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=6800\text{sec}$



Σχήμα 7.79  
 Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=10800\text{sec}$   
 Slice: Temperature (K)



Σχήμα 7.80  
 Τρισδιάστατο Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας σε  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   
 κατά τη χρονική στιγμή  $t=14400\text{sec}$



## 8 . ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη αυτή δείχνει ότι είναι δυνατή η αξιόπιστη προσομοίωση του σύνθετου προβλήματος των συστημάτων LHTES με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και προγραμμάτων προσομοίωσης, όπως το COMSOL. Η προσομοίωση μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε εικόνα της διαδικασίας στο εσωτερικό της δεξαμενής και της συμπεριφοράς του υλικού PCM προτού την κατασκευάσουμε .

Η γνώση της επίδρασης των παραγόντων στο εσωτερικό είναι απαραίτητη για τη σωστή σχεδίαση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας . Τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι ποικίλα και αρκετά στον αριθμό.

- Επιλογή μεγάλων διαστάσεων δεξαμενής πιθανόν θα σημαίνει ότι δε θα γίνεται εκμετάλλευση όλου του PCM κατά την φάση της τήξης.
- Επιλογή ακατάλληλου υλικού αποθήκευσης θερμότητας PCM θα οδηγήσει σε μικρή ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας με αποτέλεσμα να μην εκμεταλλευόμαστε πλήρως την διαθέσιμη ενέργεια (απόρριψη θερμικού φορτίου).
- Επιλογή μικρού αριθμού σωλήνων μεταφοράς του HTF δε θα θερμάνει έγκαιρα τη δεξαμενή.
- Επιλογή μικρής διάστασης των σωλήνων μεταφοράς του HTF επίσης δε θα επιτρέψει τη έγκαιρη θέρμανση της δεξαμενής.
- Αντίστροφα υπέρ-διαστασιολόγηση σε κάποιον από τους παραπάνω παράγοντες θα οδηγήσει σε σπατάλη ενέργειας .

Η ενέργεια που μας παρέχεται από τον Ήλιο έχει περιορισμένη χρονική διάρκεια εντός του 24ωρου γεγονός που σημαίνει ότι για να έχουμε καλή απόδοση του συστήματος πρέπει να επιτύχουμε την τήξη όλου του υλικού PCM χρησιμοποιώντας το πλεόνασμα θερμικής ενέργειας που θα έχουμε κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας.

Χάρη στη μοντελοποίηση της δεξαμενής και προσομοίωση της διαδικασίας φόρτισής της για διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας της μπορούμε να υπολογίσουμε πριν την κατασκευή την επίδραση παραγόντων όπως :

- Οι διαστάσεις της δεξαμενής
- Ο αριθμός των σωλήνων μεταφοράς του HTF
- Η διάσταση των σωλήνων μεταφοράς του HTF

Η μελέτη παρουσιάζει αποτελέσματα για την χρονικά μεταβαλλόμενη κατάσταση και τη λειτουργία, θερμική φόρτιση στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτών των συστημάτων. Τα παρεχόμενα από αυτή τη μοντελοποίηση και προσομοίωση αποτελέσματα και συμπεράσματα είναι ανεξάρτητα από το μέγεθος του πλέγματος. Γίνεται αναφορά στις γνώσεις που απαιτούνται για αξιόπιστη πρόγνωση του μετακινούμενου μετώπου τήξης, το ρόλο αδιάστατων μεταβλητών και τα χρονικά πλαίσια εξέλιξης.

Η επίδραση της συναγωγής μέσα στο ρευστό PCM στην απόδοση του συστήματος LHTEs εκτιμούνται. Οι εκτιμήσεις αυτές διευκολύνουν την πλήρη μοντελοποίηση CFD των αποτελεσμάτων της συναγωγής.

## 9 . ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbott MB, BD. 1989. Computational Fluid Dynamics—An Introduction For Engineers. NY: Longman/Wiley.
- Agyenim F, HN. 2010. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14:615–628.
- Bauer T, LD. 2009. Sodium Nitrate for High Temperature Latent Heat Storage. International Conference on Thermal Energy Storage- Effstock. :14-17.
- C, N. 2007. The Zero-phase Stefan Problem. International Journal of Heat and Mass Transfer. 50:4614–4622.
- Castell A, SC. 2008. Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins. Applied Thermal Engineering. 28: 1676–1686.
- Chantasiriwan S, JB. 2009. The Method of Fundamental Solutions for Free Surface Stefan problems. Engineering Analysis with Boundary Elements. 33:529–538.
- Delhaye, JM. 1974. Jump Conditions and Entropy Sources in Two Phase. International Journal Multiphase Flow. 1:395-409.
- Esen M, AT. 1996. Development of a Model Compatible with Solar Assisted Cylindrical Energy Storage Tank and Variation of Stored Energy with Time for Different Phase Change Materialse For. Energy Conversion Management. 37 (12):1775-1785.
- Incropera DB. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Sixth ed. :Wiley.
- J, M. 2004. Numerical Simulation of Melting in Two-dimensional. Journal of Computational Physics. 198:243–264.
- Kenisarin M, MK. 2007. Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 11:1913–1965.
- Michels H, PP. R. 2007. Cascaded Latent Heat Storage for Parabolic Trough Solar Power Plants. Solar Energy. 81:829–837.
- Mitra S, NA. 2011. A Quasi One-dimensional Method and Results for Steady Annular/Stratified Shear and Gravity Driven Condensing Flows. International

Journal of Heat and Mass Transfer. 54:3761-3776.

- <http://www.comsol.com/>
- <http://www.comsol.com/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>

