

**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης**  
**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας**



**Πτυχιακή Εργασία**  
**Θερμική ανάλυση σε λογισμικό με χρήση πεπερασμένων στοιχείων**

**Σπουδαστής: Κουτεντάκης Αλέξανδρος**  
**Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Πετούσης Μάρκος**

**Ηράκλειο 2013**

## Περιεχόμενα

<b>i) Εισαγωγή:</b> .....	<b>2</b>
<b>Κεφάλαιο 1:Βασικές έννοιες θερμότητας</b> .....	<b>3</b>
1.1) Θερμότητα (heat) .....	3
1.2) Μεταφορά θερμότητας (heat transfer).....	4
1.3) Αγωγή (conduction).....	5
1.4) Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity).....	6
1.5) Θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity).....	15
1.6) Συναγωγή (convection).....	15
1.7) Ακτινοβολία (radiation) .....	17
<b>Κεφάλαιο 2:Θεωρητική εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία</b> .....	<b>18</b>
2.1)Εισαγωγικά σχετικά με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων(Finite Element Analysis) .....	18
2.2)Η βασική ιδέα της FEA μεθόδου .....	19
2.3) Στάδια εφαρμογής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε λογισμικό.....	20
2.4) Στάδια επεξεργασίας μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε λογισμικό .....	20
<b>Κεφάλαιο 3:Εισαγωγή στη θερμική ανάλυση στο Pro Engineer Wildfire 5.0</b> .....	<b>22</b>
3.1) Εισαγωγικά για το Pro Engineer.....	22
3.2) Βήματα προετοιμασίας για θερμική ανάλυση στο Pro Engineer .....	23
3.3)Εισαγωγή στο Mechanica Thermal .....	24
3.4) Είδη μοντέλων στο Mechanica Thermal.....	25
3.4.a) 3D.....	26
3.4.b) 2D Plane Stress(Thin Plate).....	27
3.4.c)2D Plain Strain (Unit Depth).....	27
3.4.d) 2D Axisymmetric.....	27
3.5) Θερμικές συνοριακές συνθήκες (Thermal boundary conditions) στο mechanica thermal.....	28
<b>Κεφάλαιο 4:Θερμική ανάλυση στο Pro engineer wildfire 5.0</b> .....	<b>29</b>
4.1)Δημιουργώντας 3D θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης με θερμικό φορτίο(3D steady state thermal analysis) .....	29
4.2) Δημιουργώντας 3D θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης με προκαθορισμένη θερμοκρασία και συναγωγή .....	38
4.3)Δισδιάστατο μοντέλο(2D Model).....	45

4.4)Μεταβατική ανάλυση(Transient Analysis) .....	51
4.5) Θερμική ανάλυση που περιέχει θερμικές τάσεις .....	55
<b>Κεφάλαιο 5: Σύγκριση αποτελεσμάτων θεωρητικού υπολογισμού με αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης σε λογισμικό χρήσης FEA. ....</b>	<b>64</b>
5.1) Παράδειγμα 1: Πλαίσιο τραπεζιού, μεταφορά θερμότητας με αγωγή .....	64
5.2) Παράδειγμα 2: Χάλκινη πλάκα,μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή .....	82
5.3) Παράδειγμα 3: Χαλύβδινη ράβδος, θερμικό φορτίο και συναγωγή .....	89
5.4) Παράδειγμα 4: Χάλκινη και χαλύβδινη ράβδος, θερμικό φορτίο και συναγωγή .....	95
<b>Συμπεράσματα και σχόλια.....</b>	<b>102</b>
<b>Βιβλιογραφία: .....</b>	<b>104</b>

## Εισαγωγή:

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της μεθοδολογίας και ο προσδιορισμός των δυνατοτήτων και των παρεχόμενων εργαλείων για τον υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας σε υπολογιστικό λογισμικό, το οποίο κάνει χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια της εργασίας θα γίνει αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στη θεωρία για τη μεταφορά θερμότητας στον πραγματικό κόσμο και στο πως αυτή προσομοιώνεται σε υπολογιστικό λογισμικό. Θα μελετηθούν μοντέλα σε σταθερή κατάσταση, σε κατάσταση εξαρτώμενη από το χρόνο (μεταβατική κατάσταση) και θα γίνει ανάλυση τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη την θερμοκρασιακή διαφορά. Τέλος, θα σχεδιαστούν και θα υλοποιηθούν ολοκληρωμένα παραδείγματα χρήσης των εργαλείων του υπολογιστικού λογισμικού, για επίδειξη των παρεχόμενων δυνατοτήτων του.

## Κεφάλαιο 1: Βασικές έννοιες θερμότητας, μεταφοράς θερμότητας

### 1.1) Θερμότητα (heat)



Εικ. 1.1) Η πηγή θερμότητας του πλανήτη μας (Ηλιος)

Είναι η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται μεταξύ συστημάτων, σωμάτων ή μορίων λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ αυτών. Γενικότερα με τον όρο θερμότητα ορίζεται η μεταφορά ενέργειας από ένα σύστημα προς το περιβάλλον του, ως συνέπεια της διαφοράς θερμοκρασίας.

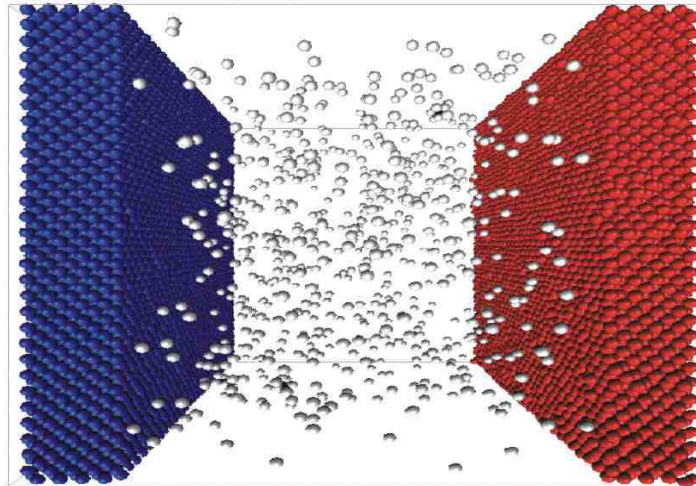
Ο όρος θερμότητα αναφέρεται πάντοτε σε μεταφορά ενέργειας από ένα σώμα ή σύστημα σε ένα άλλο και ποτέ στο ποσό ενέργειας που περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα. Η μονάδα για τη μέτρηση της ποσότητας θερμότητας που παράγεται λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας κάποιου υλικού είναι η θερμίδα (ή cal), η οποία ορίζεται ως το ποσό θερμότητας που απαιτείται για αύξηση της θερμοκρασίας ενός γραμμαρίου νερού από τους 14,5° C στους 15,5° C. Ένα Btu είναι η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται, για να αυξηθεί η θερμοκρασία νερού βάρους ενός pound κατά 1°F, από τους 63°F στους 64°F.

Επειδή θερμότητα σημαίνει μεταφορά ενέργειας, θα πρέπει να υπάρχει συγκεκριμένη σχέση ανάμεσα στις παραπάνω μονάδες και τις γνωστές μονάδες μηχανικής ενέργειας, όπως το joule. Από πειράματα όμοια με εκείνα του Joule, έχει δειχθεί ότι

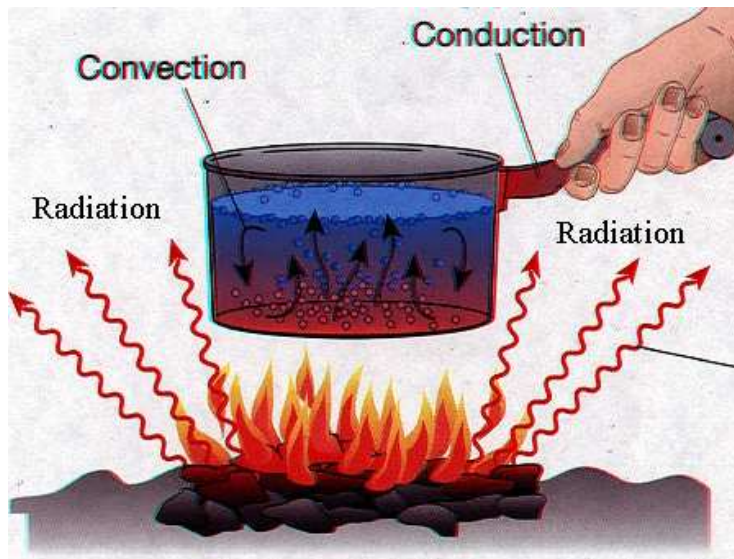
$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 4186 \text{ joules} = 3.968 \text{ Btu}$$

Με το σύμβολο Q παριστάνεται η ποσότητα θερμότητας. Όταν σχετίζεται με κάποια απειροστή μεταβολή θερμοκρασίας dT συμβολίζεται dQ. Η ποσότητα θερμότητας Q που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας μιας συγκεκριμένης μάζας από T<sub>1</sub> σε T<sub>2</sub> βρίσκεται ότι είναι προσεγγιστικά ανάλογη προς τη μεταβολή θερμοκρασίας ΔT=T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>. Είναι επίσης ανάλογη προς τη μάζα m. Έτσι λοιπόν ισχύει η εξίσωση: Q=mcΔT

### 1.2) Μεταφορά θερμότητας (heat transfer)



Εικ. 1.2) Απεικόνιση μορίων μεταφοράς θερμότητας



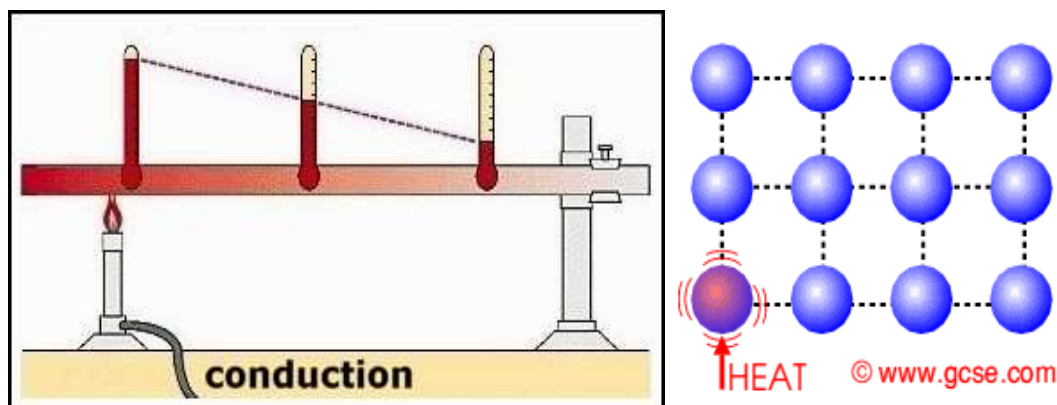
Εικ. 1.3) Παράδειγμα μεταφοράς θερμότητας και με τους τρεις τρόπους

Η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από και προς μια συγκεκριμένη μάζα με δύο μηχανισμούς :τη θερμότητα  $Q$  και το έργο  $W$ . Η μεταφορά θερμότητας αποτελεί μια αλληλεπίδραση ενέργειας αν η κινητήρια δύναμη της είναι μια διαφορά θερμοκρασίας. Διαφορετικά , υπάρχει έργο. Ένα έμβολο που ανεβαίνει, ένας άξονας που περιστρέφεται , σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις του έργου. Το έργο που επιτελείται ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται ισχύς και συμβολίζεται με  $\dot{W}$ . Η μονάδα ισχύος είναι το

Watt ή ο hp (ίππος ,1 hp=746 Watt). Αξίζει να αναφερθεί ότι η ενέργεια ενός συστήματος μειώνεται καθώς αυτό παράγει έργο και αυξάνεται καθώς αυτό λαμβάνει έργο.

Η ποσότητα της μεταφερόμενης θερμότητας ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και συμβολίζεται με  $\dot{Q}$ . Η κουκίδα πάνω από τον χαρακτήρα σημαίνει “ ανά μονάδα χρόνου”. Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους : **αγωγή**, **συναγωγή** και **ακτινοβολία**. Όλοι οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας απαιτούν την ύπαρξη μιας διαφοράς θερμοκρασίας, ενώ η μεταφορά θερμότητας γίνεται από το μέσο με την υψηλότερη θερμοκρασία προς εκείνο με τη χαμηλότερη.

### 1.3) Αγωγή (conduction)



Εικ. 1.4) Μετάδοση θερμότητας με αγωγή και απεικόνιση πως επηρεάζεται η θερμοκρασία αναλόγως της επιφάνειας

Είναι η μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργά σωματίδια μιας ουσίας προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά σωματίδια λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να συμβεί στα στερεά, στα υγρά και στα αέρια. Στα αέρια και στα υγρά, η αγωγή οφείλεται στις *συγκρούσεις* και στη *διάχυση* μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία κίνηση τους. Στα στερεά, οφείλεται στο *συνδυασμό των ταλαντώσεων* των μορίων σε μια δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Για παράδειγμα, ένα παγωμένο κουτί αναψυκτικό σε ένα θερμό δωμάτιο θα ζεσταθεί με τη βοήθεια της αγωγής μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το δωμάτιο στο αναψυκτικό, διαμέσου του μεταλλικού κουτιού.

Ο ρυθμός αγωγής θερμότητας μέσα από ένα μέσο εξαρτάται από τη *γεωμετρία* του μέσου, το *πάχος* του, το *υλικό* του μέσου και από τη *διαφορά θερμοκρασίας* στις δύο πλευρές του μέσου. Είναι γνωστό ότι εάν ένα δοχείο με ζεστό νερό τυλιχθεί με μονωτικό υλικό, τότε, θα μειωθεί ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από το δοχείο. Όσο πιο παχύ είναι το μονωτικό στρώμα, τόσο μικρότερη θα είναι και η απώλεια θερμότητας. Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το δοχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του και επομένως και ο ρυθμός απώλειας θερμότητας. Τέλος, πειράματα απέδειξαν ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του τοίχου διπλασιάζεται, όταν διπλασιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T = T_2 - T_1$  στις πλευρές του τοίχου ή διπλασιάζεται η επιφάνεια  $A$ , αλλά μειώνεται στο μισό, όταν διπλασιάζεται το πάχος  $L$  του τοίχου. Επομένως, **ο ρυθμός αγωγής θερμότητας διαμέσου**



ενός επιπέδου στρώματος είναι ανάλογος προς τη διαφορά θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του στρώματος και προς την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογος προς το πάχος του στρώματος. Δηλαδή,

Ρυθμός αγωγής θερμότητας= (επιφάνεια) (διαφορά θερμοκρασίας) / πάχος

Ή

$\dot{Q} = \kappa \cdot A \cdot \Delta T / \Delta x$  (Watt) όπου  $\kappa$  είναι η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του υλικού, η οποία αποτελεί το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να άγει θερμότητα. Στην οριακή περίπτωση που  $\Delta x \rightarrow 0$ , η παραπάνω εξίσωση ανάγεται στη διαφορική μορφή:

$\dot{Q}_{cond} = - \kappa \cdot A \cdot dT/dx$  (Watt) η οποία ονομάζεται **νόμος του Fourier για την αγωγή θερμότητας**. Εδώ  $dT/dx$  παριστάνει τη θερμοκρασιακή βαθμίδα (κλίση), η οποία αποτελεί την κλίση της καμπύλης θερμοκρασίας σε ένα διάγραμμα T-x, στην θέση x. Η θερμότητα άγεται προς τη διεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας και η θερμοκρασιακή βαθμίδα γίνεται αρνητική, όταν η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του x. Επομένως, προστέθηκε στη εξίσωση το αρνητικό πρόσημο, ώστε η μεταφορά προς τη διεύθυνσης της θετικής απόστασης x να είναι θετική ποσότητα.

#### 1.4) Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity)

Η θερμική αγωγιμότητα  $\kappa$  αποτελεί το μέτρο της ικανότητας του υλικού να άγει θερμότητα. Για παράδειγμα,  $\kappa=0.608 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$  το νερό και  $\kappa=60 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$  το σίδηρο σε θερμοκρασία δωματίου, δηλώνει ότι ο σίδηρος άγει θερμότητα σχεδόν εκατό φορές πιο γρήγορα από το νερό. Έτσι, η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού ορίζεται ως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα πάχους του υλικού, ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα θερμοκρασίας. Ακολουθεί πίνακας θερμικών αγωγιμοτήτων διάφορων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου και μερικών υλικών σε θερμοκρασία 125 °C και 225 °C

Thermal Conductivity - $\kappa$ - $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Acetone	0.16		
Acetylene (gas)	0.018		
Acrylic	0.2		
Air, atmosphere (gas)	0.024		
Alcohol	0.17		
Aluminum	205	215	250
Aluminum Oxide	30		



<u>Thermal Conductivity</u> - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Ammonia (gas)	0.022		
Antimony	18.5		
Apple (85.6% moisture)	0.39		
Argon (gas)	0.016		
Asbestos-cement board	0.744		
Asbestos-cement sheets	0.166		
Asbestos-cement	2.07		
Asbestos, loosely packed	0.15		
Asbestos mill board	0.14		
Asphalt	0.75		
Balsa wood	0.048		
Bitumen	0.17		
Bitumen/felt layers	0.5		
Beef, lean (78.9 % moisture)	0.43 - 0.48		
Benzene	0.16		
Beryllium	218		
Bitumen	0.17		
Blast furnace gas (gas)	0.02		
Brass	109		
Breeze block	0.10 - 0.20		
Brick dense	1.31		
Brickwork, common	0.6 - 1.0		
Brickwork, dense	1.6		
Butter (15% moisture content)	0.20		

Thermal Conductivity - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Cadmium	92		
Calcium silicate	0.05		
Carbon	1.7		
Carbon dioxide (gas)	0.0146		
Cement, portland	0.29		
Cement, mortar	1.73		
Chalk	0.09		
Chlorine (gas)	0.0081		
Chrome Nickel Steel (18% Cr, 8% Ni)	16.3		
Clay, dry to moist	0.15 - 1.8		
Clay, saturated	0.6 - 2.5		
Cobalt	69		
Cod (83% moisture content)	0.54		
Concrete, lightweight	0.1 - 0.3		
Concrete, medium	0.4 - 0.7		
Concrete, dense	1.0 - 1.8		
Concrete, stone	1.7		
Constantan	22		
Copper	401	400	398
Corian (ceramic filled)	1.06		
Corkboard	0.043		
Cork, regranulated	0.044		
Cork	0.07		
Cotton wool	0.029		

Thermal Conductivity - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Carbon Steel	54	51	47
Cotton Wool insulation	0.029		
Diatomaceous earth (Sil-o-cel)	0.06		
Diatomite	0.12		
Earth, dry	1.5		
Engine Oil	0.15		
Ether	0.14		
Ethylene (gas)	0.017		
Epoxy	0.35		
Ethylene glycol	0.25		
Felt insulation	0.04		
Fiberglass	0.04		
Fiber insulating board	0.048		
Fiber hardboard	0.2		
Fireclay brick 500°C	1.4		
Foam glass	0.045		
Freon 12 (gas)	0.073		
Freon (liquid)	0.07		
Gasoline	0.15		
Glass	1.05		
Glass, Pearls, dry	0.18		
Glass, Pearls, saturated	0.76		
Glass, window	0.96		
Glass, wool Insulation	0.04		

Thermal Conductivity - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature $^{\circ}C$		
	25	125	225
Glycerol	0.28		
Gold	310	312	310
Granite	1.7 - 4.0		
Gravel	0.7		
Gypsum or plaster board	0.17		
Hair felt	0.05		
Hardboard high density	0.15		
Hardwoods (oak, maple.)	0.16		
Helium (gas)	0.142		
Honey (12.6% moisture content)	0.5		
Hydrochloric acid (gas)	0.013		
Hydrogen (gas)	0.168		
Hydrogen sulfide (gas)	0.013		
Ice ( $0^{\circ}C$ , $32^{\circ}F$ )	2.18		
Insulation materials	0.035 - 0.16		
Iridium	147		
Iron	80	68	60
Iron, wrought	59		
Iron, cast	55		
Kapok insulation	0.034		
Kerosene	0.15		
Krypton (gas)	0.0088		
Lead Pb	35		
Leather, dry	0.14		

<u>Thermal Conductivity</u> - $k$ - $W/(m^{\circ}K)$			
Material/Substance	Temperature $^{\circ}C$		
	25	125	225
Limestone	1.26 - 1.33		
Magnesia insulation (85%)	0.07		
Magnetite	4.15		
Magnesium	156		
Marble	2.08 - 2.94		
Mercury	8		
Methane (gas)	0.030		
Methanol	0.21		
Mica	0.71		
Milk	0.53		
Mineral wool insulation materials, wool	0.04		
Molybdenum	138		
Monel	26		
Neon (gas)	0.046		
Nickel	91		
Nitrogen (gas)	0.024		
Nylon 6	0.25		
Oil, machine lubricating SAE 50	0.15		
Olive oil	0.17		
Oxygen (gas)	0.024		
Paper	0.05		
Paraffin Wax	0.25		
Perlite, atmospheric pressure	0.031		
Perlite, vacuum	0.00137		

Thermal Conductivity - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Plasterboard, gypsum	0.48		
Plaster, metal lath	0.47		
Plaster, wood lath	0.28		
Plastics, foamed (insulation materials)	0.03		
Platinum	70	71	72
Plywood	0.13		
Polyethylene HD	0.42 - 0.51		
Polypropylene	0.1 - 0.22		
Polystyrene, expanded	0.03		
Polystyrol	0.043		
Polyurethane foam	0.03		
Porcelain	1.5		
Potato, raw flesh	0.55		
Propane (gas)	0.015		
PTFE	0.25		
PVC	0.19		
Pyrex glass	1.005		
Quartz mineral	3		
Rock, solid	2 - 7		
Rock, porous volcanic (Tuff)	0.5 - 2.5		
Rock Wool insulation	0.045		
Rubber, natural	0.13		
Salmon (73% moisture content)	0.50		
Sand, dry	0.15 - 0.25		

Thermal Conductivity - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Sand, moist	0.25 - 2		
Sand, saturated	2 - 4		
Sandstone	1.7		
Sawdust	0.08		
Sheep's wool	0.039		
Silica aerogel	0.02		
Silicone oil	0.1		
Silver	429		
Slaq wool	0.042		
Slate	2.01		
Snow (temp < 0°C)	0.05 - 0.25		
Sodium	84		
Softwoods (fir, pine ..)	0.12		
Soil, with organic matter	0.15 - 2		
Soil, saturated	0.6 - 4		
Steel, Carbon 1%	43		
Stainless Steel	16	17	19
Straw slab insulation, compressed	0.09		
Styrofoam	0.033		
Sulfur dioxide (gas)	0.0086		
Sugars	0.087 - 0.22		
Timber	0.14		
Tin Sn	67		
Zinc Zn	116		



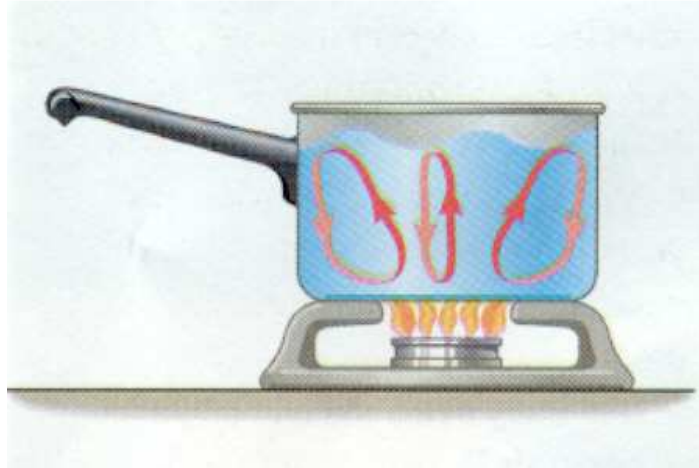
Thermal Conductivity - $k$ - $W/(m \cdot K)$			
Material/Substance	Temperature °C		
	25	125	225
Urethane foam	0.021		
Vermiculite	0.058		
Vinyl ester	0.25		
Water	0.58		
Water, vapor (steam)		0.016	
Wheat flour	0.45		
Wood across the grain, white pine	0.12		
Wood across the grain, balsa	0.055		
Wood across the grain, yellow pine,	0.147		
Wood, oak	0.17		
Wool, felt	0.07		
Wood wool, slab	0.1 - 0.15		
Xenon (gas)	0.0051		

Πίνακας 1) Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών

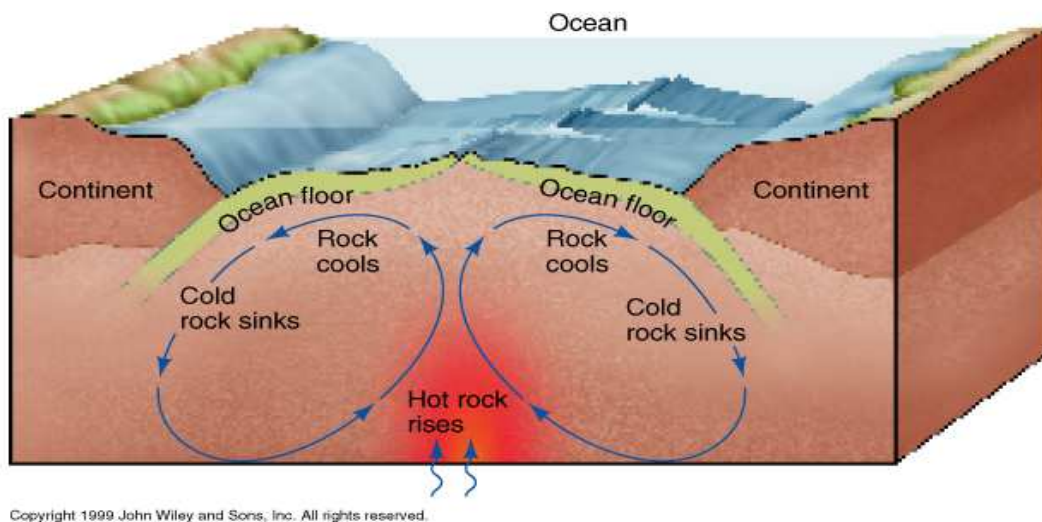
### 1.5) Θερμική διαχυτότητα (*thermal diffusivity*)

Είναι μια ιδιότητα των υλικών που εμφανίζεται στην μεταβατική (transient) ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας που παριστάνει το πόσο γρήγορα διαχέεται η θερμότητα διαμέσου ενός υλικού και ορίζεται ως το πηλίκο της αγόμενης θερμότητας προς την αποθηκευμένη θερμότητα  $\alpha = k/\rho \cdot C_p$  ( $m^2/s$ )

### 1.6) Συναγωγή (convection)



Εικ. 1.5) Απεικόνιση συναγωγής σε μία κατσαρόλα



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Εικ. 1.6) Μετακίνηση των ηπείρων με συναγωγή

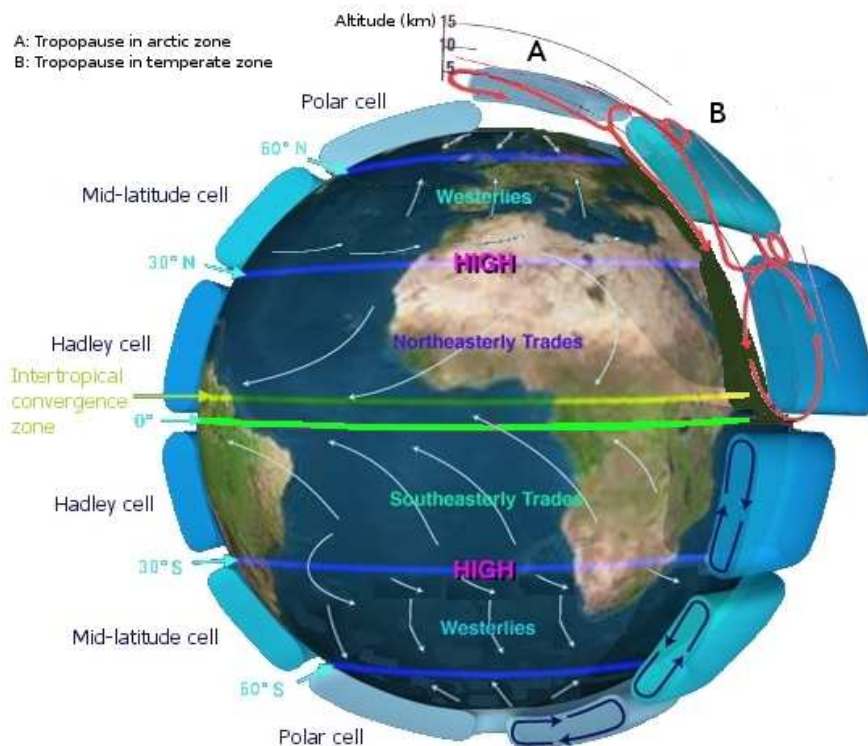
Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αερίου που βρίσκεται σε κίνηση και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Όταν δεν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού γίνεται αποκλειστικά με αγωγή. Όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση του ρευστού, ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της

επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού, αλλά κάνει και πιο πολύπλοκο τον προσδιορισμό των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας.

Η συναγωγή ονομάζεται **εξαναγκασμένη συναγωγή** αν το ρευστό αναγκάζεται να ρέει πάνω από μία επιφάνεια με τη βοήθεια εξωτερικών μέσων όπως με έναν ανεμιστήρα, μία αντλία ή τον άνεμο. Αντίθετα, η συναγωγή ονομάζεται **φυσική ή ελεύθερη συναγωγή** αν η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές στην πυκνότητα του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας.

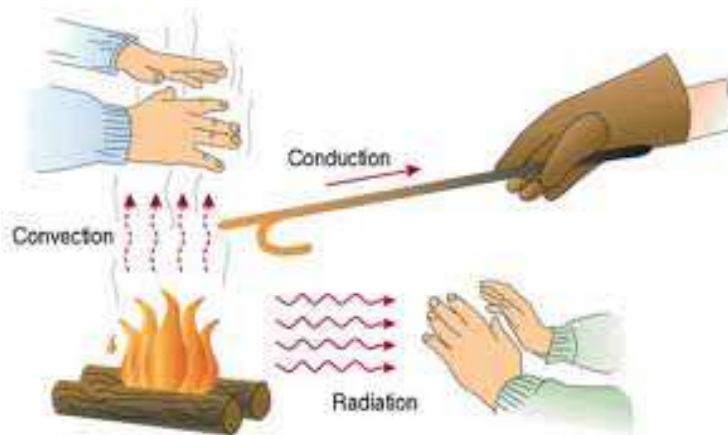
Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εκφράζεται με το παρακάτω νόμο:

$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T - T_b)$  όπου  $h$  είναι ο συντελεστής θερμότητας με συναγωγή  $T_a$  η θερμοκρασία της επιφάνειας και  $T_b$  η θερμοκρασία του ρευστού που βρίσκεται μακριά από την επιφάνεια



Εικ. 1.7) Μεταφορά θερμότητας στον πλανήτη Γη μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα

### 1.7) Ακτινοβολία (radiation)



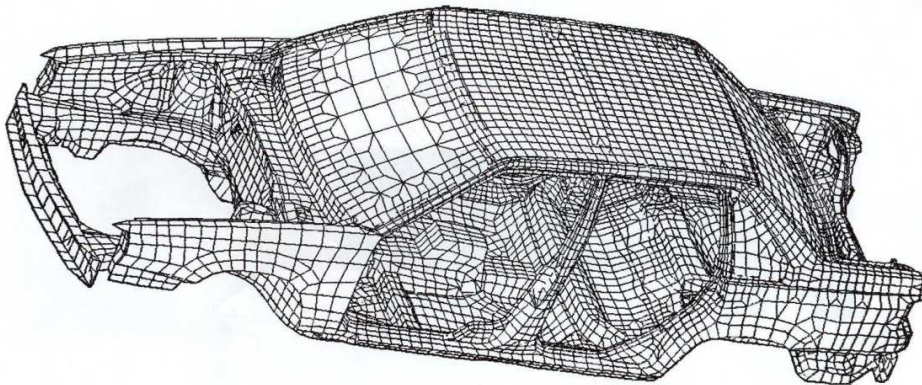
Εικ. 1.8) Απεικόνιση μετάδοσης θερμότητας από φωτιά και με τους τρεις τρόπους

Ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπει η ύλη με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων) λόγω των μεταβολών στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου. Στην πραγματικότητα, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία είναι γρηγορότερη (ίση με ταχύτητα του φωτός) και δεν υφίσταται απώλειες στο κενό. Έτσι φτάνει στη γη και η ηλιακή ενέργεια (με ακτινοβολία). Ο μέγιστος ρυθμός ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει μια επιφάνεια σε απόλυτη θερμοκρασία δίνεται από το νόμο **Stefan-Boltzmann**:

$\dot{Q}_{emit, max} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4$  (W) όπου  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο αυτό ρυθμό ονομάζεται μέλαν (μαύρο σώμα) και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι πραγματικές επιφάνειες είναι μικρότερη από εκείνη του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία και εκφράζεται ως εξής:  $\dot{Q}_{emit} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4$  όπου  $\epsilon$  είναι η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας. Η ιδιότητα αυτή, η τιμή της οποίας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $0 \leq \epsilon \leq 1$ , αποτελεί μέτρο του πόσο μια πραγματική επιφάνεια προσεγγίζει το μέλαν σώμα, για το οποίο  $\epsilon = 1$ .

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητική εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία

### 2.1) Εισαγωγικά σχετικά με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis)

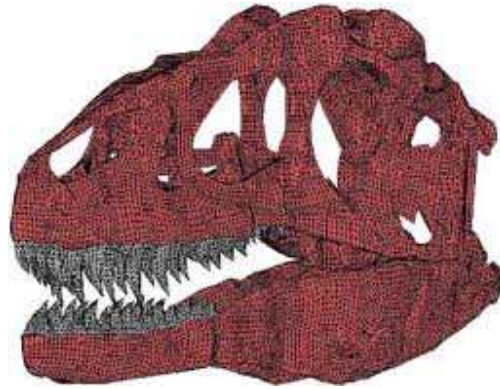


Εικ. 2.1) Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αμαξώματος

Η ανάλυση με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEA), επίσης γνωστή και ως μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), είναι ενδεχομένως το πιο χρήσιμο εργαλείο για τους μηχανολόγους μηχανικούς τα τελευταία χρόνια. Στην πραγματικότητα η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή είναι μια εξέλιξη των μητρικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διάφορους επιστήμονες, όπως ο **Ιωάννης Αργύρης**, ο **Clough**, ο **Ritz** και άλλοι. Η εξέλιξη της FEA έγινε από την επιθυμία για πιο ακριβείς υπολογιστικούς σχεδιασμούς σε πιο περίπλοκες καταστάσεις, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαδικασίας σχεδιασμού και των μοντέλων σχεδιασμού. Η αυξανόμενη χρήση προσομοίωσης στο σχεδιασμό (simulation in design), οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι υπάρχει πλέον η δυνατότητα ηλεκτρονικών υπολογιστών που μπορούν να διαχειριστούν τον μεγάλο όγκο υπολογισμών που πρέπει να γίνουν για την ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι λοιπόν, σήμερα, η χρήση FEA είναι προσιτή σχεδόν σε όλους του μηχανικούς και σχεδιαστές με σχετικά μικρό κόστος.

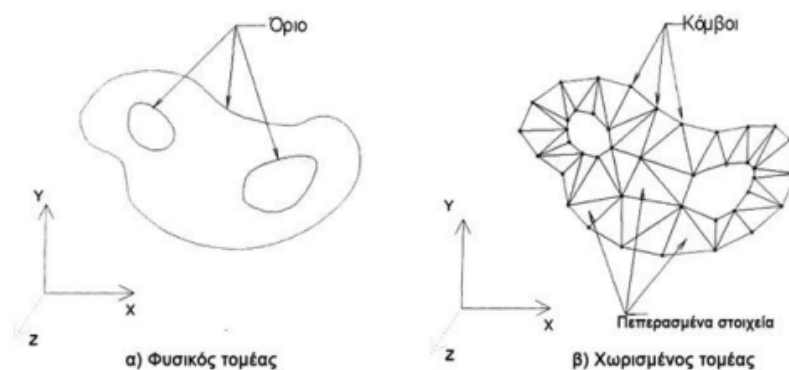


## 2.2) Η βασική ιδέα της FEA μεθόδου



Εικ. 2.2) Κρανίο αλλόσαυρου διαιρεμένο σε πεπερασμένα στοιχεία

Η βασική ιδέα της FEA μεθόδου είναι η υποδιαίρεση του υπό ανάλυση αντικειμένου, σε ένα πεπερασμένο αριθμό πεδίων που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (**finite elements**). Θεωρείται ότι για κάθε στοιχείο υπάρχει μία αναλυτική μαθηματική συνάρτηση, πολυωνυμικής ή άλλης μορφής. Το όριο κάθε σημείου, προσδιορίζεται από οριακά σημεία, τα οποία ονομάζονται κόμβοι (**boundary nodes**). Με αυτόν τον τρόπο η μέθοδος FEA επικεντρώνεται στην επίλυση κάθε στοιχείου, δηλαδή στην εύρεση της συνάρτησης που ισχύει για κάθε κόμβο. Ενώνοντας τους κόμβους με ευθύγραμμα τμήματα παράγεται το πλέγμα (**mesh**) του συγκεκριμένου πεδίου. Το πλέγμα αυτό αποτελεί ένα μέσο οριοθέτησης του χώρου. Η πυκνότητα του πλέγματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του αποτελέσματος, ιδιαίτερα σε σημεία όπου εφαρμόζονται φορτίσεις και περιορισμοί. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο πιο ακριβές είναι και το αποτέλεσμα.



Εικ. 2.3



Εικ. 2.4) Ανάλυση τροχαίου ατυχήματος με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων

### **2.3) Στάδια εφαρμογής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε λογισμικό**

- i. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα λογισμικό **CAD** και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
- ii. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και, αφού ετοιμαστεί το πλέγμα, επιλέγεται το είδος επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να επιλυθεί ανάλυση στατικής καταπόνησης στο μοντέλο, θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις στηρίξεις και τις δυνάμεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με λογισμικά που αποκαλούνται **pre processor**
- iii. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα λογισμικό, το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους λογισμικά λέγονται **solver** και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- iv. Όταν τελειώσει η επίλυση, τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθούν από ένα λογισμικό που ονομάζεται **post processor**, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

### **2.4) Στάδια επεξεργασίας μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε λογισμικό**

Για να μεταφερθεί ένα μοντέλο από τον πραγματικό κόσμο στην προσεγγιστική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να γίνουν κάποια βήματα απλούστευσης. Σε κάθε βήμα είναι απαραίτητο να ληφθούν οι σωστές αποφάσεις σχετικά με ποιες υποθέσεις ή απλουστεύσεις απαιτούνται, για να δημιουργηθεί το τελικό λειτουργικό μοντέλο που θα αναλυθεί. Λειτουργικό



μοντέλο είναι το μοντέλο εκείνο που επιτρέπει να γίνει ο επιθυμητός υπολογισμός με αποτελεσματική ακρίβεια και σε σχετικά καλό χρόνο. Δεν είναι καλό να δημιουργηθεί ένα μοντέλο, το οποίο είναι υπεραπλουστευμένο, διότι δεν θα μπορούσε να καταδείξει τα αποτελέσματα με την απαιτούμενη ακρίβεια. Επίσης, δεν είναι καλό να δημιουργηθεί ένα μοντέλο, το οποίο είναι σχεδιαστικά τέλειο αλλά, απαιτεί ένα υπολογιστή πέρα από τις δυνατότητες ενός συμβατικού και αφενός τα αποτελέσματα θα καταδειχθούν μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Πρέπει να υπάρχει μία ισορροπία για την επιλογή κατάλληλου μοντέλου, η οποία επιλογή απαιτεί πείρα. Τα στάδια για να δημιουργηθεί το τελικό λειτουργικό μοντέλο είναι τα εξής:

**i. Πραγματικός κόσμος → Απλοποιημένο φυσικό μοντέλο**

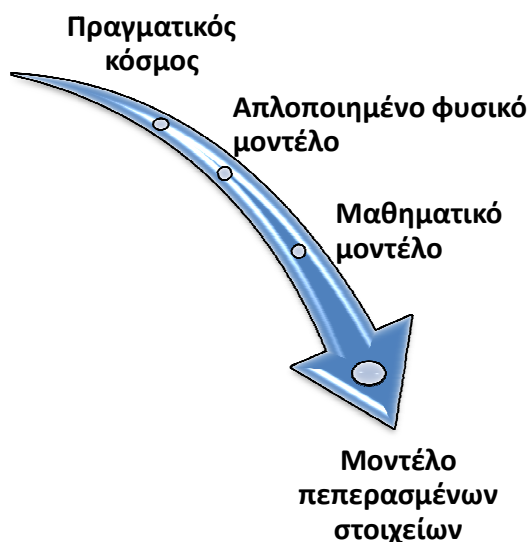
Στο στάδιο αυτό γίνονται παραδοχές σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες και τη γεωμετρία του μοντέλου. Για παράδειγμα, γίνεται η υπόθεση ότι τα υλικά είναι ομογενή και ιστροπικά και ότι δεν παρουσιάζουν εσωτερικές ατέλειες. Επίσης αφαιρούνται καμπύλες και γωνίες που δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα μίας ανάλυσης.

**ii. Απλοποιημένο φυσικό μοντέλο → Μαθηματικό μοντέλο**

Στο στάδιο αυτό γίνονται παραδοχές, όπως η γραμμικότητα των ιδιοτήτων των υλικών, ιδανικές συνθήκες φόρτισης κτλ για να γίνει πιο απλή η κάθε μαθηματική εξίσωση που χρησιμοποιεί το λογισμικό. Για παράδειγμα γίνεται η παραδοχή ότι, η φόρτιση είναι σταθερή ή ότι τα δοκάρια είναι γεωμετρικά τέλεια. Το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται συνήθως από μία ή περισσότερες διαφορικές εξισώσεις.

**iii. Μαθηματικό μοντέλο → Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEA model)**

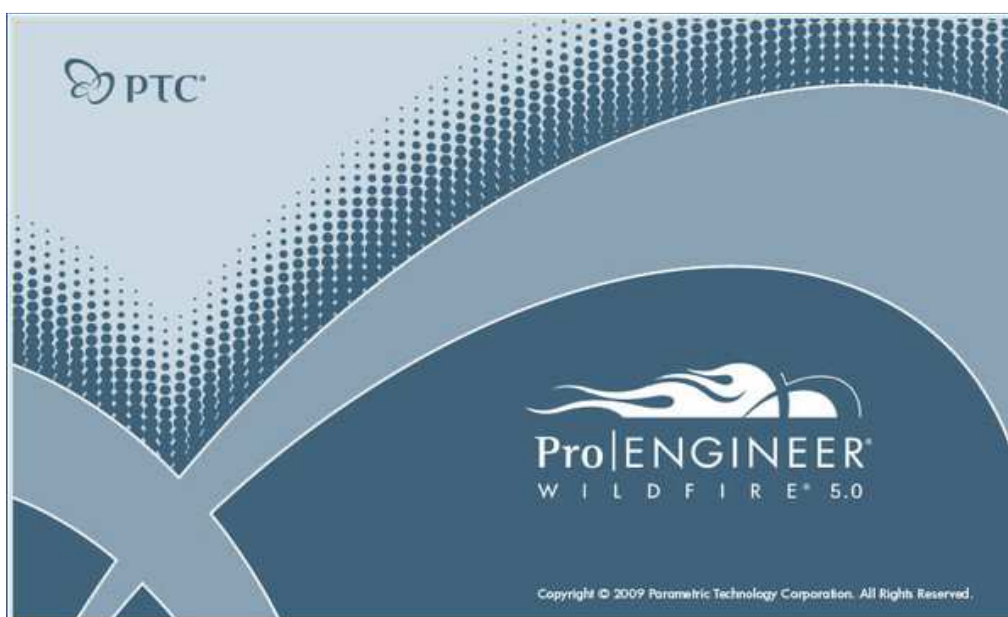
Στο στάδιο αυτό η απλοποιημένη γεωμετρία του μοντέλου υποδιαιρείται σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων με τη δημιουργία πλέγματος. Οι διαφορικές εξισώσεις που έχουν προκύψει στο προηγούμενο στάδιο, μπορούν να ξαναγραφτούν με πολλές ταυτόχρονες γραμμικές εξισώσεις, οι οποίες εκπροσωπούν τη συναρμολόγηση των στοιχείων στο μοντέλο.



Εικ. 2.5) Στάδια επεξεργασίας μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε λογισμικό

## Κεφάλαιο 3:Εισαγωγή στη θερμική ανάλυση στο Pro Engineer Wildfire 5.0

### 3.1) Εισαγωγικά για το Pro Engineer



Εικ. 3.1)Εικόνα εκκίνησης του λογισμικού

Το Pro Engineer είναι το πιο διαδομένο 3D CAD/CAM/CAE λογισμικό το οποίο ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1988 από τον **Samuel Peisakhovich Geisberg** ο οποίος το 1985 είχε ιδρύσει την εταιρία PTC. Πλέον το CREO/Pro Engineer wildfire 5.0 είναι το πιο εμπορικό και επιτυχημένο παραμετρικό, βασισμένο σε χαρακτηριστικά και μοντελοποίηση στερεών, πρόγραμμα (parametric feature based solid modeler).Μερικές από τις δυνατότητες του προγράμματος είναι οι εξής:

- I. Mechanics, υπολογισμός φορτίων και μεταφοράς θερμότητας.
- II. Behavior, το πρόγραμμα βελτιώνει αυτόματα το σχεδιασμό, μειώνοντας το βάρος η διορθώνοντας το κέντρο βάρους.
- III. Pipes, σχεδιασμός σωλήνων.
- IV. In part, βάση δεδομένων με έτοιμα τρισδιάστατα σχέδια από τυποποιημένα εξαρτήματα.
- V. Plastic Advisor, σχεδιασμός καλουπιών.
- VI. Υπολογισμός μάζας απευθείας από το σχέδιο.
- VII. Ενσωματωμένο σύστημα CAM στο σύστημα CAD.

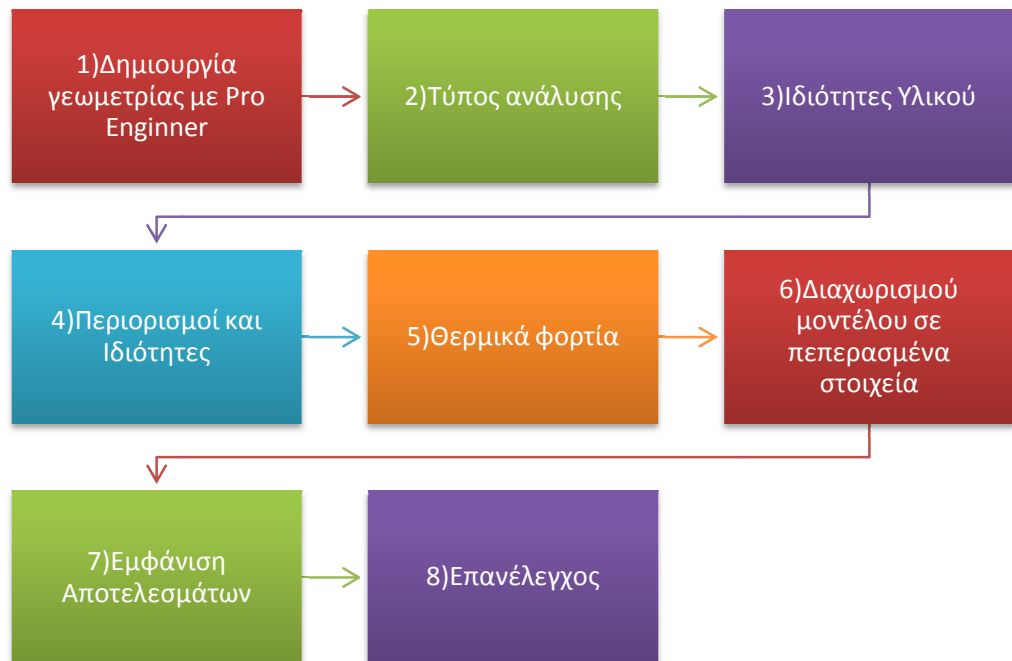
Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί στο **pro/mechanica**, μία από τις εφαρμογές του, η οποία αφορά τη μελέτη θερμικών καταπονήσεων (thermal).

### 3.2) Βήματα προετοιμασίας για θερμική ανάλυση στο Pro Engineer

Για να γίνει η επιθυμητή θερμική ανάλυση πρέπει να γίνουν τα παρακάτω γενικά βήματα:

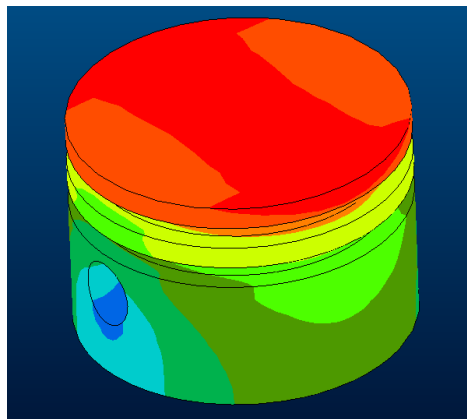
1. Το μοντέλο σχεδιάζεται στο Pro Engineer.
2. Μπαίνοντας στο *mechanica* από το μενού "**applications**", πρέπει να οριστεί ο τύπος του μοντέλου. Οι επιλογές είναι *structure model type* ή **thermal model type**. Για τη θερμική ανάλυση πρέπει να οριστεί "*thermal*". Επίσης πρέπει να οριστεί αν η επιθυμητή ανάλυση είναι σε δύο ή τρεις διαστάσεις.
3. Ορίζονται οι **ιδιότητες του υλικού ή των υλικών**. Τα περισσότερα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων περιέχουν βιβλιοθήκες με τις ιδιότητες κοινών υλικών όπως για παράδειγμα ο χάλυβας, σίδηρος, αλουμίνιο κτλ οπότε, απλώς επιλέγεται το είδος του υλικού.
4. Ορίζονται οι **περιορισμοί και ιδιότητες**. Παραδείγματος χάριν συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (*convective heat transfer*), θερμοκρασία περιβάλλοντος ή υλικού (*prescribed temperatures*) κτλ.
5. Ορίζονται τα **θερμικά φορτία** (*heat loads*).
6. Όταν οριστούν οι παραπάνω παράμετροι, το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία και η εκτέλεση της ανάλυσης με τη **δημιουργία πλέγματος**. Το λογισμικό παρέχει αυτόματα τη δημιουργία πλέγματος με την υπορουτίνα *AutoGEM*. Στο σημείο αυτό εντοπίζονται τυχόν παραλήψεις, όπως για παράδειγμα, στοιχεία που δεν τους έχουν οριστεί ιδιότητες υλικού. Στη συνέχεια, ο επεξεργαστής του προγράμματος λύνει τις εξισώσεις του συστήματος, που ανάλογα με την ανάλυση μπορεί να είναι και εκατοντάδες, και παρέχει δεδομένα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
7. Γίνεται η **εξαγωγή των δεδομένων**. Ο μόνος κατανοητός τρόπος για να εξεταστούν είναι τα γραφικά. Το *mechanica* έχει πολύ ισχυρό σύστημα υποστήριξης γραφικών με τρισδιάστατες απεικονίσεις και αναπαραστάσεις της εκάστοτε φόρτισης. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα δημιουργίας αναφοράς (*report*), καθώς και ιστοσελίδας που να περιέχει αποτελέσματα, εικόνες και σχόλια.
8. Τέλος, γίνεται **επανεξέταση των αποτελεσμάτων**. Θα πρέπει, δηλαδή, να διαπιστωθεί αν συμφωνούν με τους αρχικούς σχεδιαστικούς στόχους. Εάν, όμως, υπάρχει αμφιβολία για τα αποτελέσματα, θα πρέπει ο χρήστης να επανεξετάσει διάφορες πτυχές του μοντέλου και να προβεί εκ νέου σε ανάλυση για να εντοπιστούν τυχόν σφάλματα ή παραλείψεις.

Τα βήματα 3, 4 και 5 μπορούν να γίνουν με οποιαδήποτε σειρά. Παρακάτω στο σχήμα της εικόνας 3.2 φαίνονται συνοπτικά τα βήματα:



Εικ. 3.2) Βήματα προετοιμασίας για θερμική ανάλυση στο Pro Engineer

### 3.3) Εισαγωγή στο *Mechanica Thermal*



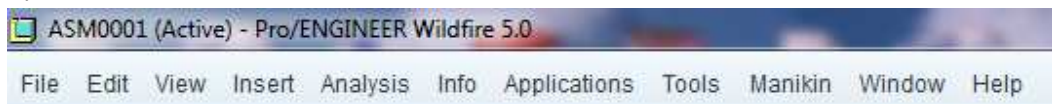
Εικ. 3.3) Θερμική ανάλυση με τη χρήση *Mechanica Thermal*

Συνήθως οι μηχανικοί χρησιμοποιούν το *mechanica structure* μιας και τα προβλήματα που αφορούν τάσεις και παραμορφώσεις σε κάποιο μοντέλο είναι πιο συχνά σε σχέση με τα προβλήματα που αφορούν θερμικά φορτία σε κάποιο μοντέλο. Η ενότητα αυτή αναφέρεται στα είδη προβλημάτων που μπορούν να λυθούν από το *mechanica thermal*, τα είδη των μοντέλων, ποιες συνοριακές συνθήκες αλλά και θερμικά φορτία μπορούν να εφαρμοστούν στο μοντέλο. Στη θερμική ανάλυση, παρόλο, που

το πιο συχνό πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της ακριβούς θερμοκρασίας, γίνεται επίσης υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας (θερμότητα ανά χρόνο,  $W(J/s)$ ) μέσω μιας επιφάνειας αλλά και της θερμική ροής (μεταφορά θερμότητας ανά επιφάνεια,  $W/m^2$ ) μέσω του μοντέλου. Μπορεί επίσης να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται, για να φτάσει ένα σώμα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (transient problem) και τέλος ο υπολογισμός τάσεων με βάση το θερμικό φορτίο που δημιουργεί θερμική διαστολή.

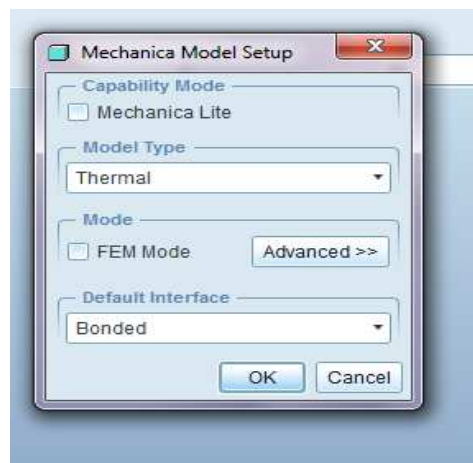
### 3.4) Είδη μοντέλων στο *Mechanica Thermal*

Στο λογισμικό αυτό υπάρχουν τέσσερα είδη μοντέλων. Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη περιγραφή για το ποια είδη μοντέλων είναι αυτά και πως ορίζονται χωρίς να γίνει κάποια ανάλυση. Μπαίνοντας στο πρόγραμμα και αφού έχει σχεδιαστεί οποιοδήποτε μοντέλο εμφανίζεται η μπάρα που φαίνεται στο σχήμα παρακάτω (Εικ.3.4). Από την μπάρα αυτή μέσω της επιλογής **applications**, επιλέγεται η εφαρμογή **mechanica**.



Εικ. 3.4) Μπάρα μενού Pro engineer wildfire 5.0

Όταν επιλεγθεί η επιλογή **mechanica** εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπως στο σχήμα της εικόνας 3.5. Στην μπάρα **model type** υπάρχουν δύο επιλογές. Μία είναι **structure** και η άλλη είναι **thermal**. Προφανώς στην περίπτωση όπου είναι επιθυμητή μία θερμική ανάλυση πρέπει να οριστεί η επιλογή **thermal**.



Εικ. 3.5

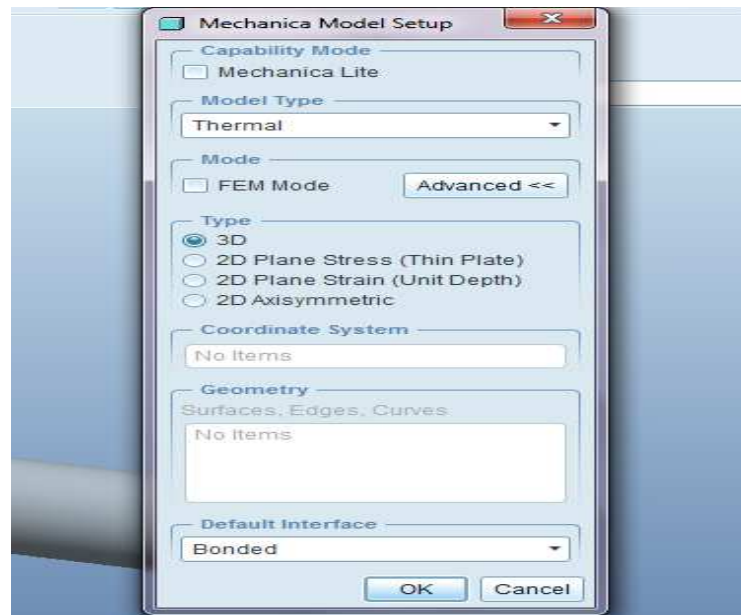
Στην επιλογή FEM Mode αν πατηθεί το κουμπάκι όπου αναφέρει **advanced** μπορεί να επιλεγθεί το είδος του μοντέλου. Οι επιλογές είναι οι εξής:

- 1) 3D
- 2) 2D Plane Stress (Thin Plate)
- 3) 2D Plain Strain (Unit Depth)
- 4) 2D Axisymmetric

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Εικ.3.6) η προεπιλεγμένη επιλογή είναι 3D. Αν επιλεγθεί μία από τις επιλογές στις δύο διαστάσεις, τότε το πρόγραμμα ενεργοποιήσει το παράθυρο *Coordinate system* και *Geometry*.

Στο *Coordinate System* (Σύστημα συντεταγμένων) πρέπει να οριστεί ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ως σύστημα αναφοράς συντεταγμένων για το δισδιάστατο μοντέλο.

Στο *Geometry* πρέπει να επιλεγθεί μία επιφάνεια, στην οποία θα γίνει η ανάλυση σε δύο διαστάσεις. Μπορεί να επιλεγθεί και παραπάνω από μία επιφάνεια.



Εικ. 3.6

### 3.4.a) 3D

Η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη για ανάλυση μοντέλων σε τρεις διαστάσεις. Γίνεται ορισμός φορτίων και περιορισμών σε έξι βαθμούς ελευθερίας.

- Μετατόπιση κατά τον άξονα X, Y και Z
- Περιστροφή κατά τον άξονα X, Y και Z

### 3.4.b) 2D Plane Stress (Thin Plate)

Η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη για μοντελοποίηση λεπτών, επίπεδων αντικειμένων, όπως για παράδειγμα ένα κομμάτι λεπτό γυαλί. Όλες οι περιλαμβανόμενες γεωμετρίες πρέπει να βρίσκονται στο επίπεδο XY του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων που έχει επιλεγεί ως σύστημα αναφοράς. Αν χρειαστεί να γίνει ανάλυση σε μια συναρμολόγηση (assembly) τότε πρέπει όλα τα κομμάτια της συναρμολόγησης να βρίσκονται στο ίδιο βάθος Z.

### 3.4.c) 2D Plain Strain (Unit Depth)

Η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη αν η θερμική ροή στη μία διάσταση είναι αμελητέα. Για παράδειγμα όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται σε δύο διευθύνσεις αλλά όχι στην τρίτη. Αυτή είναι μια τυπική περίπτωση για δομές με μεγάλο μήκος σε μία διάσταση όπως για παράδειγμα μία σωλήνα ή μία ψήκτρα. Κατά ένα τρόπο η επιλογή 2D Plain Strain αντιπροσωπεύει ένα κομμάτι του πραγματικού τρισδιάστατου μοντέλου. Όλες οι περιλαμβανόμενες γεωμετρίες πρέπει να βρίσκονται στο επίπεδο XY του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων που έχει επιλεγεί ως σύστημα αναφοράς. Αν χρειαστεί να γίνει ανάλυση σε μια συναρμολόγηση (assembly) τότε πρέπει όλα τα κομμάτια της συναρμολόγησης να βρίσκονται στο ίδιο βάθος Z.

### 3.4.d) 2D Axisymmetric

Η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη αν η γεωμετρία του μοντέλου, τα θερμικά φορτία, καθορισμένες θερμοκρασίες και οι συνθήκες μετάδοσης της θερμότητας είναι συμμετρικά γύρω από έναν άξονα. Για παράδειγμα κυλινδρικές και κωνικές δομές όπως δεξαμενές και αγωγοί. Όπως και στις προηγούμενες δισδιάστατες επιλογές όλες οι περιλαμβανόμενες γεωμετρίες πρέπει να βρίσκονται στο επίπεδο XY του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων που έχει επιλεγεί ως σύστημα αναφοράς. Αν χρειαστεί να γίνει ανάλυση σε μια συναρμολόγηση (assembly) τότε πρέπει όλα τα κομμάτια της συναρμολόγησης να βρίσκονται στο ίδιο βάθος Z.



### **3.5) Θερμικές συνοριακές συνθήκες (*Thermal boundary conditions*) στο *mechanica thermal***

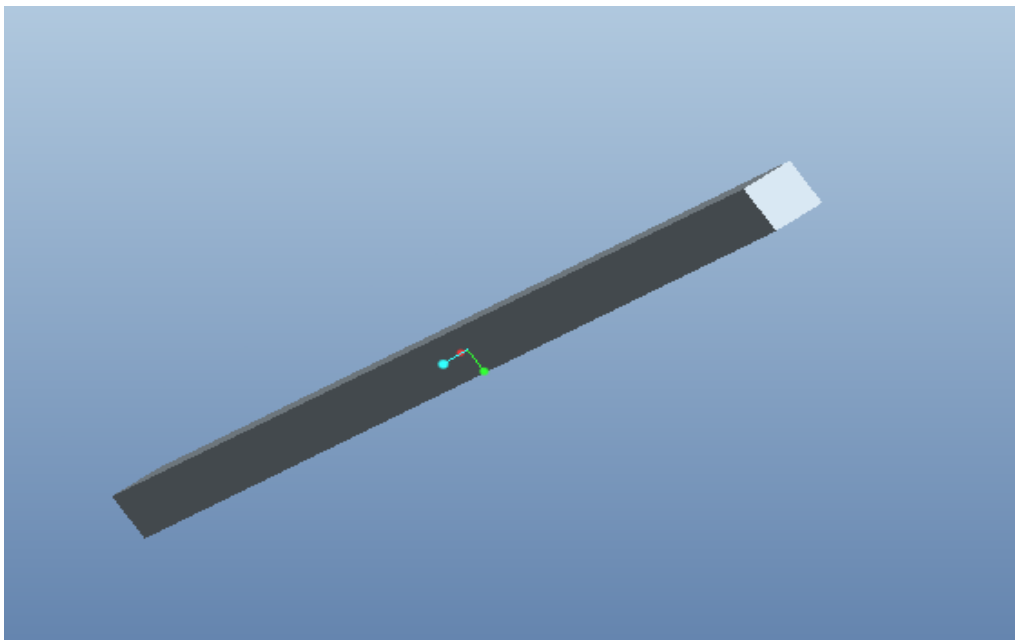
Στο Pro Engineer wildfire 5.0 υπάρχουν τρεις θερμικές συνοριακές συνθήκες. Αυτές είναι:

- **Προκαθορισμένη Θερμοκρασία (Prescribed Temperature).** Η επιφανειακή θερμοκρασία είναι καθορισμένη, η οποία μπορεί να είναι ομοιόμορφη ή να διαφέρει κατά μήκος της επιφάνειας.
- **Συναγωγή (Convection).** Στην περίπτωση αυτή πρέπει να οριστεί ο συντελεστής θερμότητας με συναγωγή και η θερμοκρασία του ρευστού.
- **Θερμικά Φορτία (Heat loads).** Ορίζεται εάν παράγεται θερμότητα (θέρμανση) ή άγεται θερμότητα (ψύξη). Θερμικά φορτία μπορούν να εφαρμοστούν στο μοντέλο με διάφορους τρόπους. Αυτοί μπορεί να είναι είτε στο εσωτερικό του μοντέλου είτε στην επιφάνεια του μοντέλου. Τα θερμικά φορτία μπορούν να εφαρμοστούν σε όγκους(volumes), επιφάνειες(surfaces) ή άκρες(edges).

## Κεφάλαιο 4:Θερμική ανάλυση στο Pro engineer wildfire 5.0

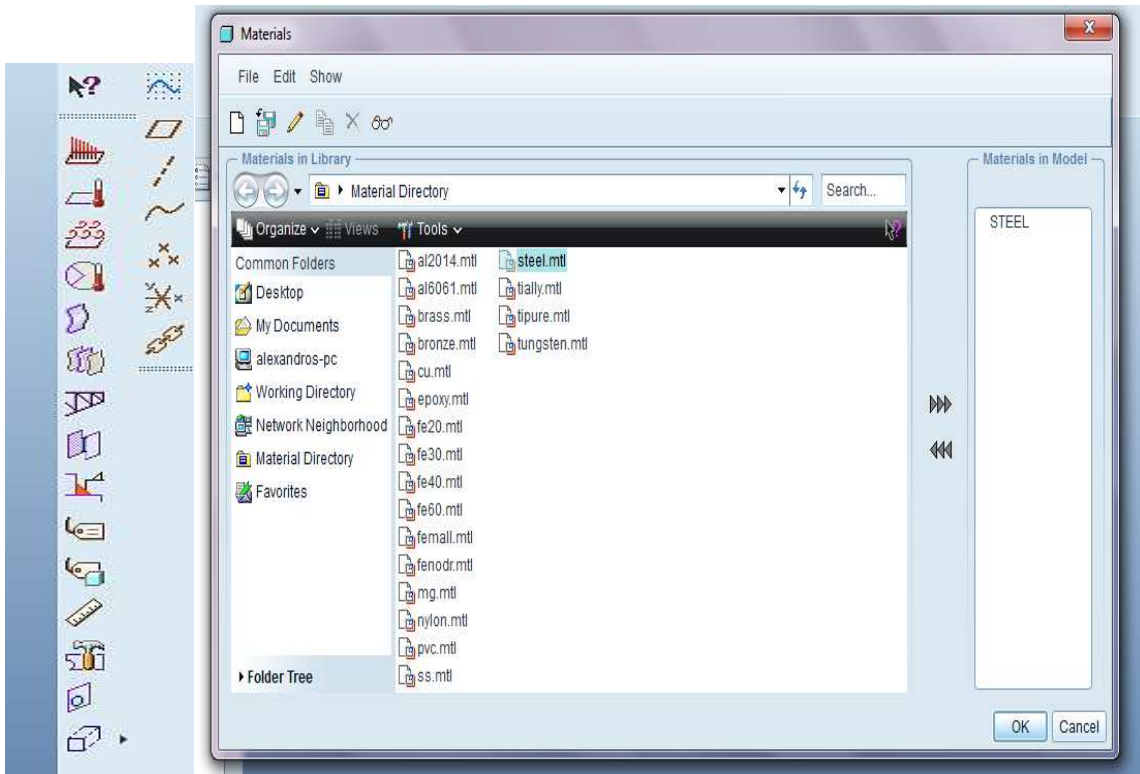
### 4.1) Δημιουργώντας 3D θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης με θερμικό φορτίο (3D steady state thermal analysis)

Για να γίνει κατανοητό πως γίνεται η θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης στο λογισμικό θα παρουσιαστεί ο τρόπος μέσω ενός προβλήματος. Έχει σχεδιαστεί μία τετραγωνική χαλύβδινη δοκός πάχους 10 mm και μήκους 0,5 m όπως στο σχήμα παρακάτω (Εικ.4.1). Η μία κάθετη τετραγωνική επιφάνεια έχει σταθερή θερμοκρασία 100 °C και στην άλλη υπάρχει θερμικό φορτίο -1 W. **Ζητείται να βρεθεί η θερμοκρασία στην άλλη τετραγωνική επιφάνεια και σε ποιο μήκος της δοκού η θερμοκρασία πέφτει στην μισή τιμή της (50°C)**



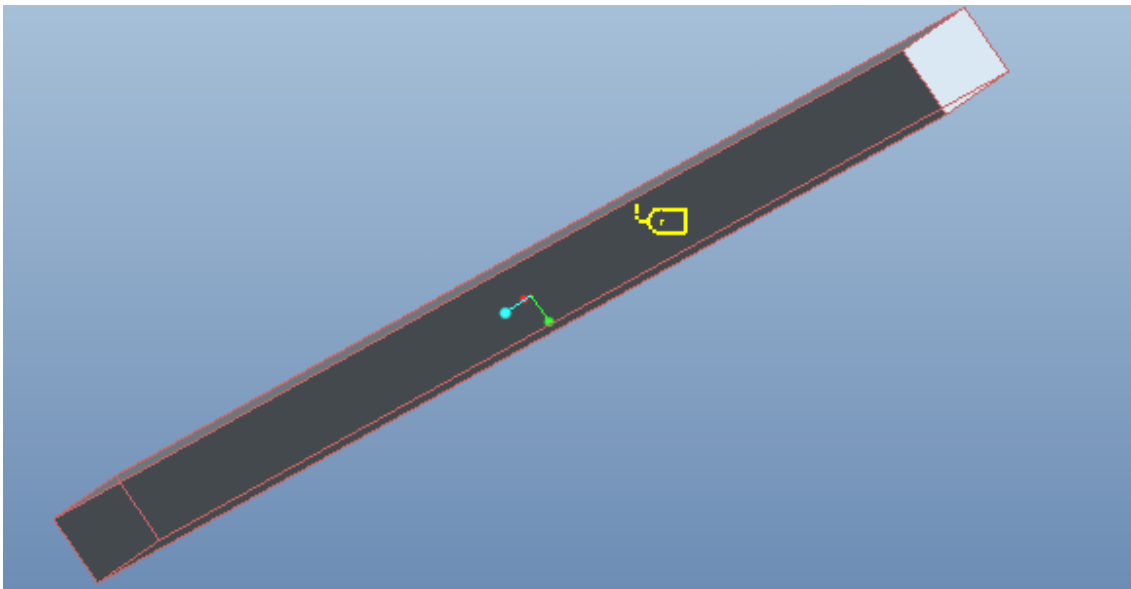
Εικ. 4.1

Αφού έχει σχεδιαστεί το μοντέλο πρέπει να οριστεί το υλικό. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.4, μέσω της μπάρας **applications** και της επιλογής **mechanica** εμφανίστηκε το παράθυρο της εικόνας 3. 5, όπου ορίστηκε το **model type** (*thermal*) και το **type** (*3D*). Στη συνέχεια το λογισμικό μπαίνει στην περιοχή του *thermal mechanics* και εμφανίζει στη δεξιά πλευρά του προγράμματος την μπάρα της εικόνας 4. 2. Πριν γίνει η οποιαδήποτε ανάλυση πρέπει να οριστεί το υλικό. Αυτήν τη φορά θα επιλεγεί υλικό χάλυβας από την υπάρχον βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού. Από την πάνω μπάρα και την επιλογή **properties** → **materials** ή αλλιώς από το εικονίδιο που είναι δέκατο στην κάθετη σειρά της εικόνας 4.2, το λογισμικό εμφανίζει το παράθυρο των υλικών. Από το παράθυρο αυτό επιλέγεται το υλικό κάνοντας κλικ πάνω στο υλικό και έπειτα δεξιά βελάκι, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3. Πατώντας ok εμφανίζεται το μοντέλο ξανά με ένα κίτρινο σημάδακι, όπως στο σχήμα της εικόνας 4.4.



Εικ. 4.2

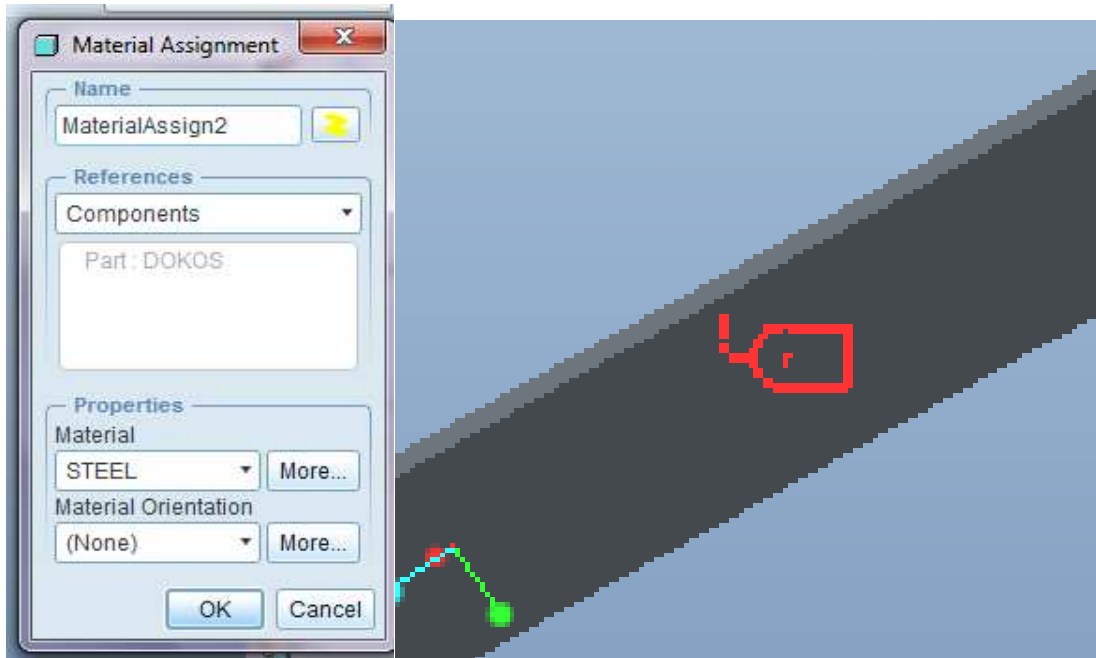
Εικ. 4.3



Εικ. 4.4

Για να επιβεβαιωθεί το υλικό, πρέπει το σημαδάκι να γίνει κόκκινο από κίτρινο. Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής **materials assignment** που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την επιλογή materials. Κάνοντας κλικ εμφανίζεται ένα παράθυρο όπως της εικόνας 4.5, με το οποίο πρέπει να επιβεβαιωθεί το υλικό.


Επιλέγοντας το υλικό που έχει οριστεί από την προηγούμενη διαδικασία από την επιλογή materials και πατώντας ok, το σημαδάκι γίνεται κόκκινο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6 και έχει πλέον οριστεί το υλικό της δοκού.





Εικ. 4.5

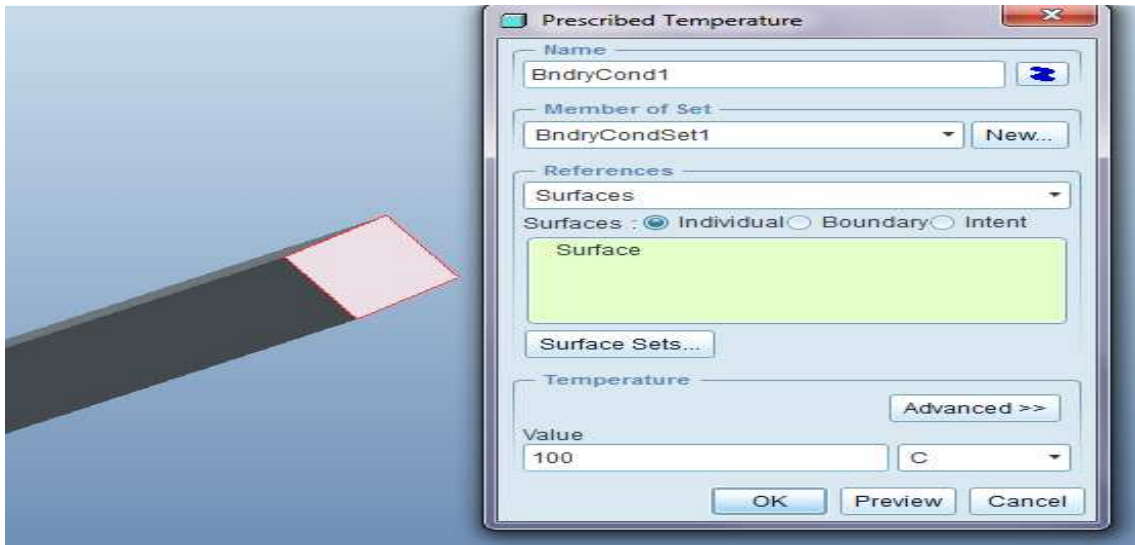
Εικ. 4.6

Το δεύτερο βήμα είναι να οριστούν οι ιδιότητες της μεταφοράς θερμότητας και οι συνοριακές συνθήκες. Στο παράδειγμα αυτό υπάρχει μία προκαθορισμένη θερμοκρασία 100 °C στη μία πλευρά της δοκού και στην άλλη πλευρά υπάρχει ένα θερμικό φορτίο -1 W(J/s). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει απώλεια θερμότητας, οπότε αναμένεται χαμηλότερη θερμοκρασία. Στην ουσία ψύχεται η δοκός.

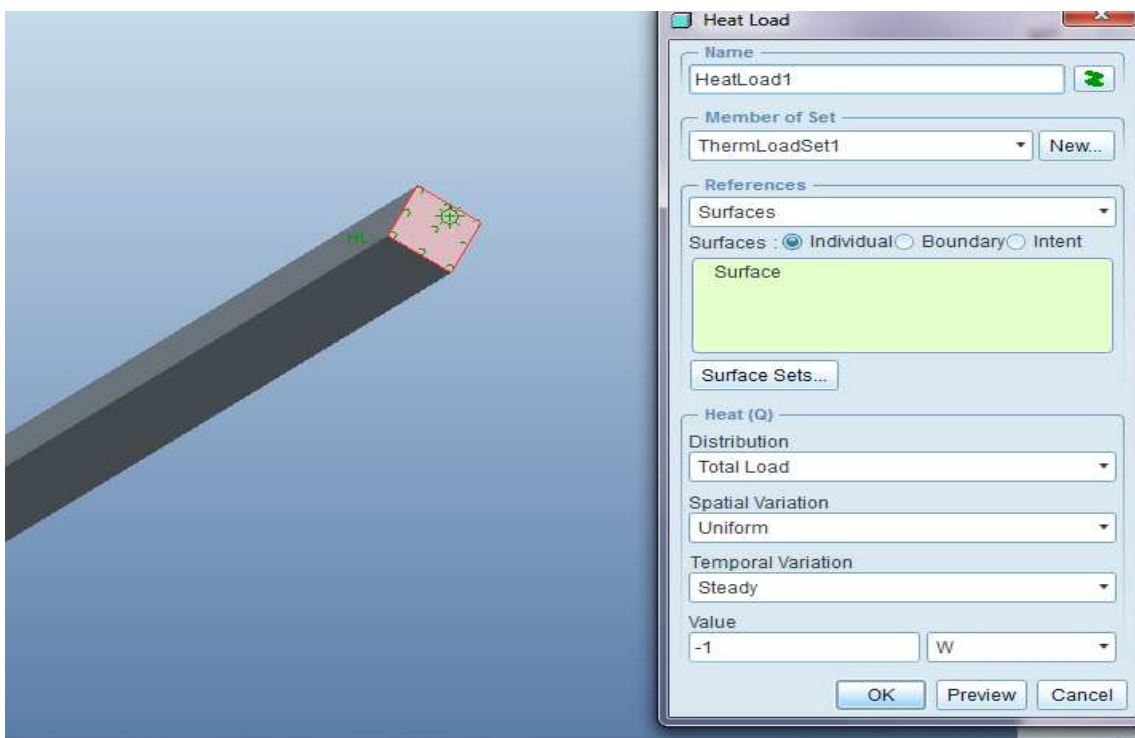
Η προκαθορισμένη θερμοκρασία ορίζεται από το εικονίδιο  (**prescribed temperature**). Εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικ.4.7), όπου ζητείται να οριστεί η επιφάνεια με την προκαθορισμένη θερμοκρασία και το ποσό της θερμοκρασίας. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής άκρης (edge) ή σημείου(point) αντί επιφάνειας(surface) αλλά και δυνατότητα ορισμού μονάδας θερμοκρασίας (F, °C,K,R). Επιλέγεται η μία πλευρά της δοκού ως επιφάνεια αναφοράς (reference) και ορίζεται θερμοκρασία 100 °C. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία στην πλευρά αυτή θα είναι μονίμως 100 °C. Πατώντας ok εμφανίζεται πάνω στην

επιφάνεια το γράμμα T με την θερμοκρασία που ορίστηκε..  Το θερμικό φορτίο

ορίζεται από το εικονίδιο  (**heat load**). Όπως και πριν, ορίζεται η επιφάνεια αναφοράς και το ποσό. Επιλέγεται η αντίθετη επιφάνεια ως επιφάνεια αναφοράς και στο πλαίσιο 'value' ορίζεται το ποσό (-1 W) όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8.



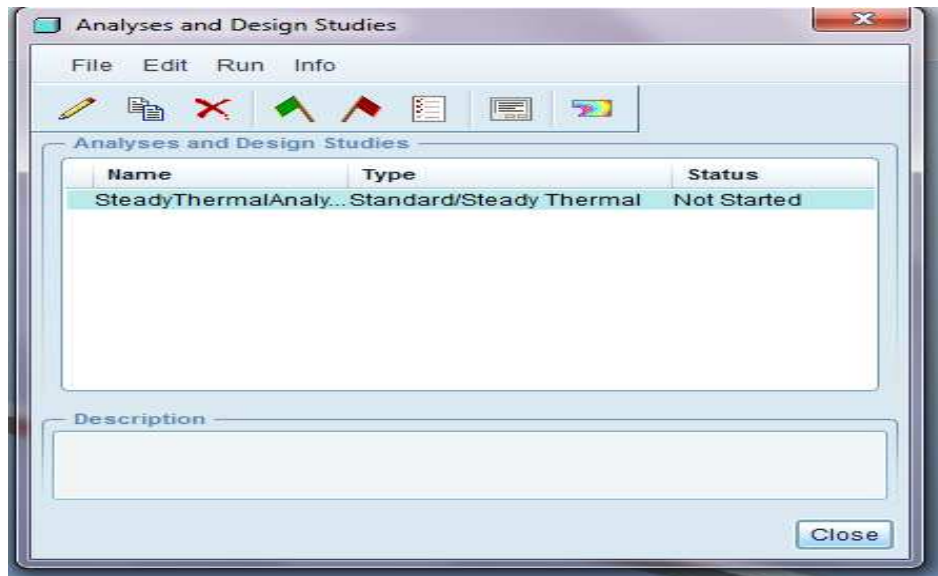
Εικ. 4.7



Εικ. 4.8

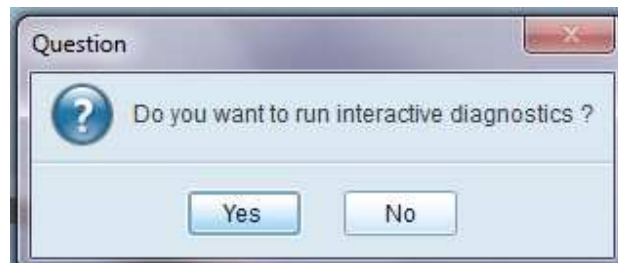
Με τον ορισμό του ποσού ορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) του προβλήματος και το επόμενο βήμα είναι να γίνει η θερμική ανάλυση και η επίδειξη των αποτελεσμάτων. Επιλέγεται **Analysis → Mechanics Analysis/Studies → File → New Steady Thermal Analysis**. Εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου πρέπει να οριστεί το όνομα της ανάλυσης που πρόκειται να γίνει. Επιλέγεται το όνομα

και έπειτα ok. Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα παράθυρο με το όνομα της ανάλυσης που έχει επιλεγεί και τον τύπο της ανάλυσης (Εικ.4.9)



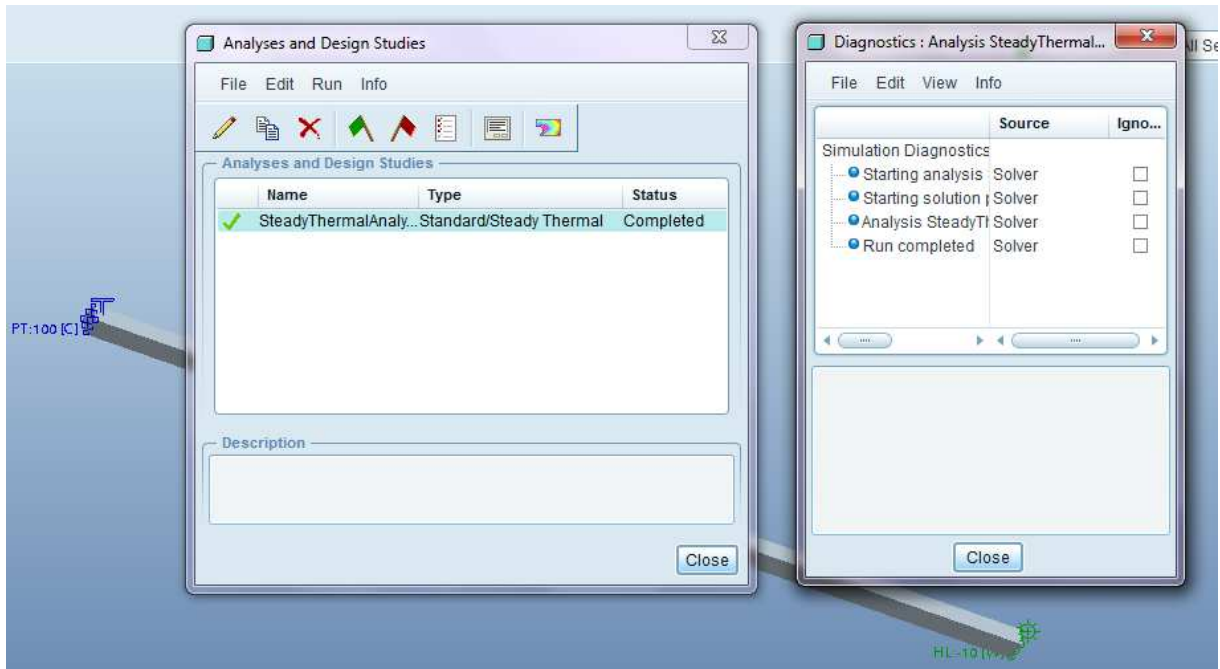
Εικ. 4.9

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της ανάλυσης πρέπει να πατηθεί η πράσινη σημαία του σχήματος (Εικ.4.9). Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα με μία ερώτηση (Εικ.4.10) να εμφανίζει κατά τη διάρκεια της ανάλυσης τυχόν προβλήματα. Για παράδειγμα αν δεν έχει οριστεί το υλικό του μοντέλου δεν μπορεί να γίνει η ανάλυση και αυτομάτως εμφανίζεται παράθυρο διαγνωστικού σφάλματος.




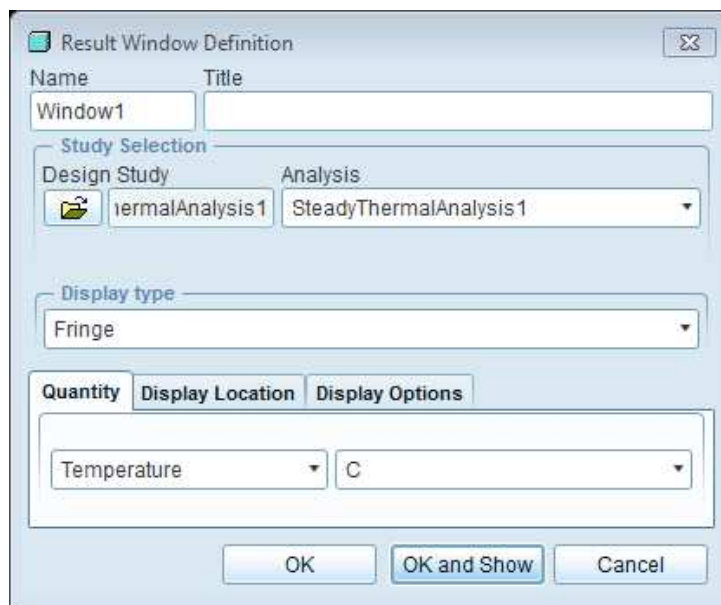
Εικ. 4.10

Επιλέγεται yes και έπειτα ο υπολογιστής αρχίζει την ανάλυση. Αναλόγως το μέγεθος, την πολυπλοκότητα της ανάλυσης αλλά και τις δυνατότητες του ηλεκτρονικού υπολογιστή, η ανάλυση μπορεί να διαρκέσει από δευτερόλεπτα έως και ώρες. Στο παράδειγμα αυτό η χρονική διάρκεια ήταν ελάχιστη και εμφανίστηκαν τα εξής παράθυρα της εικόνας 4.11.



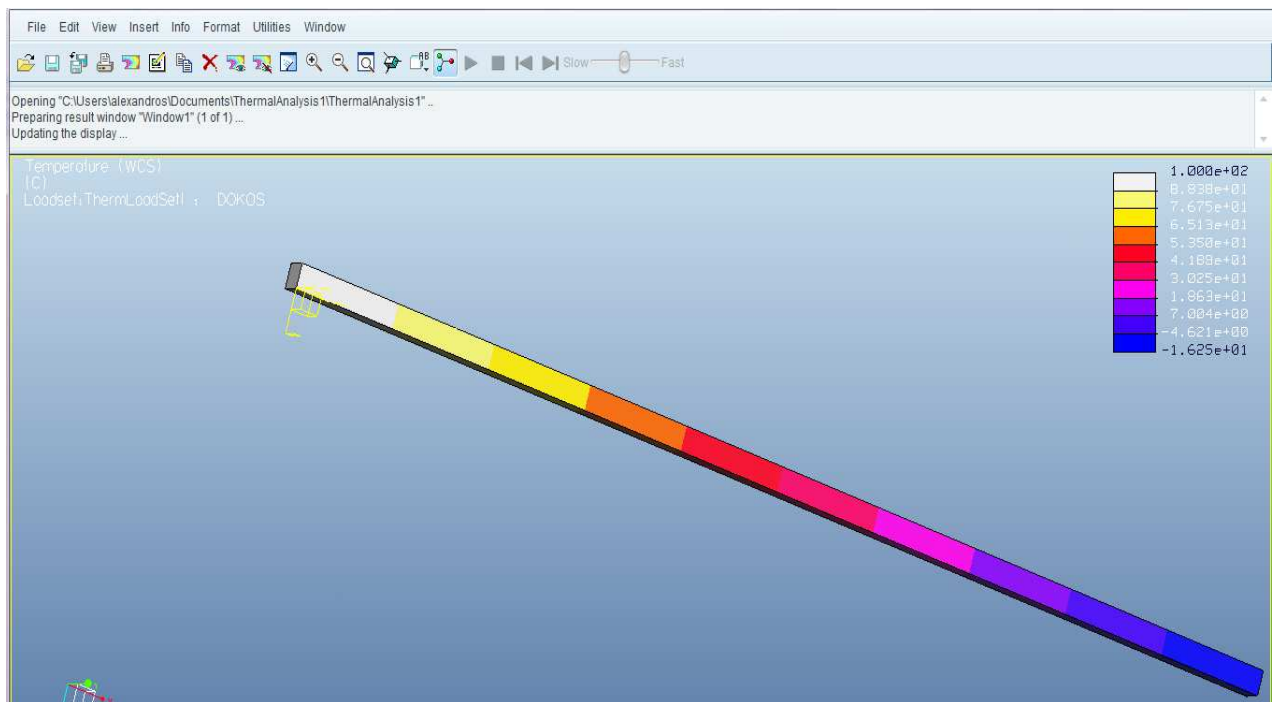
Εικ. 4.11

Στο δεξί παράθυρο εμφανίζονται τυχόν σφάλματα και στο αριστερό παράθυρο ενημερώνεται ο χρήστης για την κατάσταση της ανάλυσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα (Εικ.4.11) δεν παρουσιάζονται τυχόν σφάλματα και η ανάλυση έχει ολοκληρωθεί (status,completed). Τελευταίο βήμα είναι η απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Για να γίνει αυτό πρέπει να επιλεχθεί το δεξιό εικονίδιο του παραθύρου  και έπειτα εμφανίζεται ένα παράθυρο όπως στο παρακάτω σχήμα(Εικ.4.12)

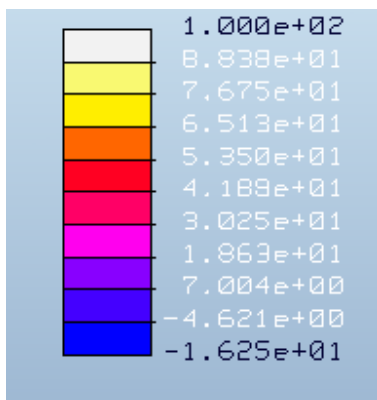


Εικ. 4.12

Στο παράθυρο αυτό, από την επιλογή **Display type** ορίζεται ο τύπος της απεικόνισης. Υπάρχουν τρεις επιλογές, *fringe*, *vectors*, *graph*, όπου αντίστοιχα επιλέγεται αν το αποτέλεσμα θα απεικονιστεί στην μορφή που είναι το μοντέλο, σε διανύσματα ή σε γραφική παράσταση. Επίσης από την επιλογή **Quantity** ορίζεται το είδος του αποτελέσματος όπως θερμοκρασία, θερμική ροή και οι αντίστοιχες επιθυμητές μονάδες απεικόνισης. Αφού στο παράδειγμα αυτό είναι επιθυμητή η θερμοκρασία στην επιφάνεια της δοκού, επιλέγεται θερμοκρασία και αντίστοιχα η μονάδα μέτρησης °C και έπειτα "ok and show".



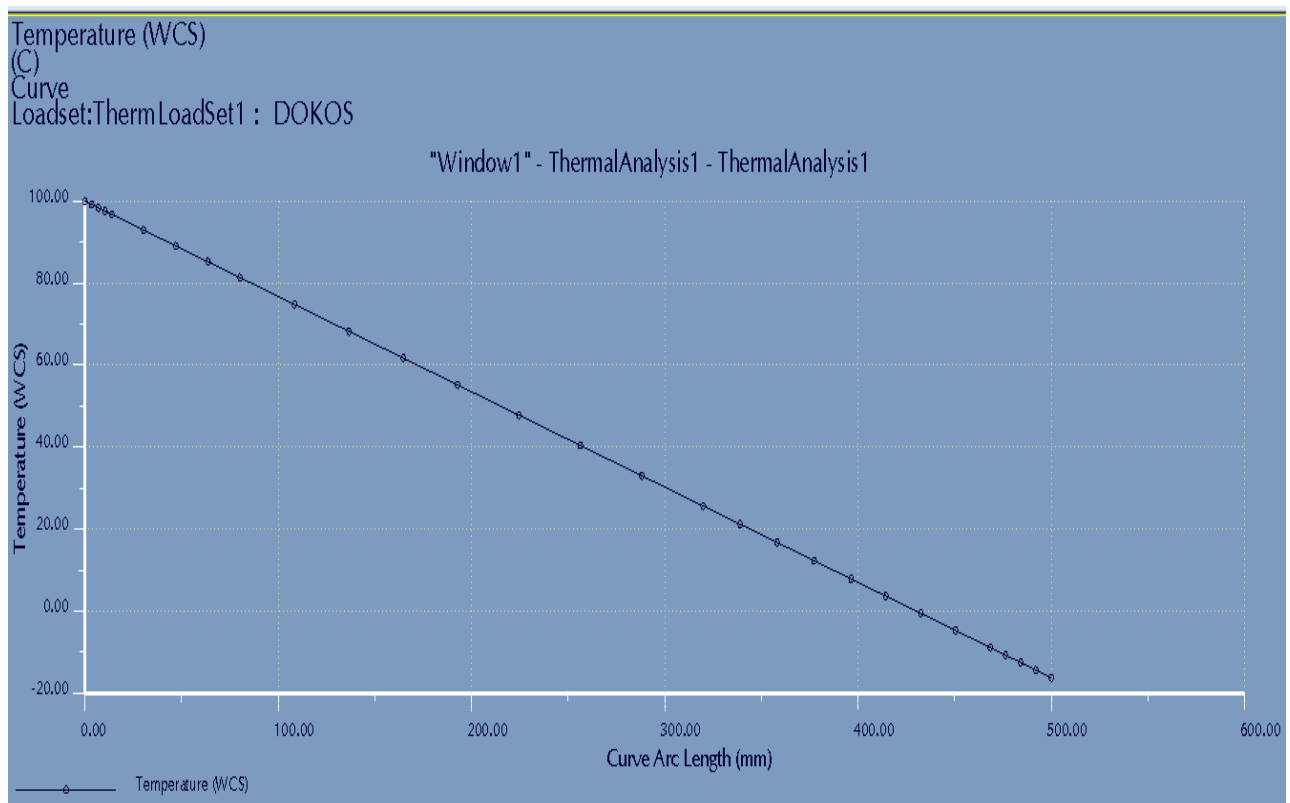
Εικ. 4.13



Εικ. 4.14

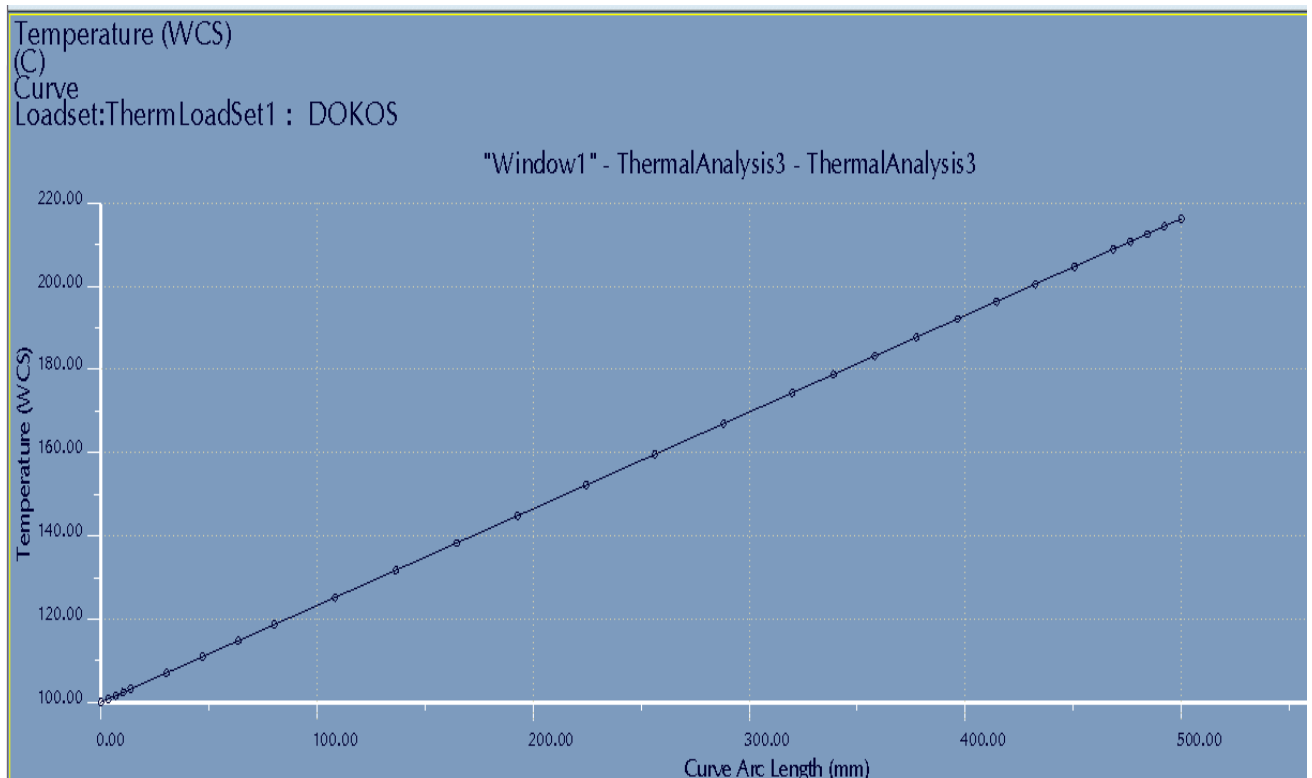


Όπως φαίνεται στις εικόνες 4.13 και 4.14 η μία επιφάνεια με την προκαθορισμένη θερμοκρασία παραμένει στους 100°C και η θερμοκρασία της άλλης επιφάνειας είναι **-16°C**. Για να βρεθεί σε ποιο μήκος της δοκού η θερμοκρασία πέφτει κατά το ήμισυ, πρέπει να απεικονιστεί το διάγραμμα μήκους-θερμοκρασίας. Για να γίνει αυτό στο *Display type* επιλέγεται **graph** και στο *Quantity*, **temperature**. Το λογισμικό ζητάει να οριστεί μία ακμή της δοκού, όπου θα παρουσιάζεται το γράφημα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ 4.15) και το σημείο της δοκού όπου η θερμοκρασία πέφτει κατά το ήμισυ είναι **220mm**.



Εικ. 4.15

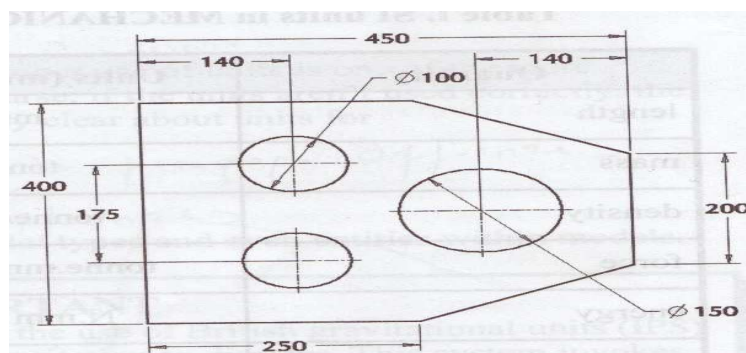
Αν για το ίδιο πρόβλημα είχε οριστεί θετική τιμή του θερμικού φορτίου (1 W), τότε η θερμοκρασία θα ήταν θετική και λογικά πάνω από το διπλάσιο των 100 °C αν ληφθεί υπόψη το πόσο ψύχθηκε η δοκός. Κάνοντας ακριβώς τα ίδια βήματα όπως παραπάνω, φαίνεται όντως (Εικ 4.16) ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια όπου δεν είναι προκαθορισμένη η θερμοκρασία, είναι 216 °C.



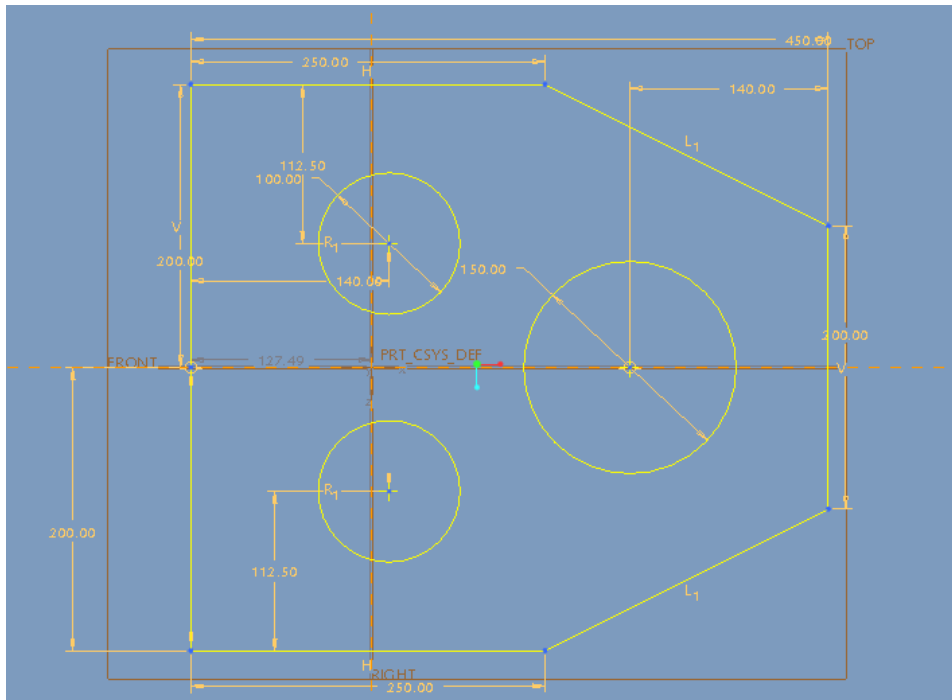
Εικ. 4.16

#### **4.2) Δημιουργώντας 3D θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης με προκαθορισμένη θερμοκρασία και συναγωγή**

Στην ενότητα αυτή θα σχεδιαστεί ένα απλό αντικείμενο πάχους 50mm και θα γίνει θερμική ανάλυση όπως αναφέρεται και στον τίτλο. Θα γίνει επίδειξη αποτελεσμάτων σε τρισδιάστατη μορφή των διανυσμάτων θερμικής ροής, της κατανομής θερμοκρασίας και των ισόθερμων επιφανειών. Σχεδιάζεται το εξάρτημα της εικόνας 4.17.

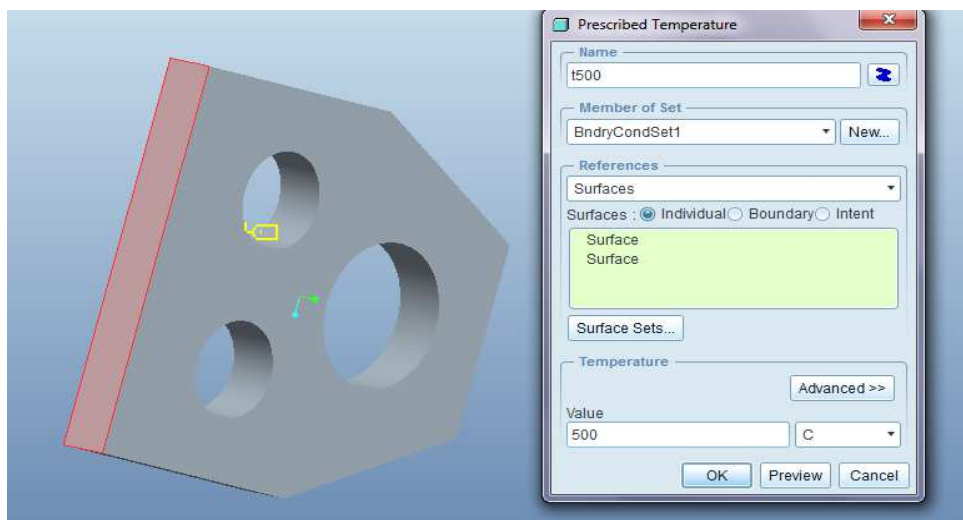


Εικ. 4.17




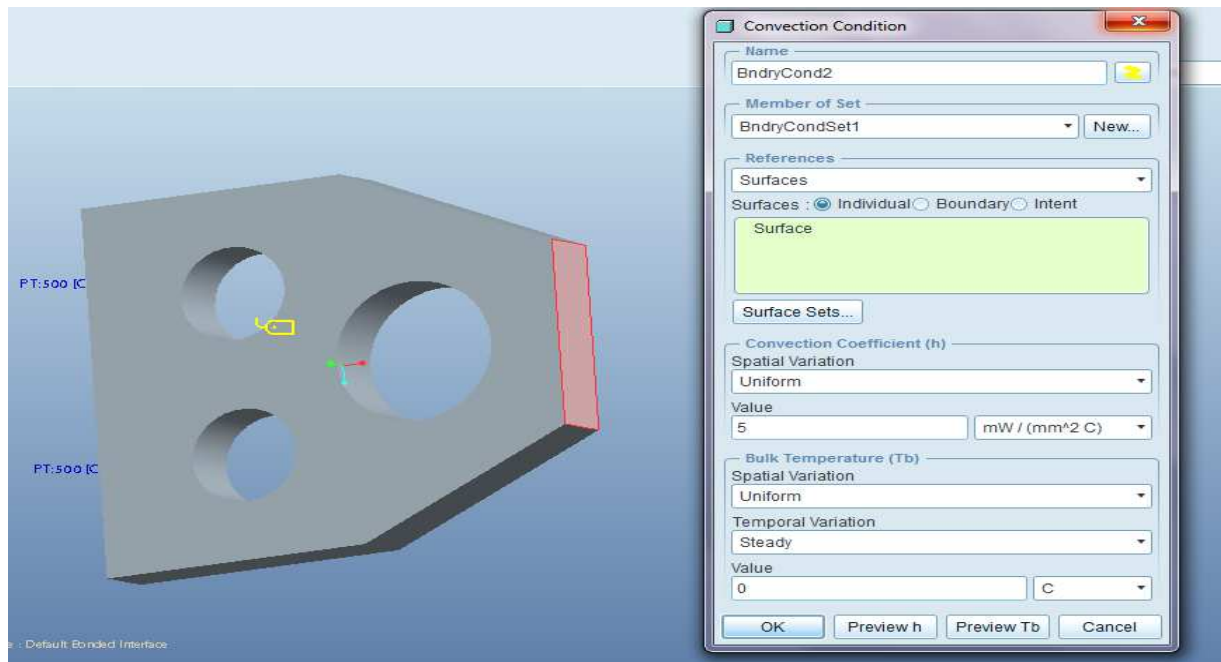
Εικ. 4.18) Απεικόνιση sketch του αντικειμένου

Αφού ολοκληρώθηκε η σχεδίαση, επιλέχθηκε η εφαρμογή *mechanica thermal* όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες και επιλέχθηκε υλικό του αντικειμένου ο χαλκός (CU) που υπάρχει στην βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού. Στην αριστερή κάθετη επιφάνεια (Εικ.4.19) ορίζεται προκαθορισμένη θερμοκρασία 500°C (*prescribed temperature as a boundary condition*) και στη δεξιά κάθετη επιφάνεια δημιουργείται συνθήκη συναγωγής με συντελεστή συναγωγής 5 mW/(mm<sup>2</sup>°C) και εξωτερική θερμοκρασία 0°C. Η διαδικασία για να οριστεί προκαθορισμένη θερμοκρασία έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.6.



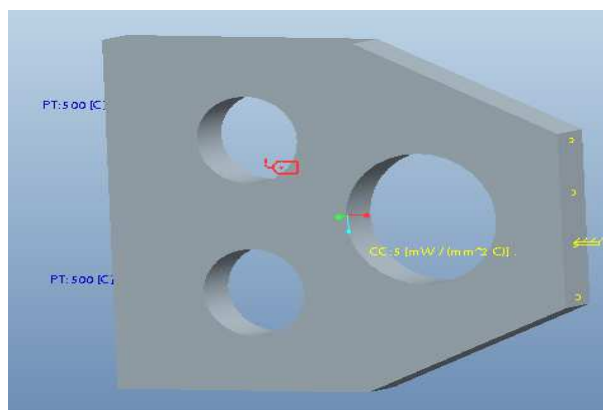
Εικ. 4.19) Δημιουργώντας προκαθορισμένη θερμοκρασία

Για να δημιουργηθεί συνθήκη μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή πρέπει να πατηθεί το εικονίδιο  ή αλλιώς από την πάνω οριζόντια μπάρα **insert** → **convection condition**. Εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικ. 4.20), στο οποίο επιλέγεται ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας (5 mW/(mm<sup>2</sup>°C)), η εξωτερική θερμοκρασία (0°C), η επιφάνεια στην οποία θα οριστεί η συνθήκη συναγωγής αλλά και το είδος της ανάλυσης (σταθερή και όχι εξαρτώμενη από το χρόνο), όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα.



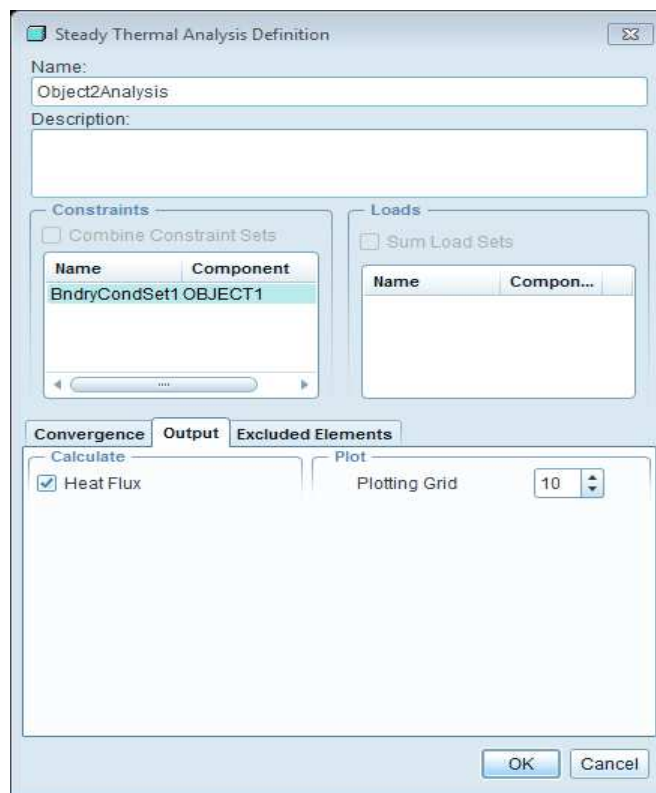
Εικ. 4.20) Δημιουργώντας συνθήκη συναγωγής

Όλες οι άλλες επιφάνειες του αντικειμένου που δεν έχουν οριστεί σε αυτές άλλες συνθήκες θεωρούνται μονωμένες. Αφού ορίστηκαν όλες οι συνθήκες και το υλικό κατασκευής, το αντικείμενο είναι έτοιμο προς την ανάλυση



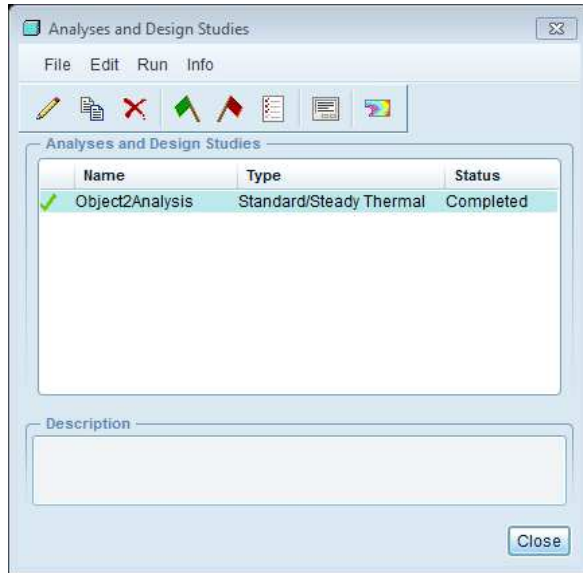
Εικ. 4.21) Τελικό μοντέλο

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.21, αν οι συνθήκες έχουν οριστεί σωστά, τότε αυτές εμφανίζονται με διαφορετικό χρώμα πάνω στο μοντέλο. Για να γίνει η ανάλυση πρέπει να γίνουν τα εξής βήματα: **Analysis** → **Mechanica Analyses/Studies** → **File** → **New Steady State Thermal**. Τώρα δεν υπάρχει κάποιο θερμικό φορτίο όπως υπήρχε στην προηγούμενη ενότητα. Έχοντας κάνει τα προηγούμενα βήματα ανοίγει ένα παράθυρο (Εικ. 22). Αν πατηθεί η μπάρα **output**, εμφανίζεται η δυνατότητα **plotting grid** (σχεδίαση πλέγματος), στην οποία θα επιλεγεί ο αριθμός **10** από 4 που προϋπήρχε. Από εκεί επιλέγεται πόσο πυκνό είναι το πλέγμα. Ο αριθμός αυτός υπολογίζεται με βάση την εμπειρία του χρήστη. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός τόσο πιο αναλυτικό είναι το αποτέλεσμα.

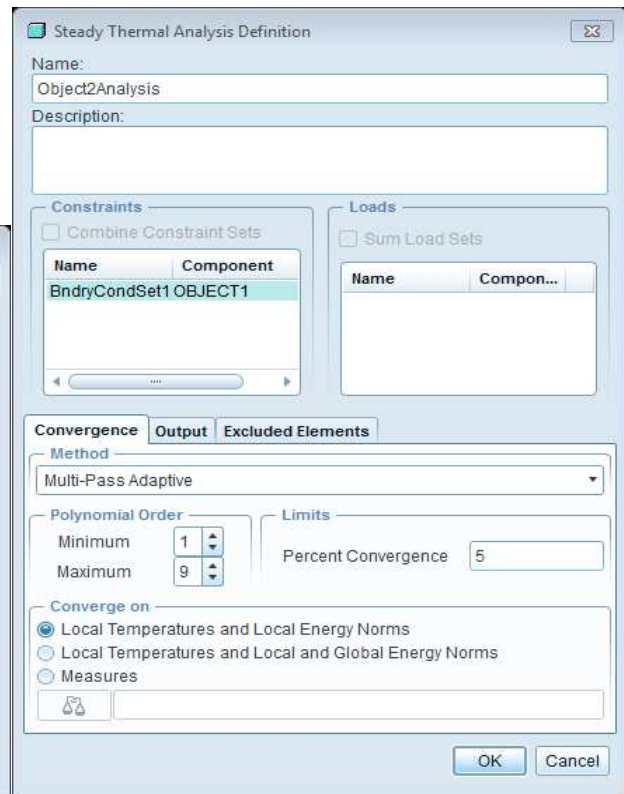


Εικ. 4.22


Έπειτα επιλέγεται ok και γίνεται η ανάλυση με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.6. Η ανάλυση διαρκεί κάποια δευτερόλεπτα. Εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικ. 4.23) όπου αναφέρει την κατάσταση την ανάλυσης και αν αυτή ολοκληρώθηκε. Για να γίνει η ανάλυση πιο λεπτομερώς και να μειωθεί το ποσοστό αστοχίας, πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα: **Edit** → **Analyses/Studies** και στο νέο παράθυρο (Εικ. 4.24) να επιλεγεί ως **percent convergence 5** από 10, η μέθοδος να γίνει **Multi-Pass Adaptive** από Single-Pass Adaptive με **max 9**.

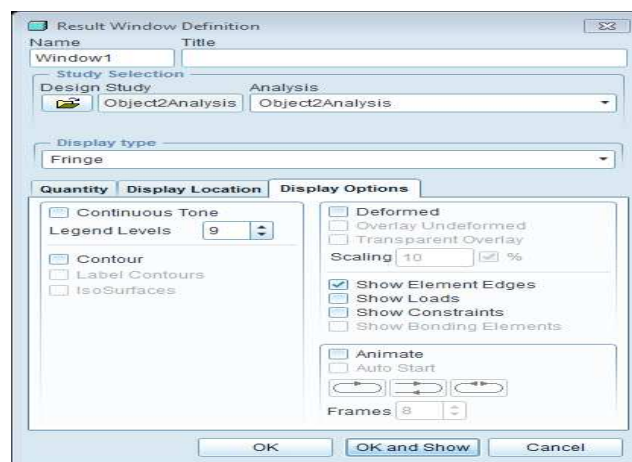


Εικ. 4.23



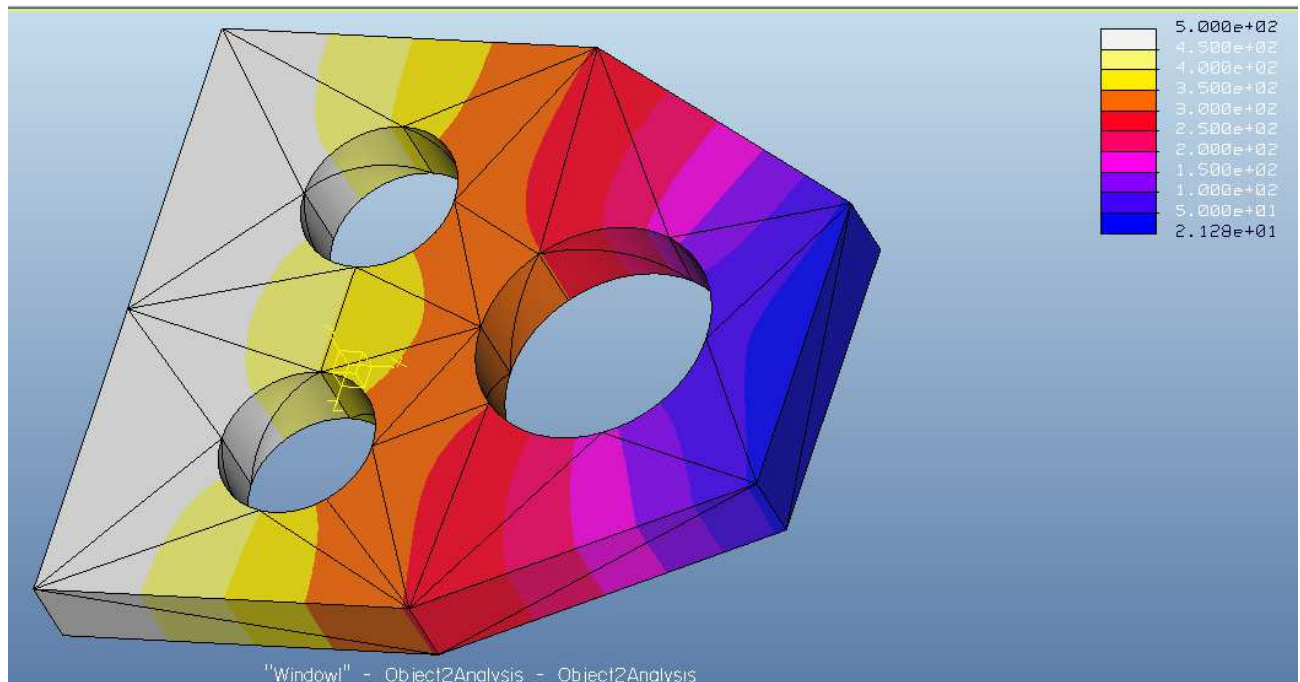
Εικ. 4.24

Τώρα για να δημιουργηθούν παράθυρα τα οποία θα καταδείξουν τα αποτελέσματα πρέπει να επιλεγεί το εικονίδιο **Review Results** . Αυτή τη φορά θα γίνει μία πιο αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων σε σχέση με την προηγούμενη ενότητα. Αφού πατηθεί το Review Results υπάρχει η δυνατότητα να δειχθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου όπου θα φαίνονται τα όρια των στοιχείων. Αυτό γίνεται τσεκάροντας την επιλογή **Show Element Edges** στην μπάρα **Display Options** (Εικ. 4.25). Στην μπάρα Quantity έχει επιλεγεί θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.



Εικ. 4.25

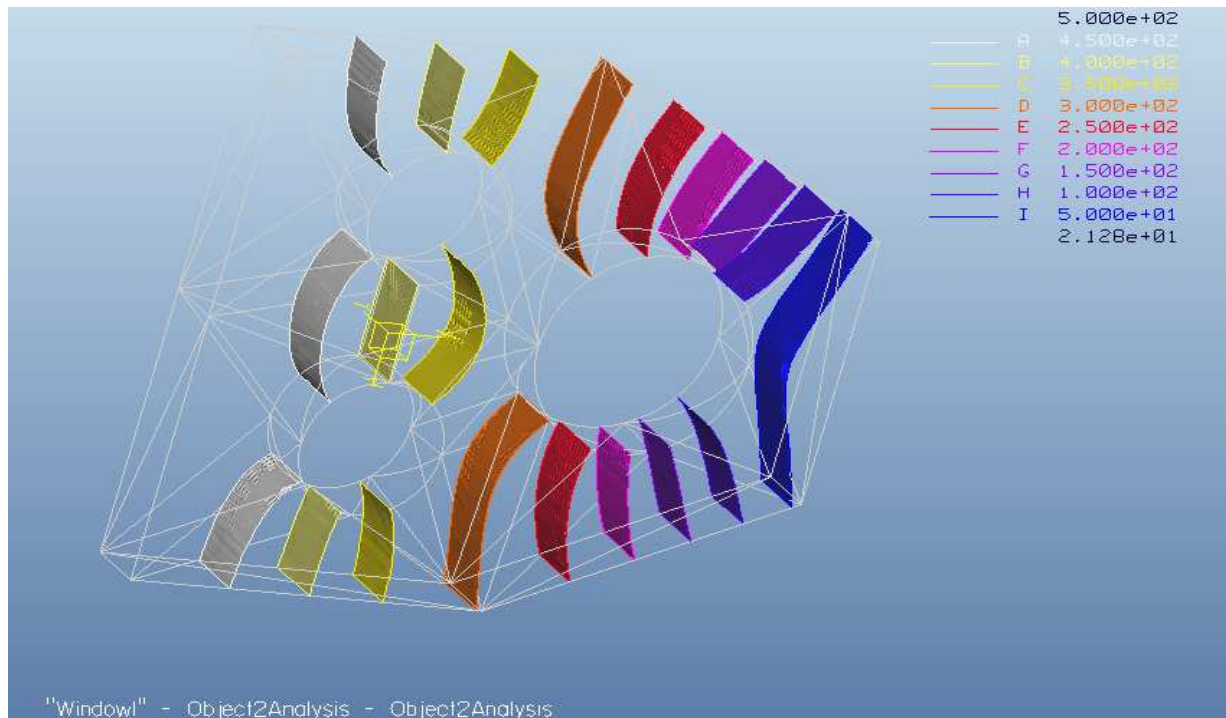
Αφού πατηθεί "ok and show" εμφανίζονται τα αποτελέσματα. Το μοντέλο παρουσιάζεται χωρισμένο σε πεπερασμένα στοιχεία, όπου είναι εμφανή που χωρίζονται και με κατώτατη θερμοκρασία τους 21°C(Εικ.26).



Εικ. 4.26) Κατανεμημένη θερμοκρασία

Χρήσιμη πληροφορία είναι ότι από την επιλογή **Info** υπάρχει η δυνατότητα να υπάρχει σημάδι με την εκάστοτε θερμοκρασία στην περιοχή όπου παρατηρείται η χαμηλότερη θερμοκρασία ή και η υψηλότερη θερμοκρασία. Βρίσκει συνήθως εφαρμογή σε πολύπλοκα μοντέλα με πολύπλοκες αναλύσεις όπου δεν είναι εμφανής με το μάτι η εκάστοτε πληροφορία. Για να καταδειχθούν οι ισόθερμες επιφάνειες πρέπει στην επιλογή *Display Options* να τσεκαριστεί η επιλογή **Contour**(Περίγραμμα) και η επιλογή **Isosurfaces** (Ισοεπιφάνειες). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4.27.



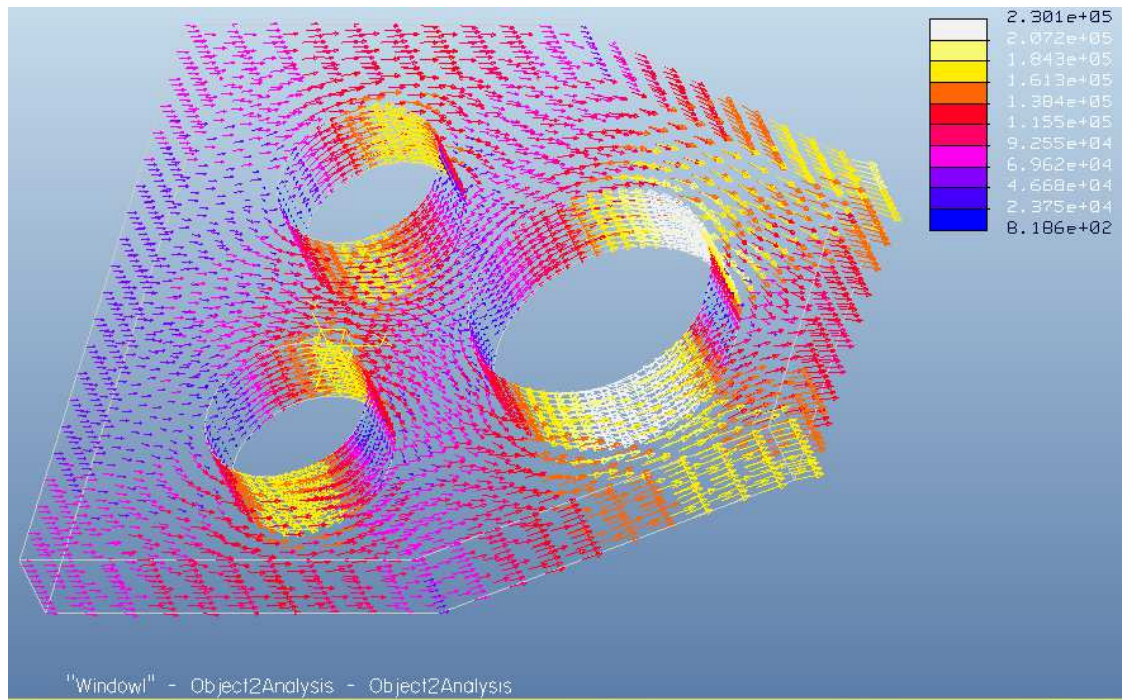


Εικ. 4.27) Θερμοκρασία σε ισόθερμες επιφάνειες

Για να παρουσιαστεί η θερμική ροή σε διανύσματα θα πρέπει στο *Display Type* να τσεκαριστεί το **Vectors** (Διανύσματα), στο *Quantity* το **Flux** (Ροή) και στο *Component* το **Magnitude** (Μέγεθος). Στην επιλογή *Display Options* αν τσεκαριστεί η επιλογή *Animate*, τότε γίνεται μία κινηματική παρουσίαση των διανυσμάτων θερμικής ροής στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 28 με μέγιστη θερμική ροή 230100 W/m<sup>2</sup>

Μέχρι τώρα έχουν παρουσιαστεί τα κύρια χαρακτηριστικά σε **θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης** για τρισδιάστατα στερεά μοντέλα. Επίσης συνοριακές συνθήκες (*boundary conditions*) όπως, προκαθορισμένη θερμοκρασία (*prescribed temperature*), θερμικό φορτίο (*heat load*), συναγωγή (*convective*) και δυνατότητες του λογισμικού όσο αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν διαφορετικά είδη μοντέλων.

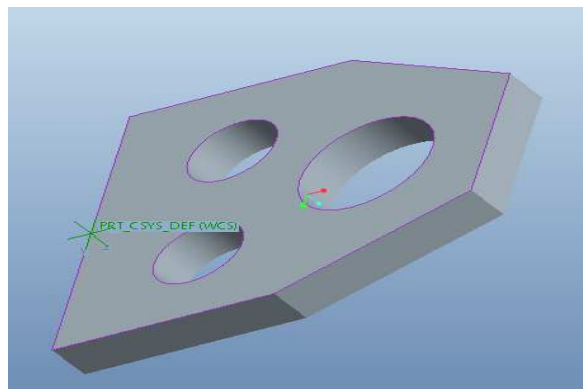




Εικ. 4.28) Απεικόνιση διανυσμάτων θερμικής ροής

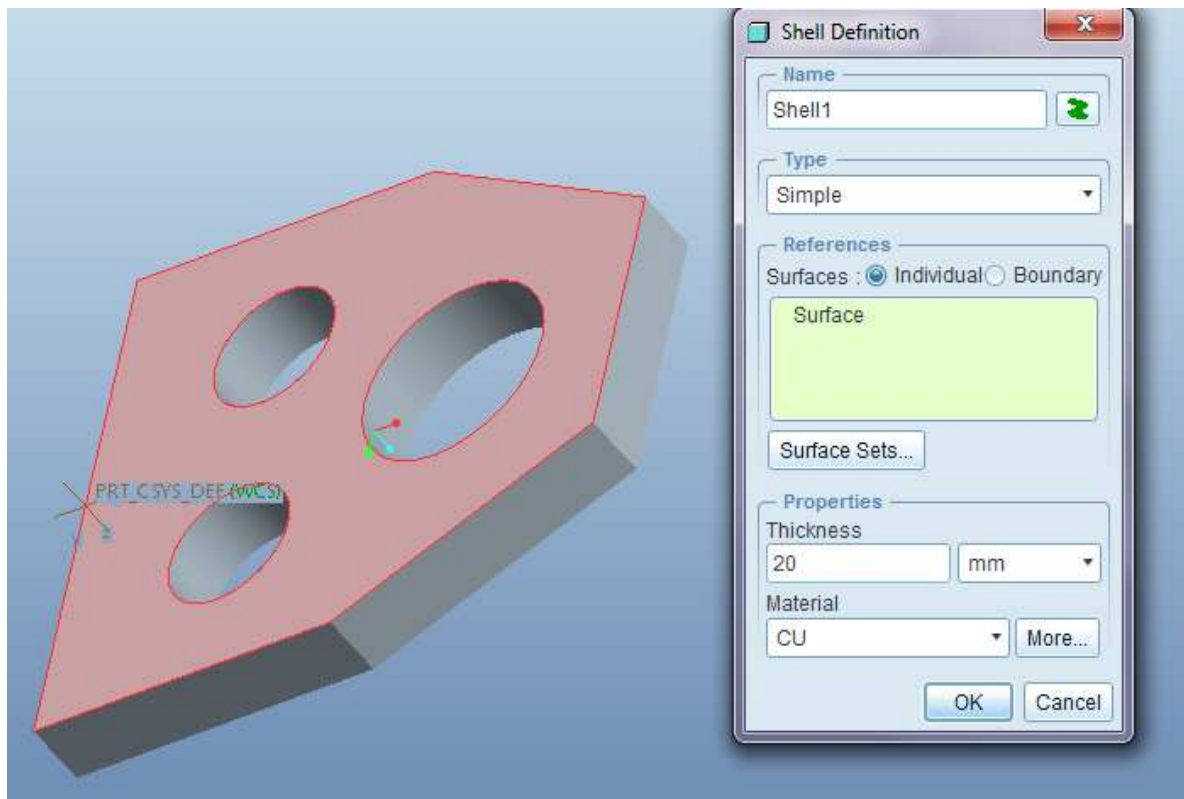
### 4.3) Δισδιάστατο μοντέλο (2D Model)

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο με την προηγούμενη ενότητα (4.2) για να γίνει η ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων σε δύο διαστάσεις. Από το κύριο μενού και ακολουθώντας τα βήματα **Edit** → **Mechanica Model Setup** → **Advanced** επιλέγεται η **2D Plane Stress (Thin Plate)** επιλογή. Στην επιλογή αυτή πρέπει να οριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων ως σύστημα αναφοράς και η επιφάνεια στην οποία θα γίνει η ανάλυση. Όταν γίνει η σωστή επιλογή που να ταιριάζει το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με την επιφάνεια, τότε το λογισμικό εμφανίζει την επιφάνεια με μοβ χρώμα (Εικ. 4.29)



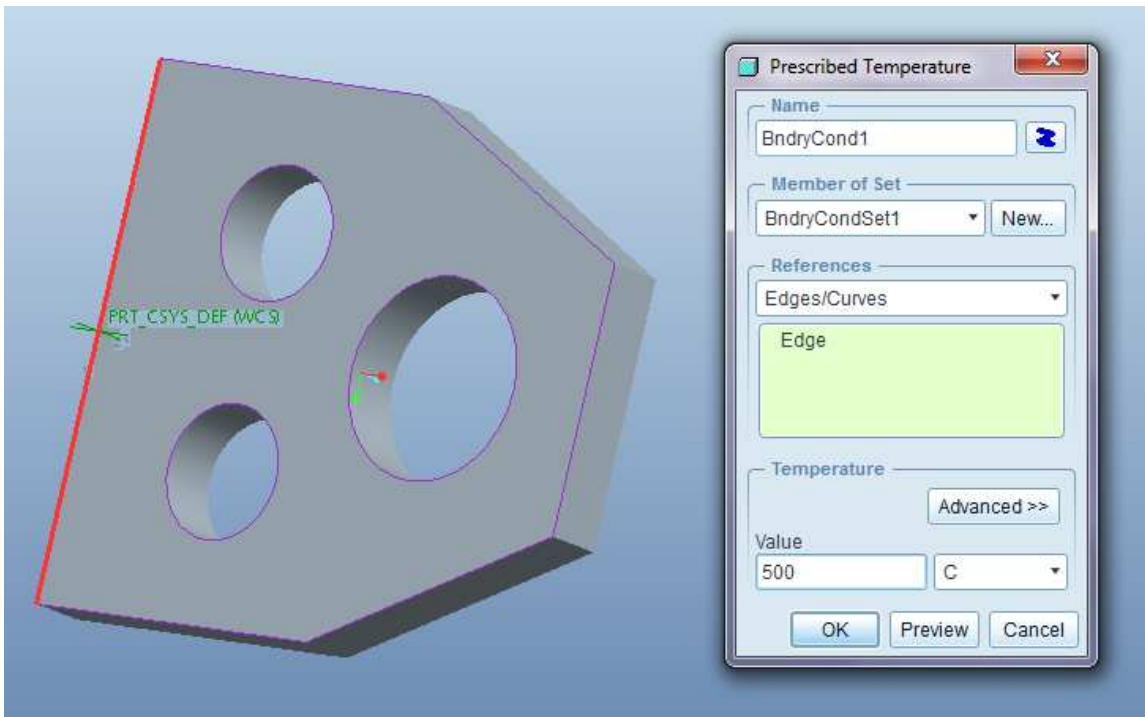
Εικ. 4.29

Τώρα θα πρέπει να οριστούν ξανά οι συνοριακές συνθήκες (προκαθορισμένη θερμοκρασία και συνθήκη συναγωγής). Πριν γίνει αυτό θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα κέλυφος στη επιλεγμένη επιφάνεια το οποίο είναι απαραίτητο στην **2D Plane Stress** (Thin Plate) επιλογή. Από την πάνω οριζόντια μπάρα και μέσω της επιλογής insert, ορίζεται το shell (κέλυφος). Εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου πρέπει να οριστεί η επιφάνεια, το υλικό και το πάχος. Επιλέγεται η μπροστινή επιφάνεια που αναφέρθηκε πριν (μοβ επιφάνεια), χαλκός και πάχος 20mm (Εικ. 4.30).

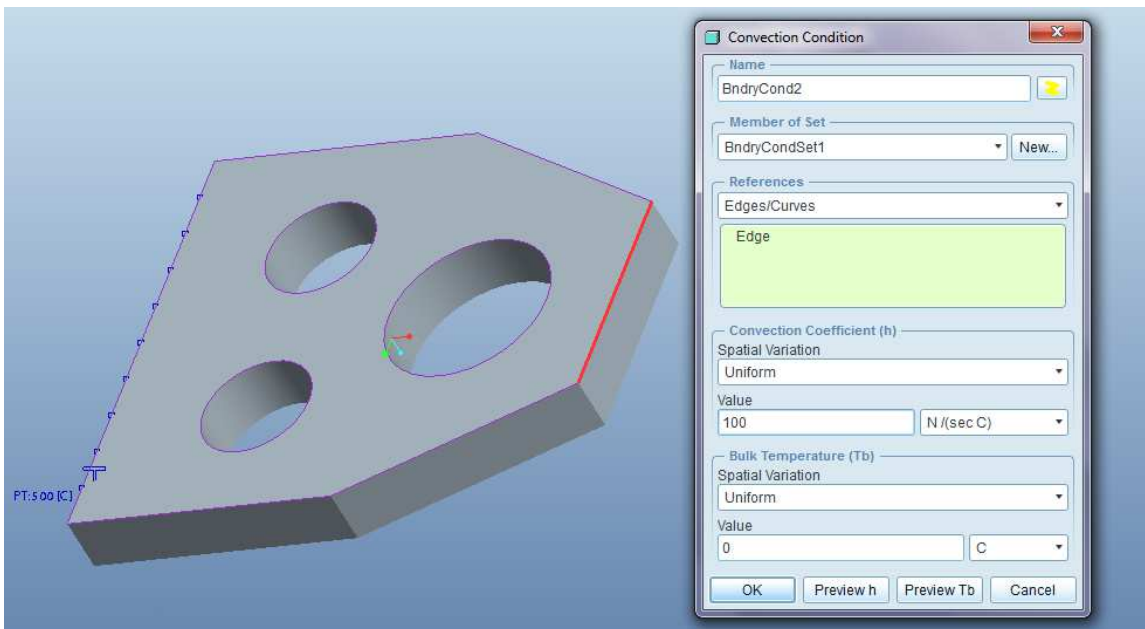


Εικ. 4.30

Για να οριστεί προκαθορισμένη θερμοκρασία θα πρέπει να γίνει η ίδια διαδικασία που έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες. Η διαφορά είναι ότι θα οριστεί η αριστερή ακμή ως αναφορά (reference) και όχι η επιφάνεια (Εικ. 4.31). Θα οριστεί ίδια θερμοκρασία (500°C). Όσο αφορά τη δημιουργία συνθήκης συναγωγής, αυτό που αλλάζει είναι η αναφορά (reference) όπου και εκεί θα επιλεγεί μία ακμή (Edge) και συγκεκριμένα η δεξιά ακμή της επιφάνειας που έχει επιλεγεί. Το πρόβλημα και το συνήθως σφάλμα γίνεται στον ορισμό του συντελεστή συναγωγής θερμότητα. Στο παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας ήταν  $5 \text{ mW/mm}^2\text{°C}$ . Ο αριθμός αυτός αντιπροσωπεύει θερμική ροή (mW) ανά βαθμό Κελσίου και επιφάνεια. Στις δύο διαστάσεις καθορίζεται συντελεστής ο οποίος είναι επιμήκης μόνο. Αντιπροσωπεύει θερμική ροή ανά βαθμό Κελσίου και μονάδα μήκους αντί επιφάνεια, οπότε θα πρέπει να γίνει προσεκτικά η μετατροπή. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το πάχος που ορίστηκε (20mm). Κάθε χιλιοστό της ακμής αντιπροσωπεύει τα 20 τετραγωνικά χιλιοστά του μοντέλου. Έτσι, για να επιτύχει παρόμοιο αποτέλεσμα με την προηγούμενη ενότητα θα επιλεγεί  $100 \text{ N/mm sec } \text{°C}$  ( $\text{N/mm sec} = \text{mW/mm}^2$ ). Η εξωτερική θερμοκρασία θα παραμείνει  $0 \text{ °C}$  (Εικ. 4.32).

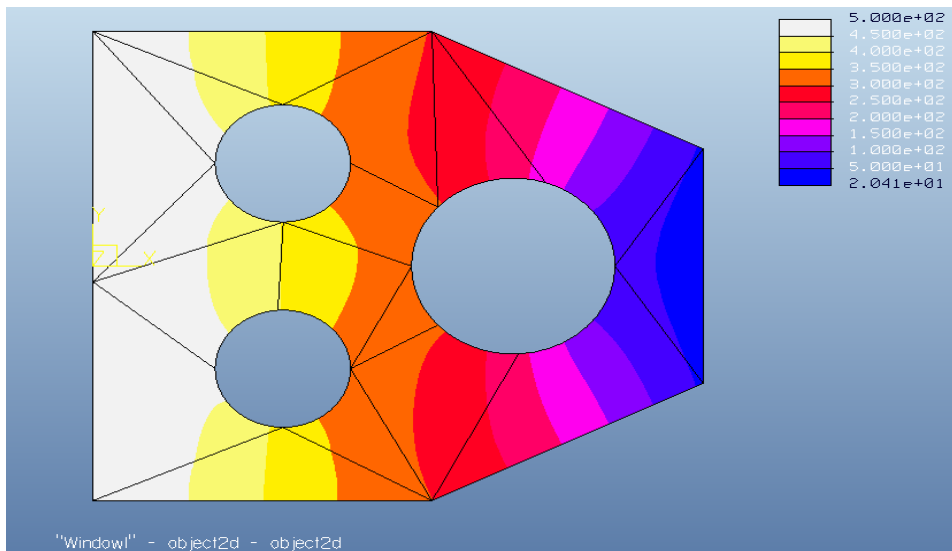


Εικ. 4.31

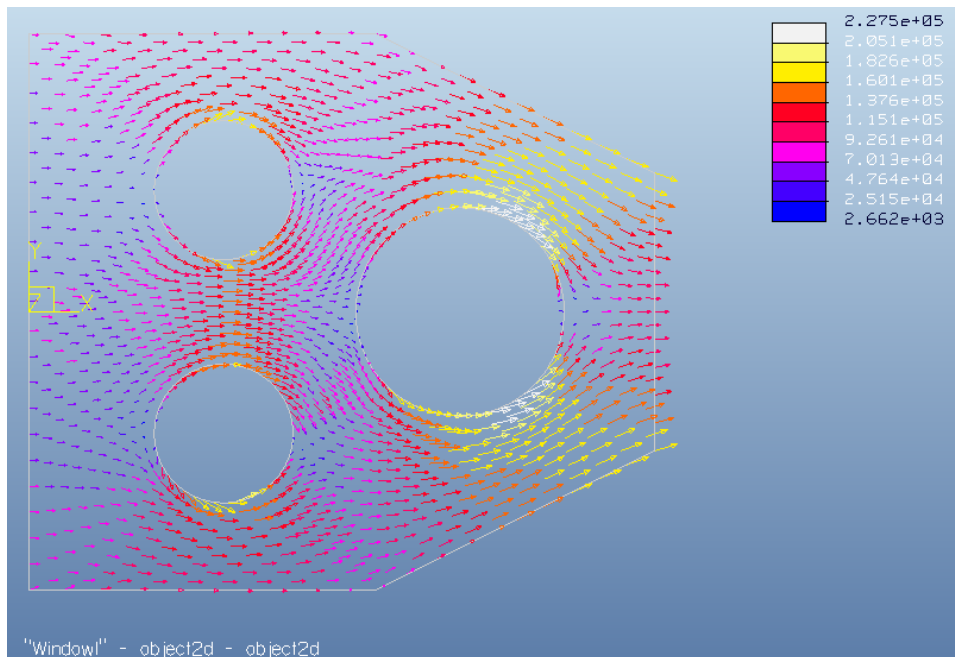


Εικ. 4.32

Το μοντέλο πλέον έχει ολοκληρωθεί. Για να γίνει θερμική ανάλυση, θα ξανά δημιουργηθεί νέα θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης (new steady state thermal) όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες. Ως μέθοδος επιλέγεται *Quick Check* και *Plotting Grid 10*. Αφού ορίστηκε η μέθοδος, επιλέγεται start run για να αρχίσει η ανάλυση. Παρακάτω (Εικ. 4.33, 4.34) φαίνονται τα αποτελέσματα με ελάχιστη θερμοκρασία 20°C(21°C σε 3D) και μέγιστη θερμική ροή 227500 W/m<sup>2</sup>(230100 W/m<sup>2</sup> σε 3D).

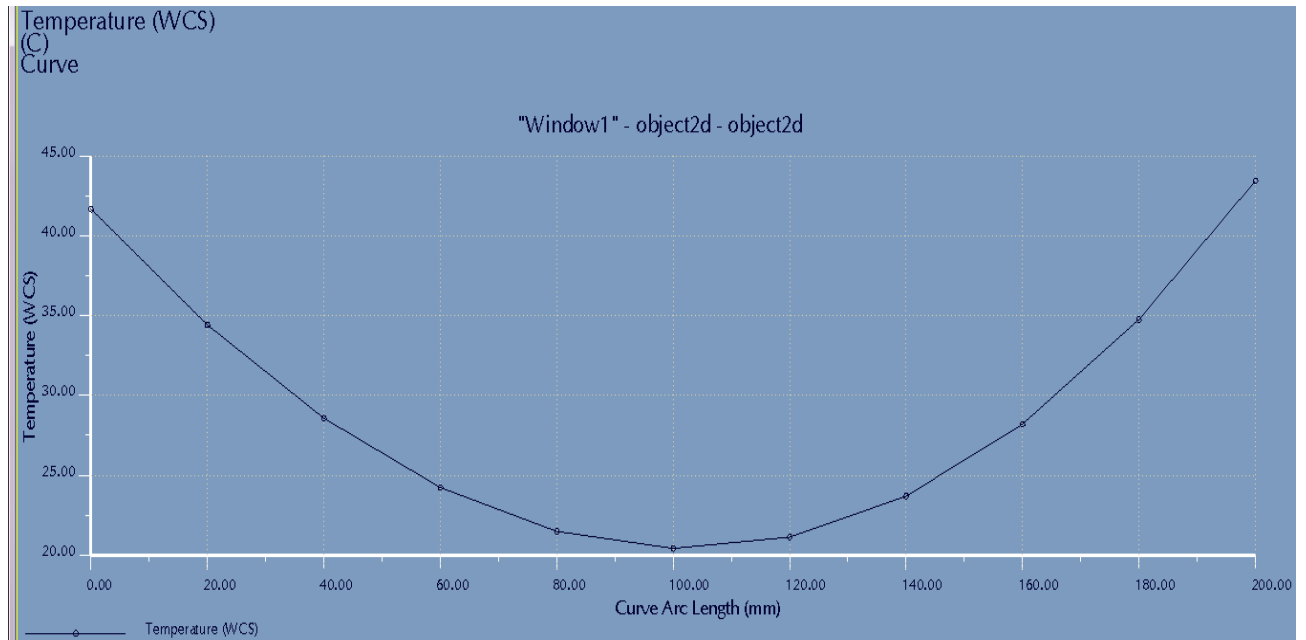


Εικ. 4.33



Εικ. 4.34

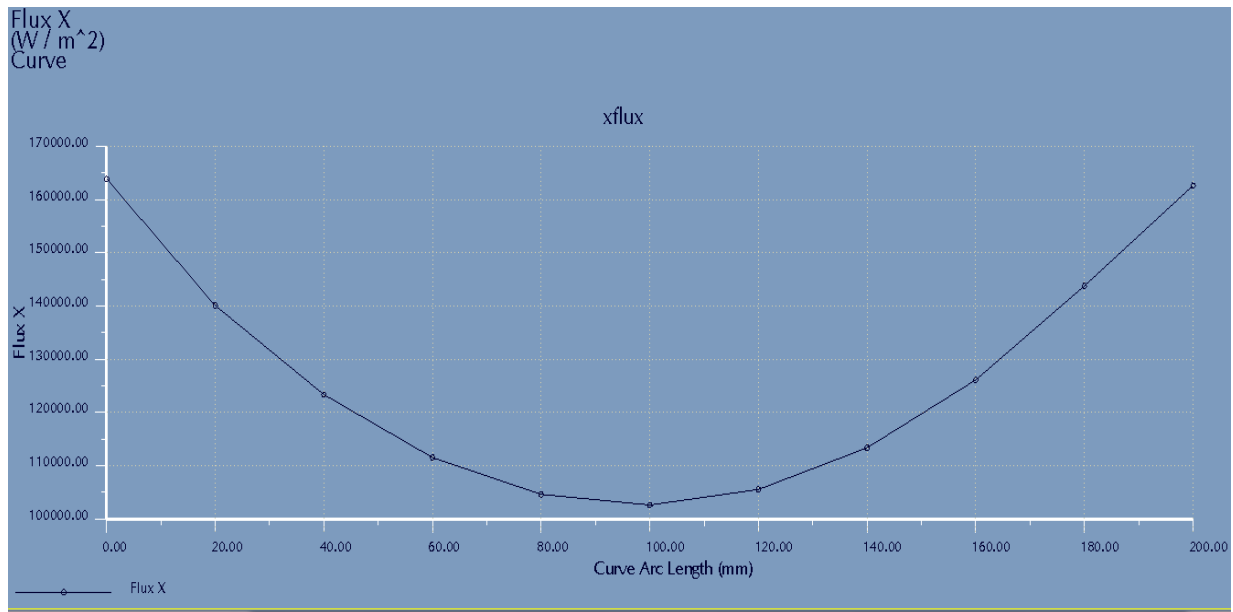
Αν ενδιαφέρει να αναλυθεί πιο λεπτομερώς η θερμοκρασία σε μία ακμή τότε όπου *Display Type* επιλέγεται **Graph**, όπου *Quantity Temperature* και όπου *Graph Location* επιλέγεται **Curve** κάνοντας κλικ στην επιθυμητή ακμή. Για αυτό το παράδειγμα θα επιλεγθεί η δεξιά ακμή. Στην εικόνα 4.35 φαίνονται τα αποτελέσματα.



Εικ. 4.35) Απεικόνιση θερμοκρασίας στην δεξιά ακμή

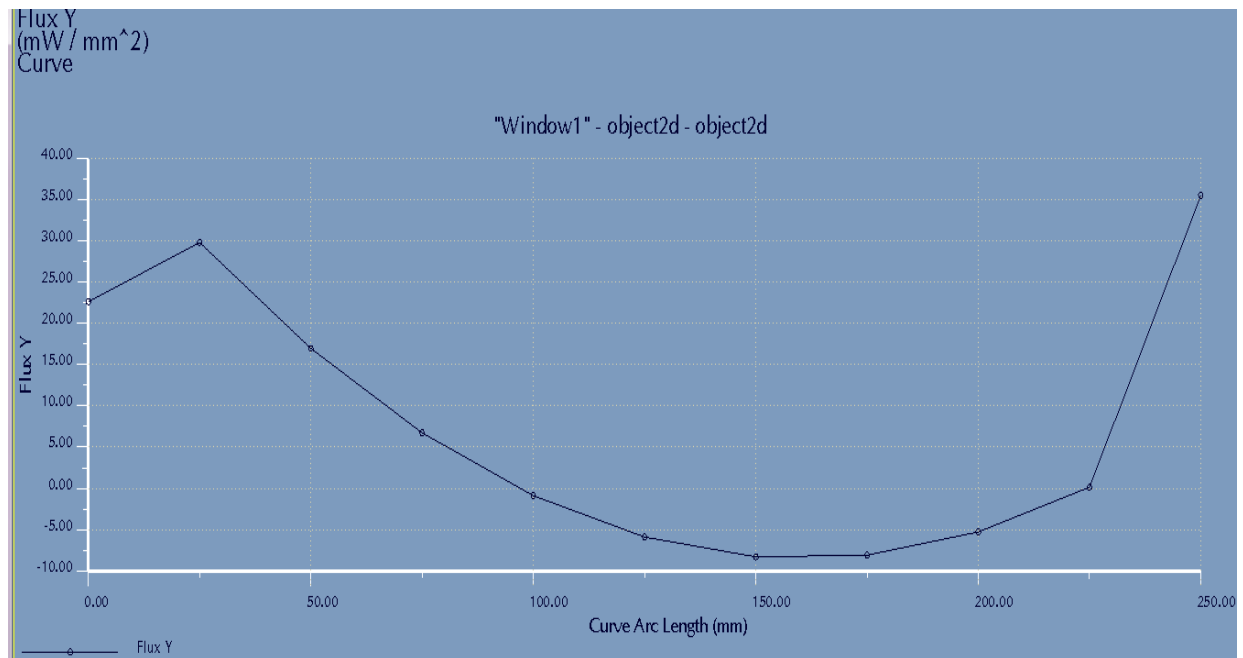
Με τον ίδιο τρόπο, υπάρχει η δυνατότητα να βρεθεί και η θερμική ροή σε μία ακμή όπως ακριβώς και με τη θερμοκρασία. Θα ληφθεί υπόψη η δεξιά ακμή πάλι. Θα υπολογιστεί δηλαδή η μεταφορά θερμότητας από τη δεξιά ακμή στο περιβάλλον. Η διαφορά είναι ότι πρέπει ως *Quantity* να επιλεγθεί **Flux** και ως *Component* ο **άξονας X**, αφού ο άξονας Y είναι παράλληλος στην επιφάνεια. Το διάγραμμα φαίνεται παρακάτω (Εικ. 4.36)

Για να υπολογιστεί η μεταφορά θερμότητας, πρέπει να γίνει προσεκτικός έλεγχος στις μονάδες. Όπως υπολογίστηκε πριν, η μέγιστη θερμική ροή είναι  $227500 \text{ W/m}^2$ . Η θερμική ροή στην ακμή έχει μονάδες τότε σε  $\text{W/m}$ . Λαμβάνοντας υπόψη το μήκος των  $20\text{mm}$  ( $0.002\text{m}$ ) και κάνοντας τον πολλαπλασιασμό η μεταφορά θερμότητας είναι  $460 \text{ Watt}$ .



Εικ. 4.36

Ένα άλλο ενδιαφέρον διάγραμμα είναι της εικόνας 4.37. Πειραματικά επιλέχθηκε να μετρηθεί η θερμική ροή στη μία οριζόντια ακμή Y. Αφού το μοντέλο θεωρείται μονωμένο στην ακμή αυτή, θα έπρεπε η θερμική ροή να ήταν 0 αλλά, όπως φαίνεται παρακάτω δεν είναι ακριβώς 0. Αυτό αποδεικνύει μικρή αστοχία του λογισμικού.



Εικ. 4.37

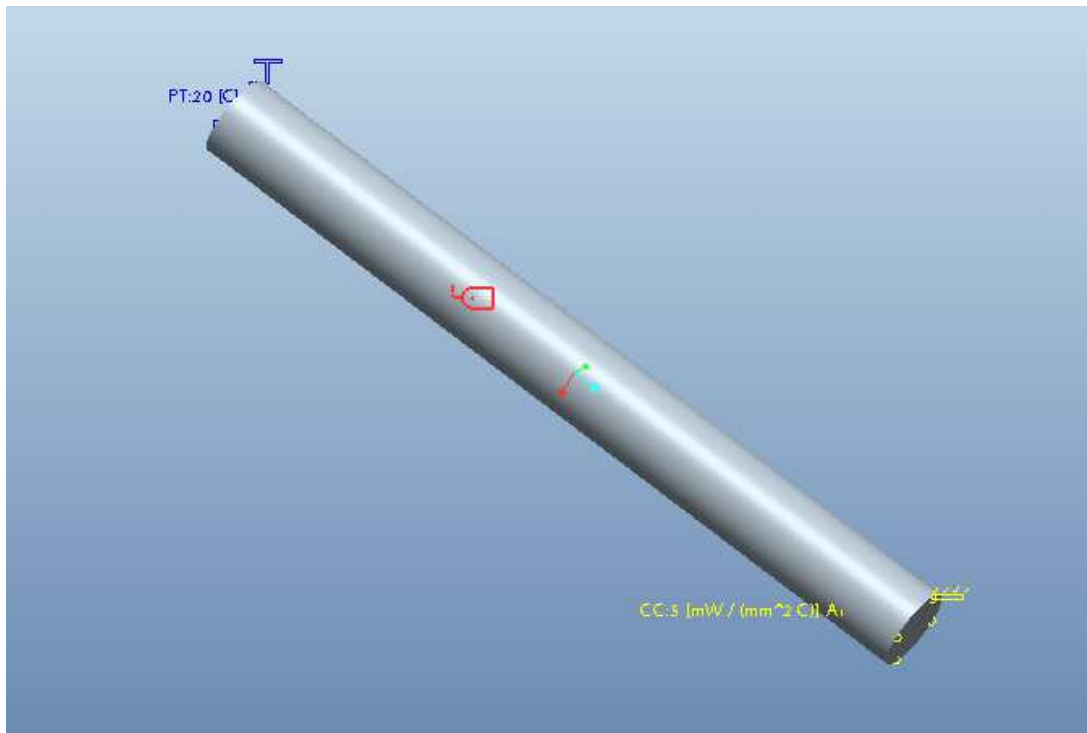


#### 4.4) Μεταβατική ανάλυση (Transient Analysis)

Η μεταβατική ανάλυση δείχνει σε τι χρονικό διάστημα το μοντέλο αντιδρά στις συνοριακές θερμικές συνθήκες. Επίσης γίνεται μεταβατική ανάλυση μόνο σε τρισδιάστατα μοντέλα. Αν οι συνοριακές συνθήκες είναι σταθερές, τότε η μεταβατική ανάλυση θα οδηγήσει σε ανάλυση σταθερής κατάστασης όπως στις προηγούμενες ενότητες αλλά θα μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που έφτασε σε σταθερή θερμική κατάσταση. Θα παρουσιαστεί ένα απλό παράδειγμα μέσω του οποίου θα γίνει επεξήγηση του τρόπου για μεταβατική θερμική ανάλυση.

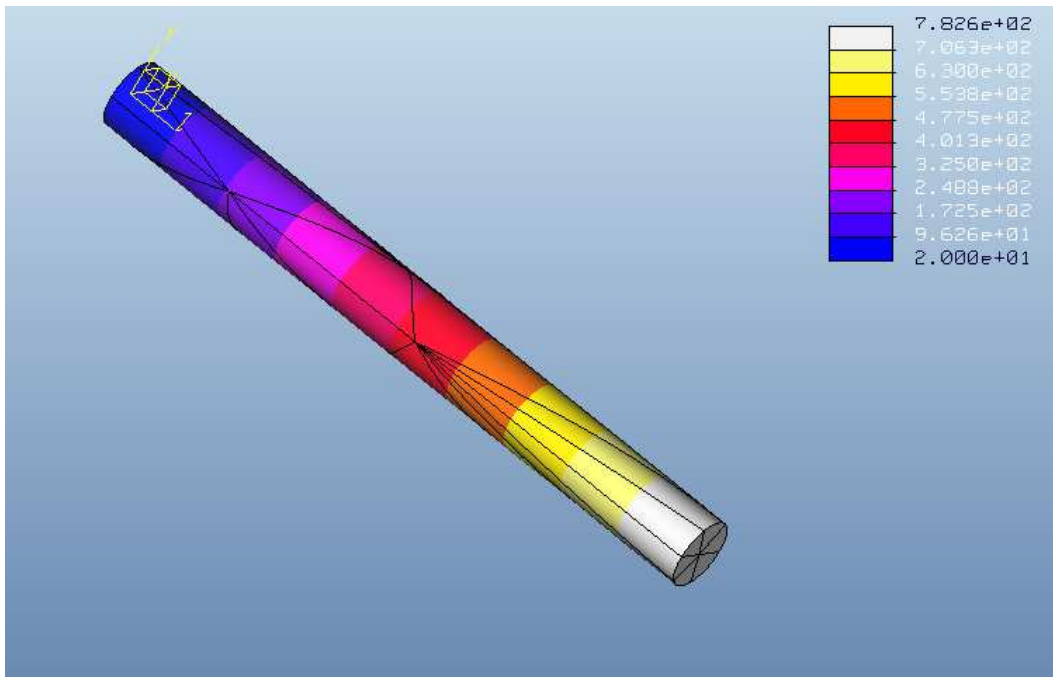
Το μοντέλο είναι μία χαλύβδινη ράβδος μήκους 300mm και διαμέτρου 30mm. Η ράβδος βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία 20°C. Η μία πλευρά της ράβδου διατηρείται στη θερμοκρασία αυτή. Ξεκινώντας από  $t=0$  sec, η άλλη πλευρά της ράβδου εκτίθεται σε πολύ θερμό περιβάλλον (1000°C) με συντελεστή συναγωγής θερμότητας  $0.5 \text{ mW/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Η υπόλοιπη επιφάνεια της ράβδου θεωρείται μονωμένη. Τα κύρια ερωτήματα που θα απαντηθούν είναι ποια είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας που εκτίθεται στο πολύ θερμό περιβάλλον και σε ποιο χρονικό διάστημα η ράβδος ήρθε σε σταθερή θερμική κατάσταση. Σχεδιάζεται η ράβδος (Εικ 4.38) και γίνεται εισαγωγή στο *mechanica thermal*.

Ορίζεται προκαθορισμένη θερμοκρασία 20°C στην αριστερή πλευρά, χρησιμοποιώντας την εντολή **Prescribed Temperature**. Έχει γίνει επεξήγηση στις προηγούμενες ενότητες. Επίσης, μέσω της εντολής **Convection Condition**, ορίζεται στην δεξιά επιφάνεια, εξωτερική θερμοκρασία 1000°C (*bulk temperature*) και συντελεστή συναγωγής θερμότητας  $0.5 \text{ mW/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*convection coefficient*).



Εικ. 4.38

Θα γίνει πρώτα μία θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης και έπειτα μεταβατική ανάλυση για να βρεθεί ο χρόνος που απαιτήθηκε για να φτάσει το μοντέλο σε θερμική ισορροπία. Ακολουθώντας τα ίδια βήματα με τις προηγούμενες ενότητες η μέγιστη θερμοκρασία του μοντέλου είναι στους **782.6 °C**. Συνοπτικά τα βήματα είναι *Analyses/Studies* → *File* → *New Steady State Thermal* → *Quick Check* → *Plotting Grid 10* → *Start Run* → *Review Results*. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω (Εικ. 4.39).

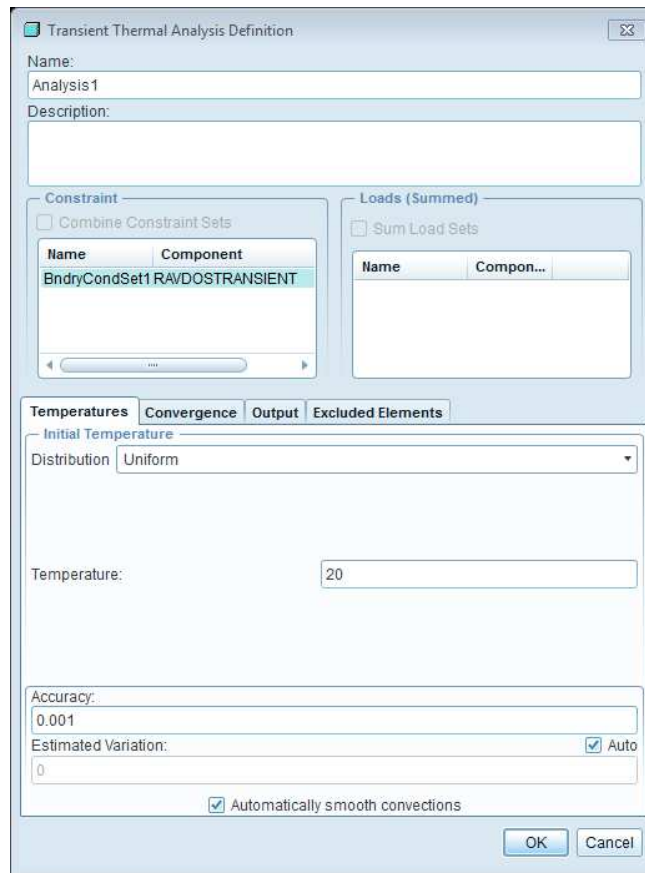


Εικ. 4.39

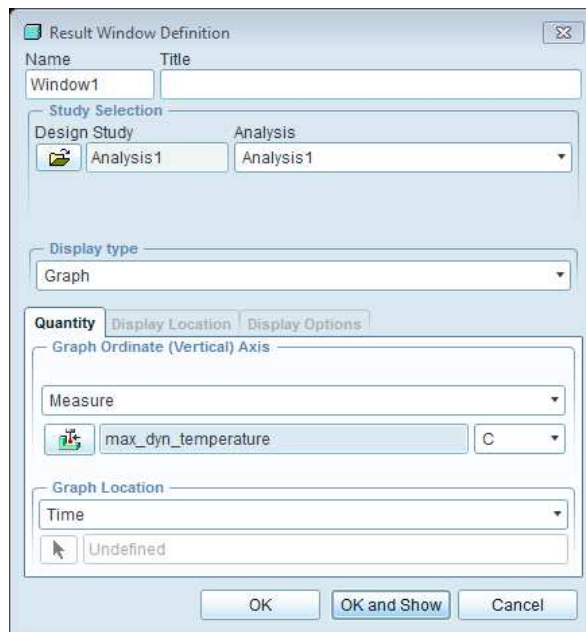
Τώρα θα γίνει μεταβατική θερμική ανάλυση όπου πρέπει να βρεθεί η ίδια τιμή για την μέγιστη θερμοκρασία και επίσης ο χρόνος για να φτάσει το μοντέλο σε θερμική σταθερή κατάσταση. Για να ξεκινήσει η διαδικασία στο παράθυρο *Analyses/Studies* επιλέγεται *File* → *New Transient Thermal*. Εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικ. 4.40) όπου επιλέγεται η εσωτερική θερμοκρασία του μοντέλου (20°C) και αφήνεται ο χρόνος 0 στο output, αφού θα ξεκινήσει από  $t=0$  μέχρι να φτάσει σε σταθερή θερμική κατάσταση.

Πατώντας ok και έπειτα start run ξεκινάει η ανάλυση. Στα αποτελέσματα ανοίγει ένα παράθυρο όπου πρέπει να επιλεγεί ποιο θα είναι το αντικείμενο του γραφήματος (Εικ. 4.41). Πατώντας "ok and show" εμφανίζεται το γράφημα, όπου φαίνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία είναι 782,1°C και ο τελικός χρόνος είναι 23721 δευτερόλεπτα (6 ώρες και 35 λεπτά).

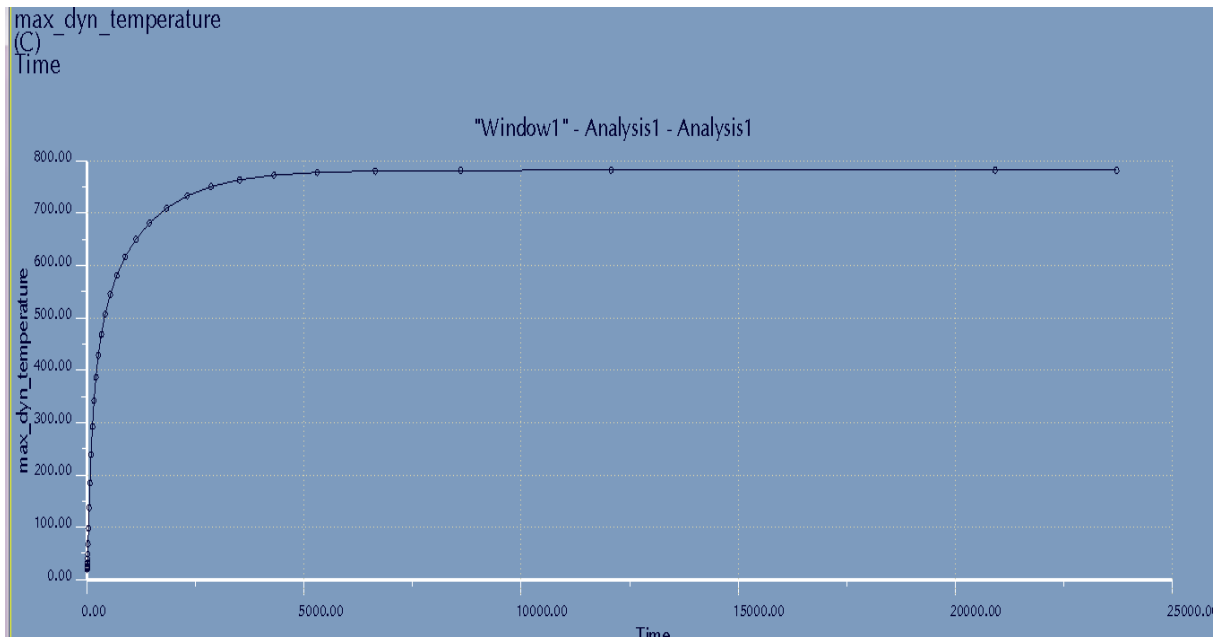




Εικ. 4.40

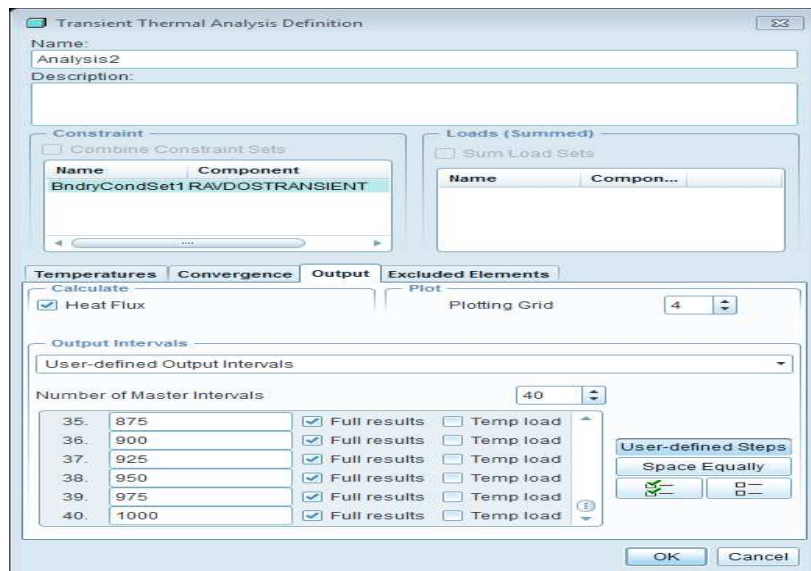


Εικ. 4.41



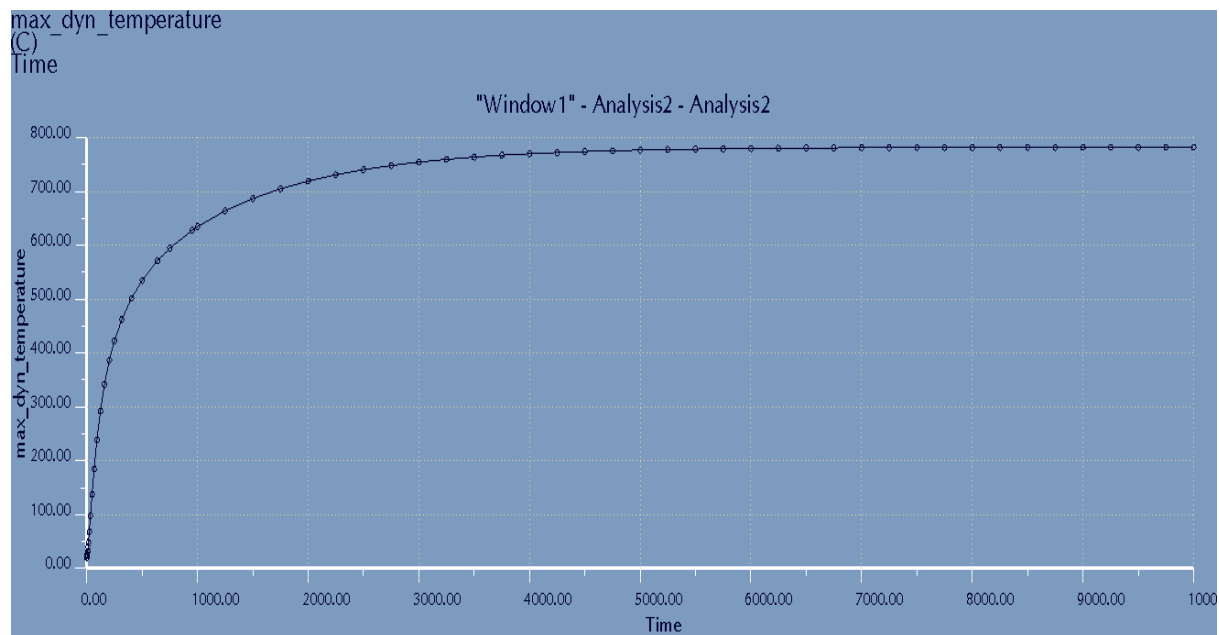
Εικ. 4.42

Για να βρεθεί μία θερμοκρασία σε συγκεκριμένο χρόνο, βρίσκεται απλώς με ένα κλικ πάνω στην καμπύλη. Άλλος τρόπος εκτός από το να γίνει διπλό κλικ στο γράφημα είναι ο εξής: Δημιουργείται ξανά new transient thermal και στην μπάρα **output** (Εικ.43), στη λίστα **Output Intervals**, επιλέγεται **User-defined Output Intervals**. Στον αριθμό των διαστημάτων (**Number of Master Intervals**), επιλέγεται **40** βάζοντας τελευταία τιμή **10000 sec** και έπειτα κλικ στο **Space Equally** για ίσα διαστήματα. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ίσα χρονικά διαστήματα των **250 δευτερολέπτων**.



Εικ. 4.43

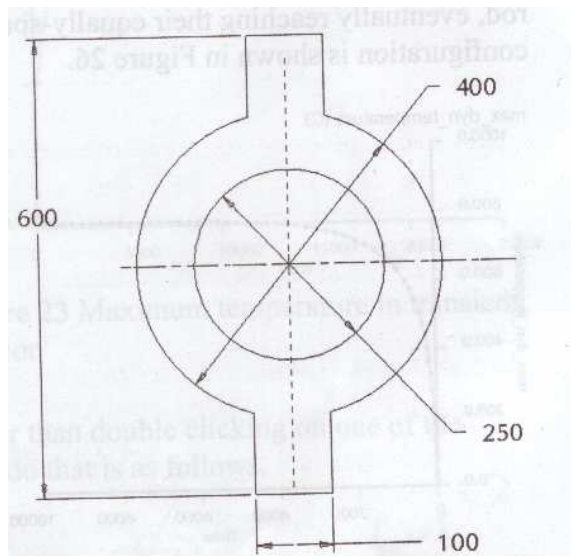
Πατώντας ok και έπειτα start run, ξεκινάει η ανάλυση από τον υπολογιστή. Από την προηγούμενη μέτρηση, υπάρχει η πληροφορία ότι ο χρόνος ήταν 24000 δευτερόλεπτα, προφανώς τα 10000 δευτερόλεπτα είναι λίγα, αλλά επιλέχθηκε έτσι ώστε να υπάρχει ακριβής θερμοκρασία για κάθε 250 δευτερόλεπτα, στην καμπύλη όπου παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας (Εικ. 4.42). Από το χρήστη εξαρτάται το μέγεθος του χρόνου. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω (Εικ. 4.44) όπου είναι εμφανής με κουκίδες τα διαστήματα, στα οποία ο χρήστης μπορεί να διαβάσει πληροφορίες.



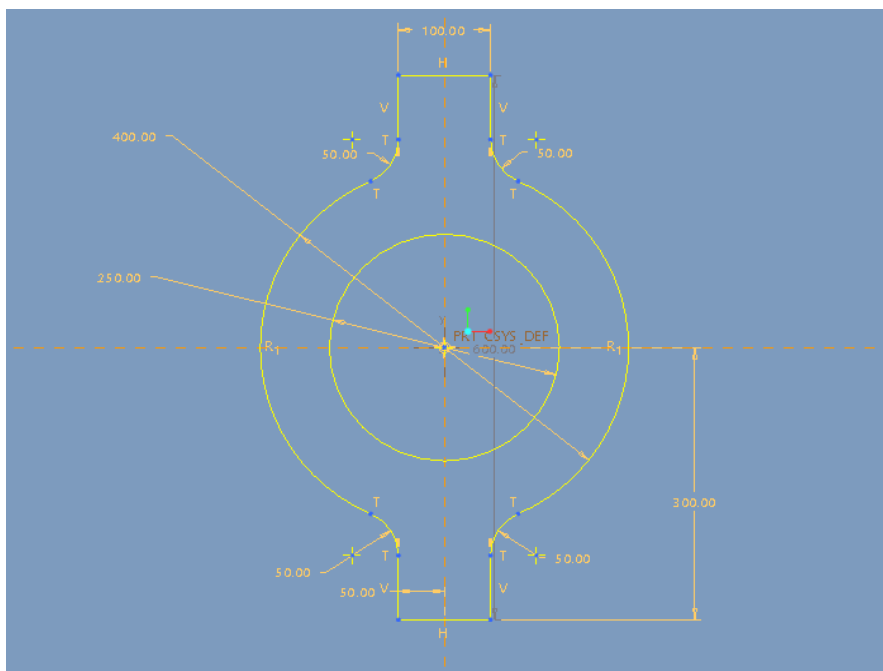
Εικ. 4.44

#### 4.5) Θερμική ανάλυση που περιέχει θερμικές τάσεις

Η τελευταία αυτή ενότητα θα καταδείξει πως η θερμότητα με τις τάσεις αλληλεξαρτώνται και περιγράφεται ο τρόπος ανάλυσης τους στο Pro Engineer Wildfire 5.0. Η θερμοκρασία επηρεάζει την δομή του υλικού μέσω της θερμικής διαστολής, γνωστό και από την επιστήμη της τεχνολογίας υλικών. Αν στο μοντέλο εμποδίζεται η διαστολή ή συστολή, μέρους ή ολόκληρου του σώματος, τότε μπορούν να αναπτυχθούν μεγάλες τάσεις. Επίσης μπορούν να αναπτυχθούν τάσεις ακόμα και αν το μοντέλο δεν είναι περιορισμένο, αφού οι θερμοκρασιακές διαφορές σε ένα μοντέλο, μπορούν να προκαλέσουν θερμικές τάσεις. Στην πραγματικότητα, τέτοιες θερμικές τάσεις προκαλούνται σε διάφορα υλικά, κυρίως στις περιπτώσεις ταχείας θερμοκρασιακής αλλαγής όπως π.χ. σε τοπικές ηλεκτροκολλήσεις, βαφές χαλύβων κ.λπ., οι οποίες μπορεί να καταστούν ιδιαίτερα επικίνδυνες σε περιπτώσεις δυσθερμαγωγών υλικών. Θα μελετηθεί ένα χάλκινο μοντέλο (Εικ. 4.45 και 4.46) πάχους 50mm και με τις τέσσερις γωνίες να είναι ακτίνας R50.

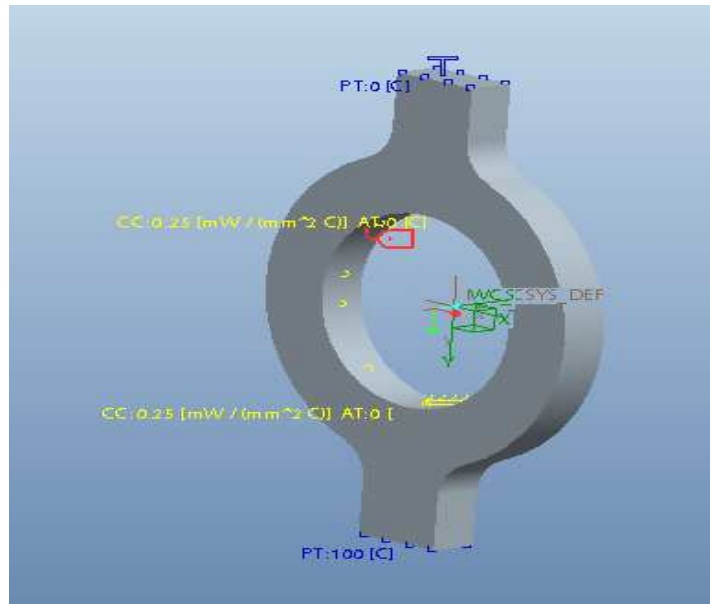


Εικ. 4.45



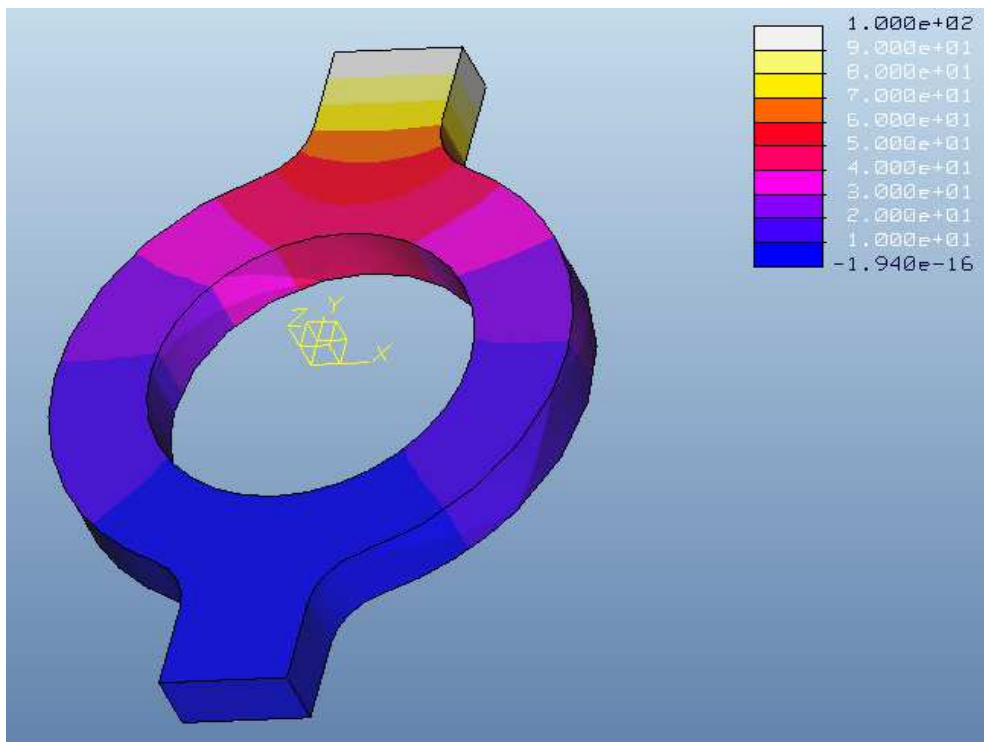
Εικ. 4.46

Στην μία κάθετη πλευρά θα εφαρμοστεί προκαθορισμένη θερμοκρασία 100°C και στην άλλη 0°C με τον ίδιο τρόπο που έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία θερμοκρασιακή διαφορά. επίσης, θα δημιουργηθεί συνθήκη συναγωγής στην εσωτερική επιφάνεια με συντελεστή συναγωγής θερμότητας 0.25 mW/mm<sup>2</sup> °C (convection coefficient) και εξωτερική θερμοκρασία 0°C. Τέλος, θα επιλεγθεί υλικό (CU, copper) (Εικ. 4.47).



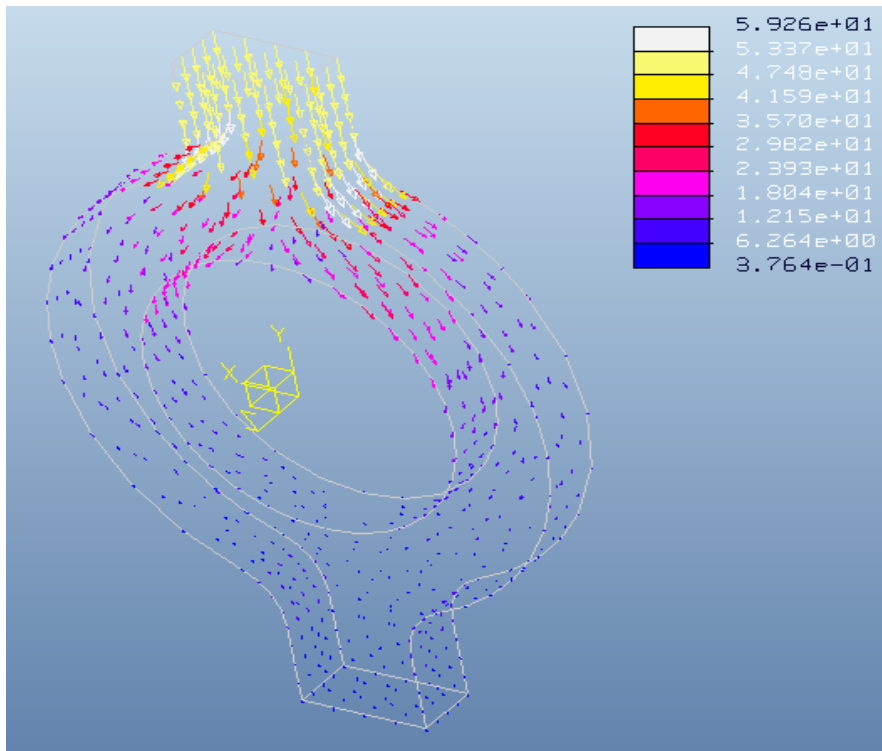
Εικ. 4.47

Θα εκτελεστεί μία θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης με τον ίδιο τρόπο που έχει επεξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 4.48 με τη μία επιφάνεια να έχει 100°C και την άλλη κοντά στους 0°C, όπως ακριβώς δηλ ορίστηκε.



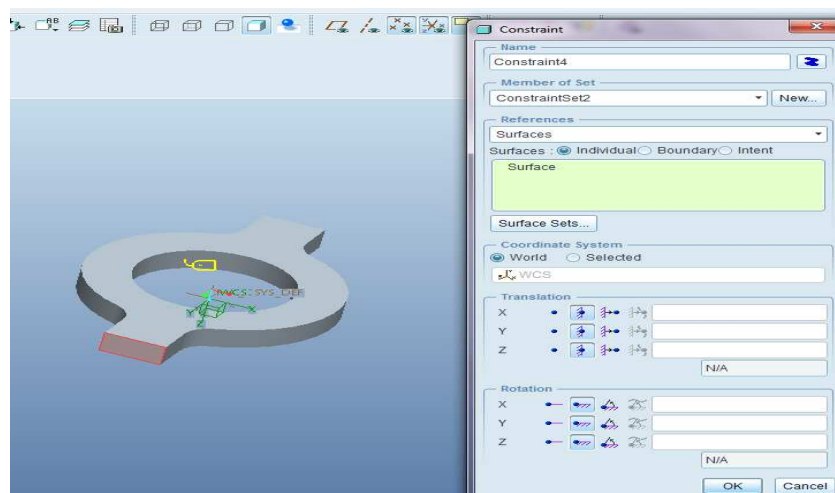
Εικ. 4.48

Παρακάτω (Εικ. 4.49) φαίνονται και τα διανύσματα της θερμικής ροής με μέγιστη τιμή  $59 \text{ mW/mm}^2$ .



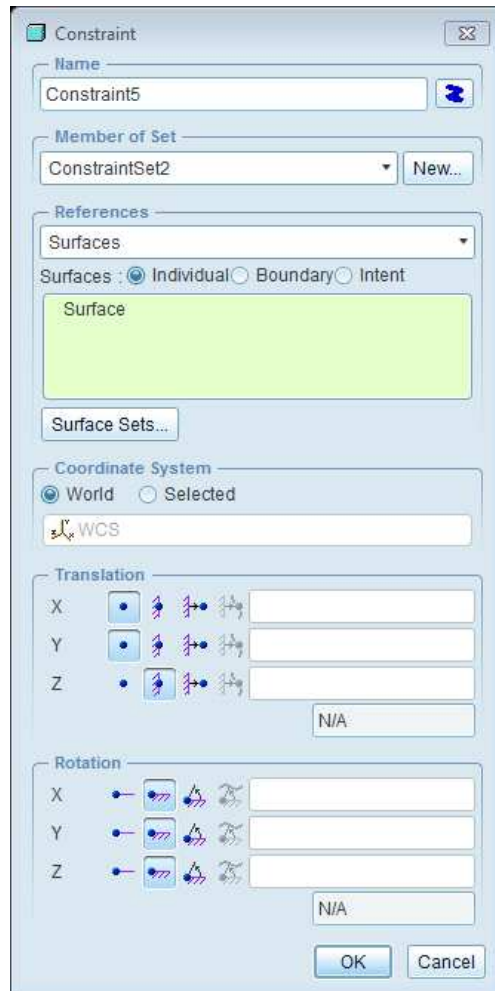
Εικ. 4.49

Τώρα, αφού έγινε η θερμική ανάλυση, το λογισμικό μπορεί να μεταφέρει τη θερμοκρασιακή κατανομή ως θερμικό φορτίο. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να επιλεχθεί ως Model type, η επιλογή Structure ( Edit → Mechanics Model Type Setup → Structure → OK). Έπειτα θα περιοριστεί η μετατόπιση στην πλευρά, όπου έχει θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$ . Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής **Displacement Constraint** και επιλέγοντας **fixed** σε όλα.. Ανοίγει ένα παράθυρο και απλώς επιλέγεται η πλευρά (Εικ. 4.50).



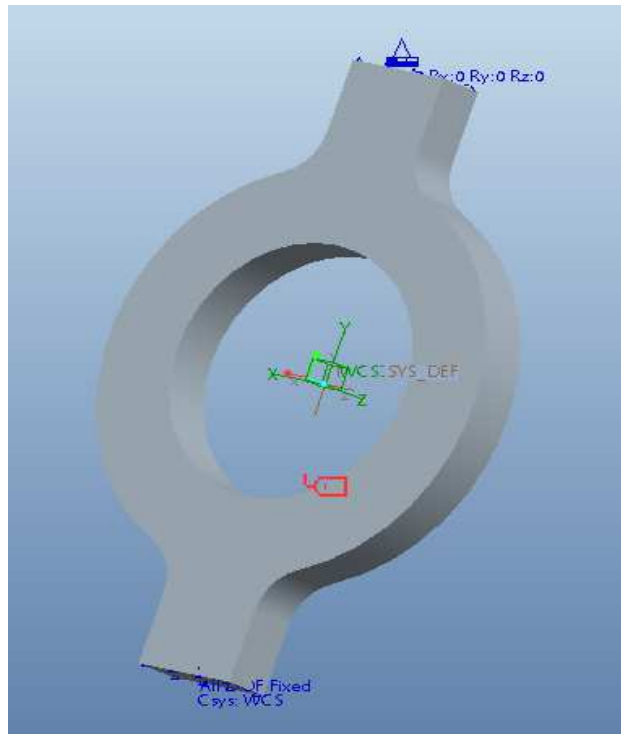
Εικ. 4.50

Τώρα θα γίνει το ίδιο στη ζεστή πλευρά με τη διαφορά ότι θα είναι ελεύθερη η μετατόπιση κατά τον άξονα X και Y (Εικ. 4.51). Τσεκάρεται η αριστερή κουκίδα, για να είναι ελεύθερη η μετατόπιση. Αργότερα θα μελετηθεί το μοντέλο ξανά, χωρίς να είναι ελεύθερη η μετατόπιση (διαστολή), έτσι ώστε να δημιουργηθούν μεγάλες τάσεις και να καταδειχθεί το αποτέλεσμα.

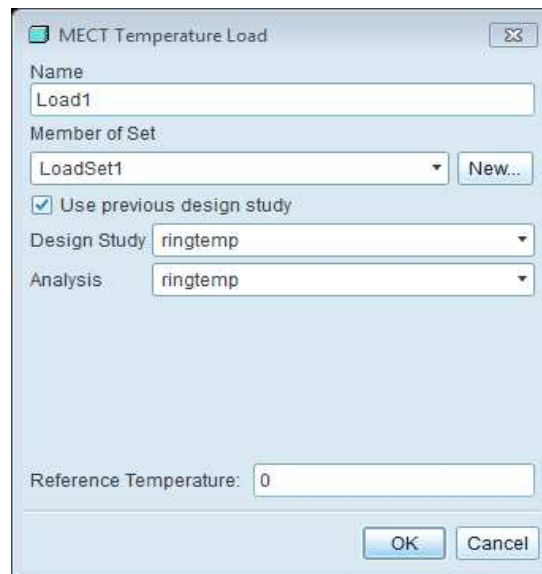


Εικ. 4.51

Αφού τεθήκανε οι περιορισμοί μετατόπισης φαίνονται με μπλε συμβολισμό πάνω στο μοντέλο (Εικ. 4.52). Για να εφαρμοστεί το θερμικό φορτίο, πρέπει να ανοίξει ένα παράθυρο μέσω της εντολής **Insert** → **Temperature Load** → **MEC/T**. Πρέπει να τσεκαριστεί το “use previous design study” και να επιλεγθεί το αρχείο. Στη περίπτωση αυτή το πρόγραμμα αναγνώρισε αυτόματα το αρχείο (Εικ. 4.53).



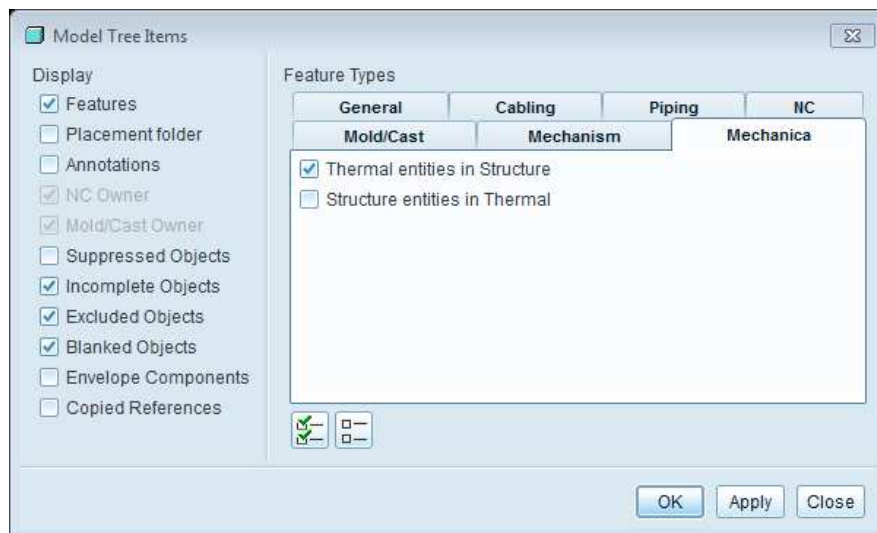
Εικ. 4.52



Εικ. 4.53

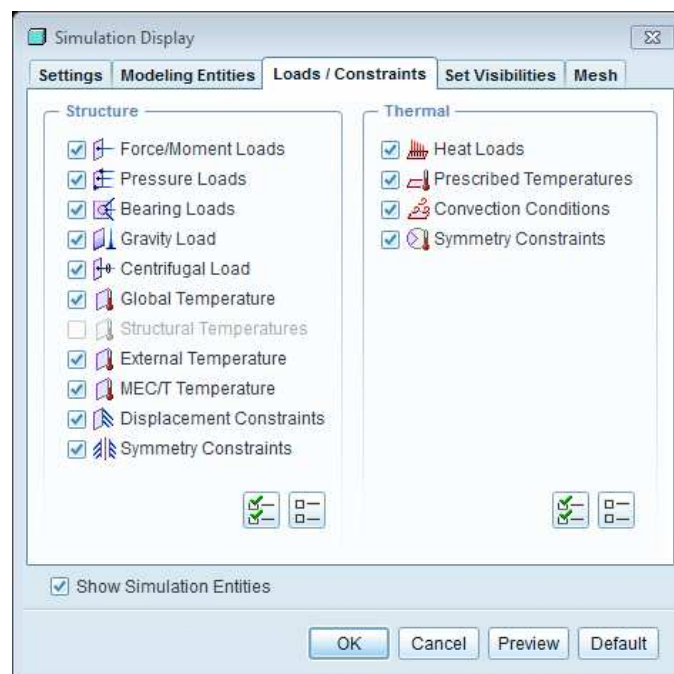


Το μοντέλο πλέον έχει ολοκληρωθεί. Αριστερά στο **Model tree**, επιλέγεται **Settings** και έπειτα στην επιλογή **Tree Filters**, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο (Εικ. 4.54). Εκεί, επιλέγεται η μπάρα **Mechanica**, τσεκάρεται η επιλογή **Thermal entities in Structure** και τέλος **Apply**.



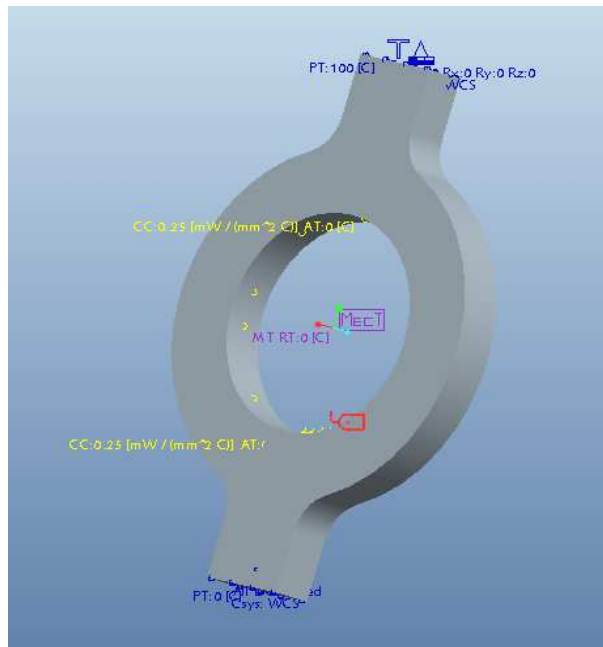
Εικ. 4.54

Έπειτα στην επιλογή **Simulation Display**, η οποία είναι πάνω και δεξιά στο πρόγραμμα, πρέπει στην μπάρα **Loads/Constraints** να τσεκαριστούν όλες οι επιλογές κάτω από το *Thermal* για να τις λάβει υπόψη (Εικ. 4.55).



Εικ. 4.55

Αφού τσεκαριστούν όλες οι επιλογές και πατώντας ok, εμφανίζονται όλοι οι περιορισμοί και οι θερμοκρασίες που είχαν οριστεί στο προηγούμενο τμήμα (προκαθορισμένες θερμοκρασίες, συνθήκη συναγωγής) πάνω στο μοντέλο (Εικ. 4.56).



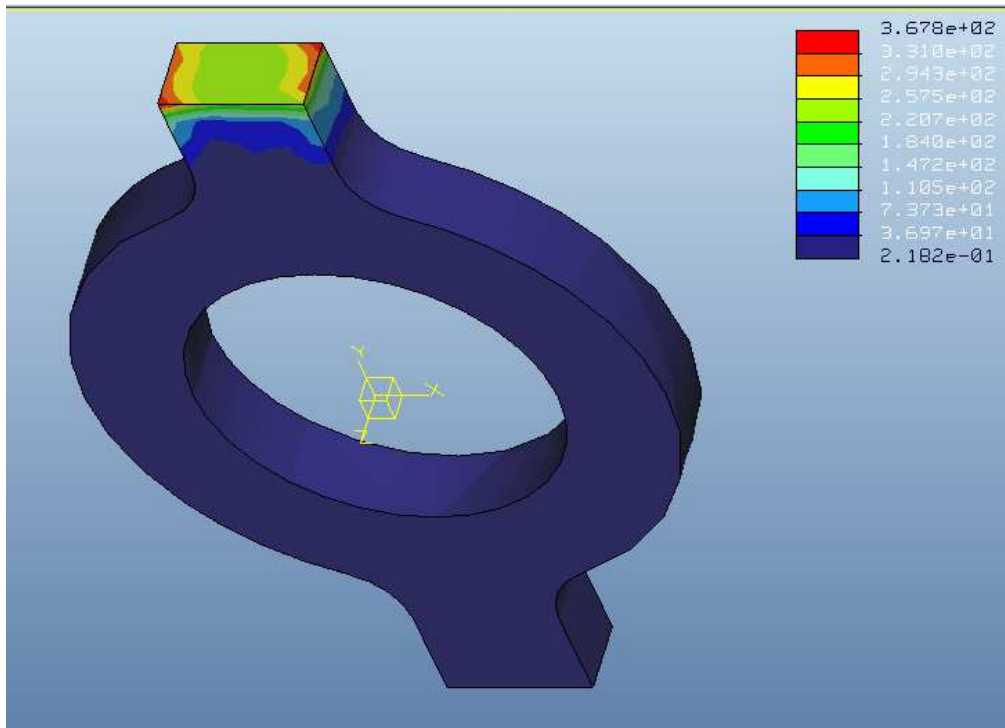
Εικ. 4.56

Στην συνέχεια θα γίνει μία νέα στατική ανάλυση, μέσω της διαδικασίας **Analyses and Design Studies** → **File** → **New Static**. Επιλέγοντας Quick Check, Ok και Start Run αρχίζει η ανάλυση. Μέσω της επιλογής Display Study Status φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα (Εικ. 4.57). Μπορεί κανείς να δει ότι, η μετατόπιση κατά τον άξονα X είναι 0.1mm και κατά τον άξονα Y 0.35mm.

Name	Value	Convergence
max_beam_bending:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_tensile:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_torsion:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_total:	0.000000e+00	0.0%
max_disp_mag:	3.522451e-01	0.3%
max_disp_x:	-1.011607e-01	0.0%
max_disp_y:	3.517831e-01	0.2%
max_disp_z:	5.647400e-02	0.9%
max_prin_mag:	-2.679132e+02	3.5%
max_rot_mag:	0.000000e+00	0.0%
max_rot_x:	0.000000e+00	0.0%
max_rot_y:	0.000000e+00	0.0%
max_rot_z:	0.000000e+00	0.0%
max_stress_prin:	1.839840e+02	3.3%
max_stress_vm:	3.580453e+02	2.7%
max_stress_xx:	-2.266502e+02	5.8%
max_stress_xy:	-1.448252e+02	1.7%
max_stress_xz:	-3.952968e+01	8.9%
max_stress_yy:	1.765269e+02	3.4%
max_stress_yz:	2.076818e+01	44.1%
max_stress_zz:	5.407979e+01	18.3%
min_stress_prin:	-2.679132e+02	3.5%
strain_energy:	9.222523e+03	2.2%

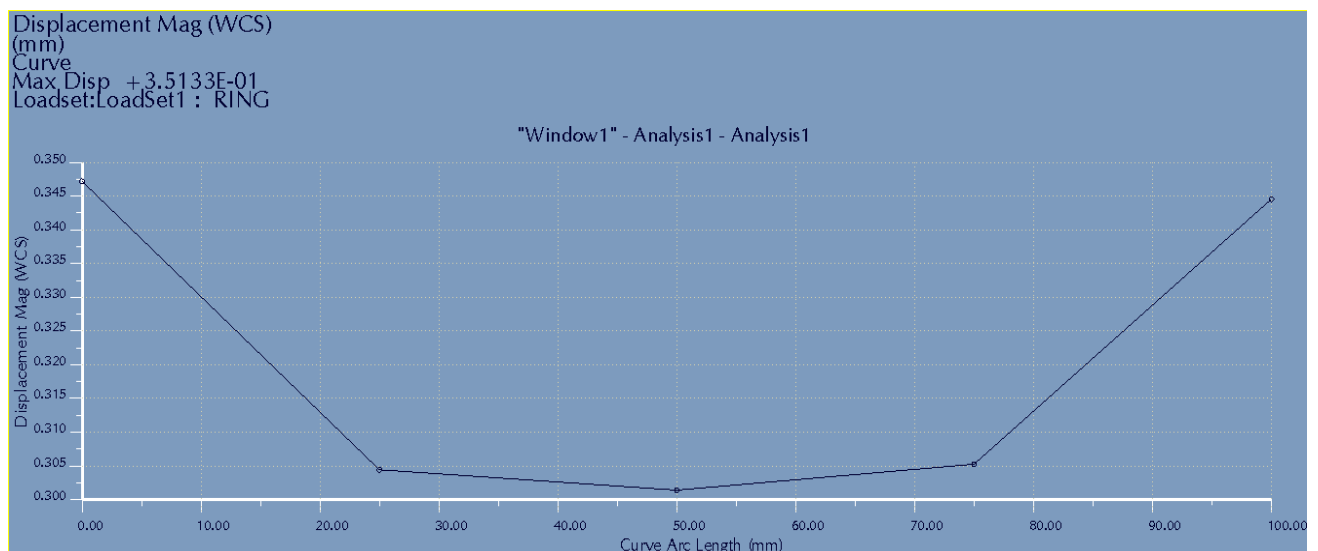
Εικ. 4.57

Επιλέγοντας **Review Results** και στο **Display Type**, **Fringe** παράλληλα με το **Quantity** στο **Stress**, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των τάσεων, με μέγιστη τάση 368 MPa (Εικ. 4.58).



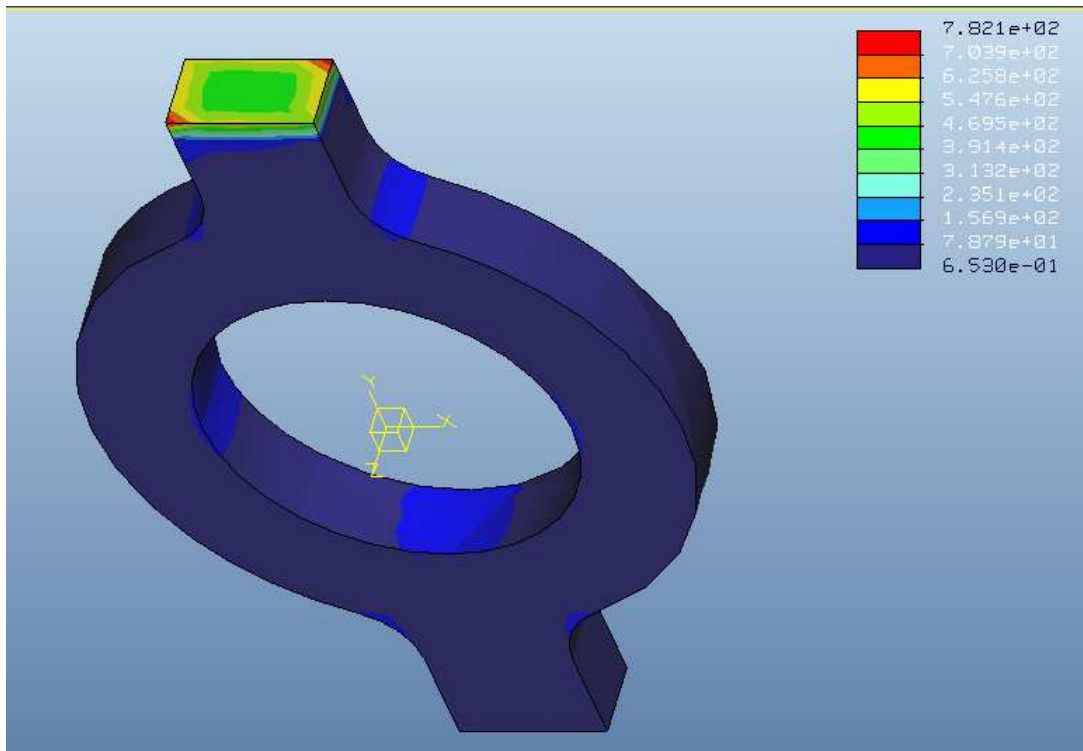
Εικ. 4.58

Επιλέγοντας **Graph** και **Displacement** στην πάνω οριζόντια ακμή κατά τον άξονα **Y** φαίνεται το διάγραμμα μετατόπισης στην ακμή αυτή (Εικ. 4.59).



Εικ. 4.59

Παρακάτω περιορίστηκε η ελευθερία κατά τον άξονα Y και X στην επιφάνεια με την υψηλή θερμοκρασία. Το μέγεθος της τάσης αυξήθηκε σημαντικά (782 MPa), όπως ήταν αναμενόμενο (Εικ. 4.60).



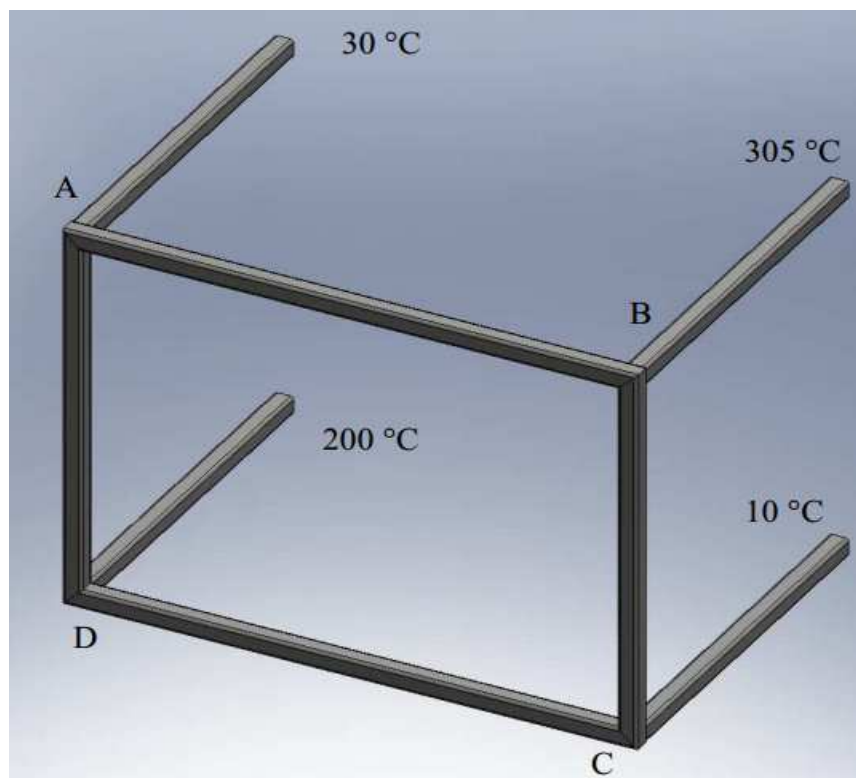
Εικ. 4.60

## Κεφάλαιο 5: Σύγκριση αποτελεσμάτων θεωρητικού υπολογισμού με αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης σε λογισμικό χρήσης FEA.

### 5.1) Παράδειγμα 1: Πλαίσιο τραπεζιού, μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνουν μελέτες σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της θεωρίας με τα αποτελέσματα του Pro Engineer wildfire 5.0, για να επαληθευτεί το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο λογισμικό. Επίσης θα γίνει θερμική ανάλυση και θα μελετηθούν τα αποτελέσματα του Solidworks 2010, για να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο λογισμικών. Θα χρησιμοποιηθούν απλές γεωμετρίες, ώστε να είναι εύκολος ο θεωρητικός υπολογισμός και να γίνει ακριβέστερη σύγκριση αποτελεσμάτων.

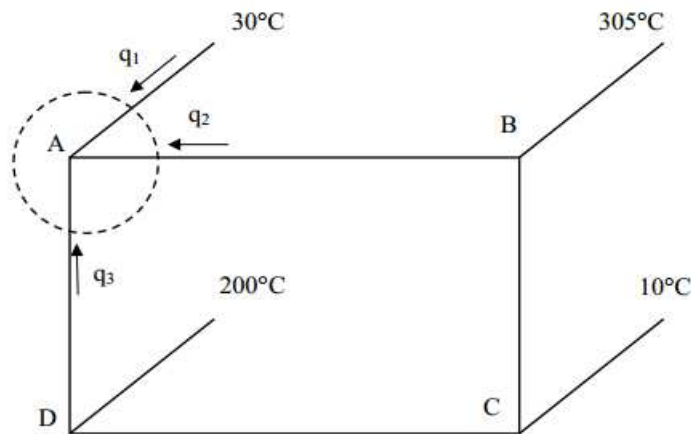
Ένα πλαίσιο τραπεζιού της εικόνας 1 από χάλυβα AISI 304 και διάστασης 2.25x1.5x1.5 m με εσωτερικό κέλυφος 60mm και πάχους κάθε δοκού 80mm έχει τοποθετηθεί σε τέσσερις σταθερές διαφορετικές θερμοκρασίες σε κάθε πάτο του ποδιού του, όπως φαίνεται και παρακάτω. Να βρεθούν οι θερμοκρασίες στα σημεία A, B, C και D.



Εικ. 5.1

Υπολογισμός με βάση τη θεωρία:

Για να βρεθούν οι θερμοκρασίες θα ληφθεί υπόψη το ενεργειακό ισοζύγιο σε κάθε κόμβο (A, B, C, D). Σε όλους τους κόμβους η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή και έρχεται από τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις (Εικ. 5.2).



Εικ. 5.2) Σκίτσο κόμβων

Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής στον κόμβο A δίνεται από τον τύπο:  $q = k \cdot A \cdot \Delta T / L$  (Σχέση 1)

Όπου  $q$ , η μεταφορά θερμότητας,  $A$  το εμβαδόν της επιφάνειας,  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του υλικού,  $\Delta T$  η θερμοκρασιακή διαφορά με τον αντίστοιχο κόμβο και  $L$  η απόσταση από τον αντίστοιχο κόμβο. Ξεκινώντας με το ενεργειακό ισοζύγιο, ισχύει:

$E_{\text{εισ}} - E_{\text{εξο}} + E_{\text{παρ}} - \text{Έργο} = 0$ . Αφού δεν υπάρχει παραγόμενη ενέργεια ή έργο σε αυτό το παράδειγμα οι τιμές αυτές μπορούν να διαγραφούν. Επίσης θεωρείται ότι, όλη η ενέργεια πηγή στον κόμβο A και έτσι δεν υπάρχει κάποια ενέργεια εξόδου αλλά μόνο εισόδου. Έτσι λοιπόν η ισότητα γίνεται:

$$E_{\text{εισ}} = 0$$

$$E_{\text{εισ}} = q_1 + q_2 + q_3$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 0 \text{ (Σχέση 2)}$$

Από την σχέση 1 και 2 η εξίσωση γίνεται:

$$k_A \text{ Σφάλμα!} + k_A \text{ Σφάλμα!} + k_A \text{ Σφάλμα!} = 0$$

Από τη στιγμή που η θερμική αγωγιμότητα είναι ίδια (ίδιο υλικό) αλλά και το εμβαδόν της επιφάνειας τότε φεύγουν από την εξίσωση. Επίσης γίνεται αντικατάσταση των μηκών.

$$\text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!} = 0$$

Λύνοντας ως προς τις θερμοκρασίες, η εξίσωση γίνεται:

$$(\text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!}) T_A - \text{Σφάλμα!} T_B + 0 T_C - \text{Σφάλμα!} T_D = \text{Σφάλμα!}$$

Η εξίσωση αυτή έχει τρεις αγνώστους, αφού ο  $T_C$  μηδενίζεται. Κάνοντας την ίδια διαδικασία και για τους άλλους κόμβους, καταλήγει κανείς στις επόμενες τρεις εξισώσεις:

$$-\text{Σφάλμα!} T_A + (\text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!}) T_B - \text{Σφάλμα!} T_C - 0 T_D = \text{Σφάλμα!}$$

$$0 T_A - \text{Σφάλμα!} T_B + (\text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!}) T_C - \text{Σφάλμα!} T_D = \text{Σφάλμα!}$$

$$-\text{Σφάλμα!} T_A + 0 T_B - \text{Σφάλμα!} T_C + (\text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!} + \text{Σφάλμα!}) T_D = \text{Σφάλμα!}$$

Χρησιμοποιώντας πίνακα για την επίλυση των τεσσάρων εξισώσεων δίνει το εξής:

$$\begin{bmatrix} 1.78 & -1/2.25 & 0 & -1/1.5 \\ -1/2.25 & 1.78 & -1/1.5 & 0 \\ 0 & -1/1.5 & 1.78 & -1/2.25 \\ -1/1.5 & 0 & -1/2.25 & 1.78 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_A \\ T_B \\ T_C \\ T_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 \\ 203.3 \\ 6.7 \\ 133.3 \end{bmatrix}$$

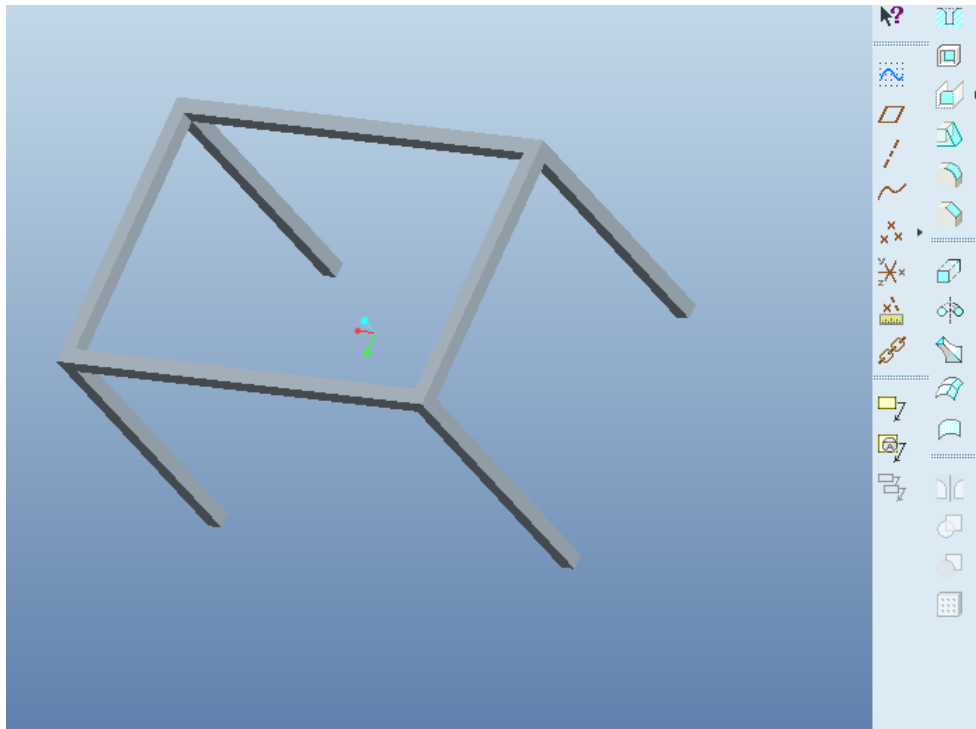
Τελικά κάνοντας την πράξη του πίνακα, οι θερμοκρασίες είναι οι εξής:

- $T_A = 110.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_B = 182.0 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_C = 107.6 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_D = 143.0 \text{ }^\circ\text{C}$

Παρακάτω θα λυθεί το ίδιο πρόβλημα με την χρήση FEA. Πρώτα θα χρησιμοποιηθεί το Pro Engineer wildfire 5.0 και έπειτα το Solidworks 2010.

Υπολογισμός με βάση το Pro Engineer wildfire 5.0:

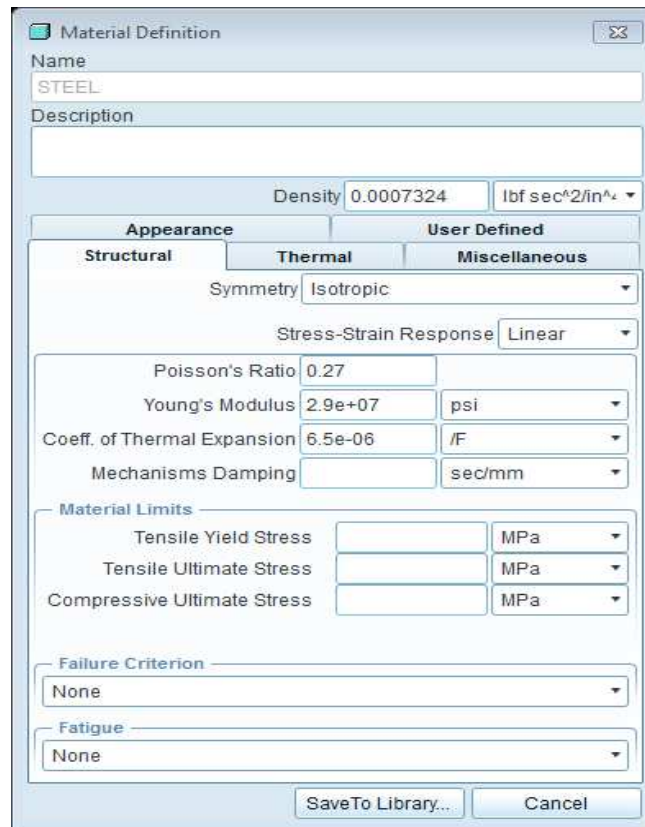
Σχεδιάζεται το αντικείμενο μελέτης (Εικ. 5.3). Έπειτα γίνεται εισαγωγή στο **mechanica thermal**.



Εικ. 5.3

Επόμενο βήμα είναι να οριστεί το υλικό. Η βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού δεν έχει ακριβώς το ίδιο υλικό. Ναι μεν έχει τον χάλυβα (Steel) αλλά η εκφώνηση του προβλήματος ζητάει τυποποιημένο είδος χάλυβα AISI 304 ο οποίος έχει διαφορετικές ιδιότητες από το χάλυβα που περιέχει η βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού. Για να φανούν οι ιδιότητες του υλικού, πρέπει να πατηθεί **materials** και στο παράθυρο που εμφανίζεται με τα υλικά να γίνει **δεξί κλικ πάνω στο υλικό** και τέλος **properties**. Ανοίγει ένα παράθυρο (Εικ. 5.4) όπου έχει ξεχωριστά μπάρα για τις δομικές ιδιότητες και ξεχωριστά για τις θερμικές ιδιότητες.



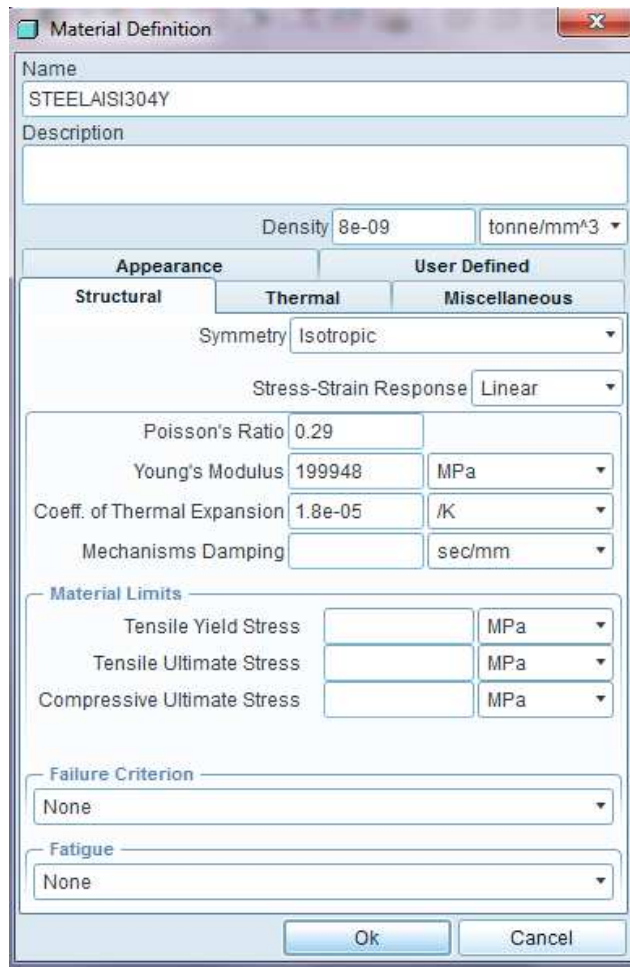


Εικ. 5.4

Υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης των ιδιοτήτων υλικού και να αποθηκευτεί ως νέο υλικό με την επιθυμητή ονομασία, αλλάζοντας απλώς τις τιμές και πατώντας Save to Library. Για το συγκεκριμένο υλικό (AISI 304) βρέθηκαν στη βιβλιογραφία οι εξής πληροφορίες:

- Poisson's Ratio 0.29
- Young's Modulus 199948 MPa
- Coeff. Of Thermal Expansion 1.8e-05 K
- Density 8000 kg/m<sup>3</sup>
- Thermal Conductivity 16 W/(m K)

Γίνεται αντικατάσταση των τιμών (Εικ. 5.5) και έπειτα ok.

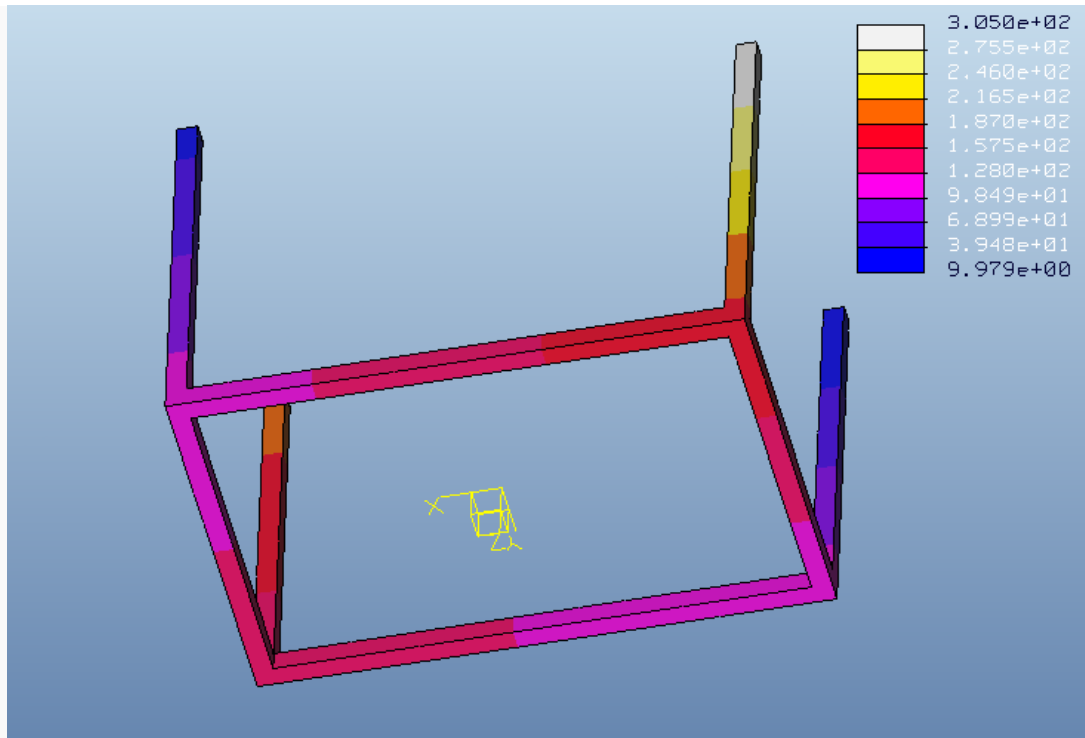


Εικ. 5.5

Από την εκφώνηση υπάρχουν σταθερές θερμοκρασίες στα άκρα των ποδιών του πλαισίου και η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Για να οριστούν οι θερμοκρασίες των 30°C, 305°C, 10°C και 200°C αντίστοιχα θα επιλεγεί η εντολή Prescribed Temperature. Η διαδικασία έχει επεξηγηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ορίζοντας τις θερμοκρασίες το μοντέλο είναι έτοιμο προς ανάλυση.

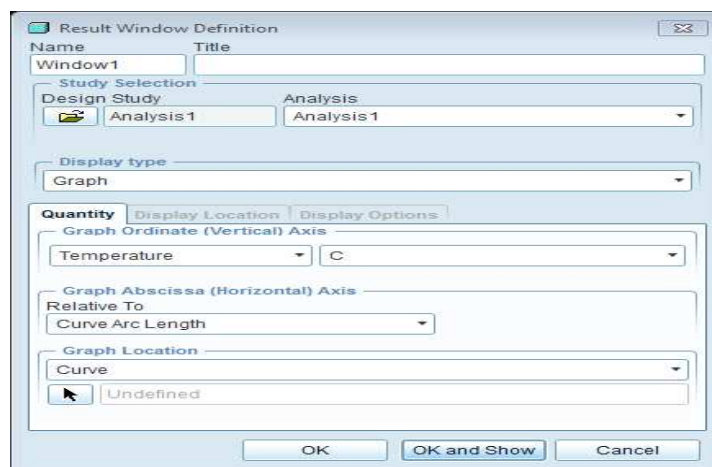
*Mechanica Analyses/Studies* → *File* → *New Steady State Thermal* → *Quick Check* → *Plotting Grid 10* → *Start run*

Η ανάλυση γίνεται χωρίς προβλήματα και έπειτα επιλέγεται η εντολή Review Results για να καταδειχθούν τα αποτελέσματα. Για να παρουσιαστεί μία γενική εικόνα με την κατανομή θερμοκρασίας, επιλέγεται ως Display Type – Fringe, σαν Quantity – Temperature, Ok and Show. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω (Εικ. 5.6) όπου είναι εμφανής ότι τα αποτελέσματα συμπίπτουν.

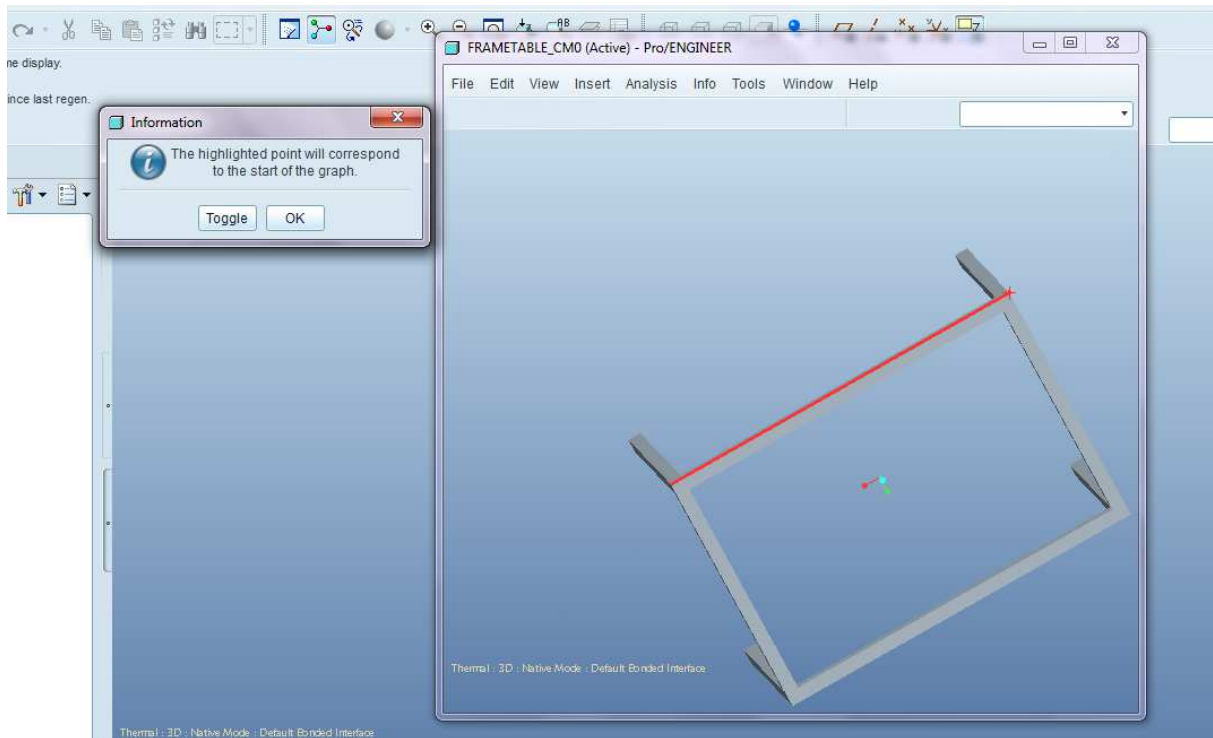


Εικ. 5.6

Για να φανούν οι ακριβείς θερμοκρασίες στα ζητούμενα σημεία θα επιλεγεί γράφημα κατανομής θερμοκρασίας στις αντίστοιχες ακμές. Επιλέγοντας την ακμή AB θα καταδειχθούν οι θερμοκρασίες στα σημεία A και B. Το ίδιο θα γίνει και με τις άλλες ακμές, ώστε να φανούν όλα τα αποτελέσματα. Για να γίνει αυτό, στο παράθυρο του *Display* (Εικ. 5.7), επιλέγεται ως *Display Type* –*Graph* σαν *Quantity* – *Temperature* και στην επιλογή *Graph Location*, τσεκάρεται το αριστερό βελάκι. Εμφανίζεται έπειτα το μοντέλο σε ένα μικρότερο παράθυρο, όπου πρέπει να επιλεγεί η αντίστοιχη ακμή (Εικ. 5.8).

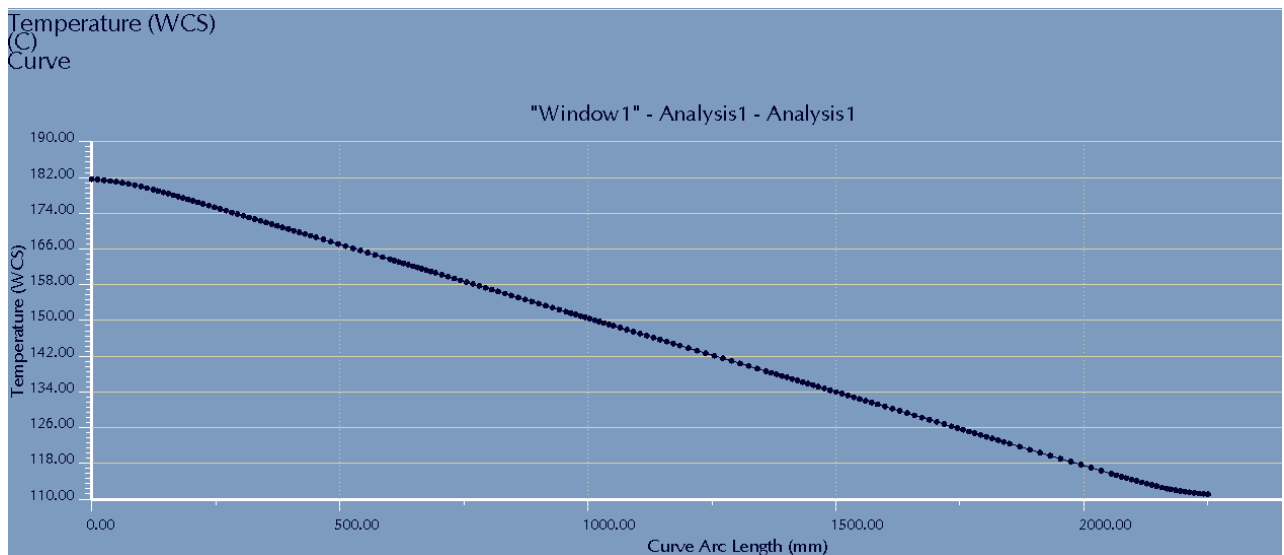


Εικ. 5.7

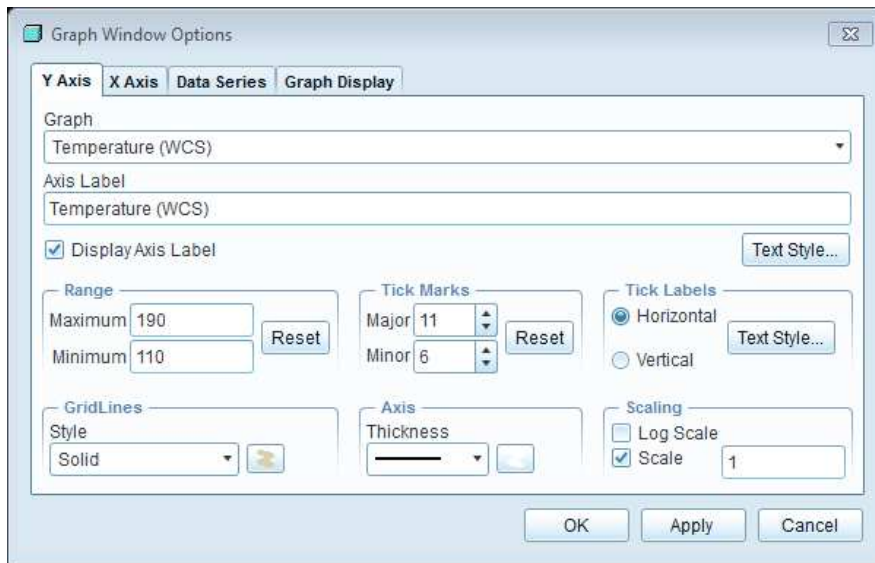


Εικ. 5.7

Επιλέγοντας την ακμή και πατώντας δύο φορές “ok”, το πρόγραμμα είναι έτοιμο να δείξει το γράφημα πατώντας απλώς “ok and show”. Όπως φαίνεται στο γράφημα, αφού έγινε επιλογή της ακμής AB, η θερμοκρασία στο σημείο A είναι 111.2 °C και στο σημείο B είναι 181.6 °C (Εικ.5.9). Για να αλλάξει η κλίμακα του γραφήματος, επιλέγεται η εντολή *format* και έπειτα *Graph*. Μπορούν να γίνουν πολλές τροποποιήσεις σε σχέση με την παρουσίαση του γραφήματος (Εικ.5.10).

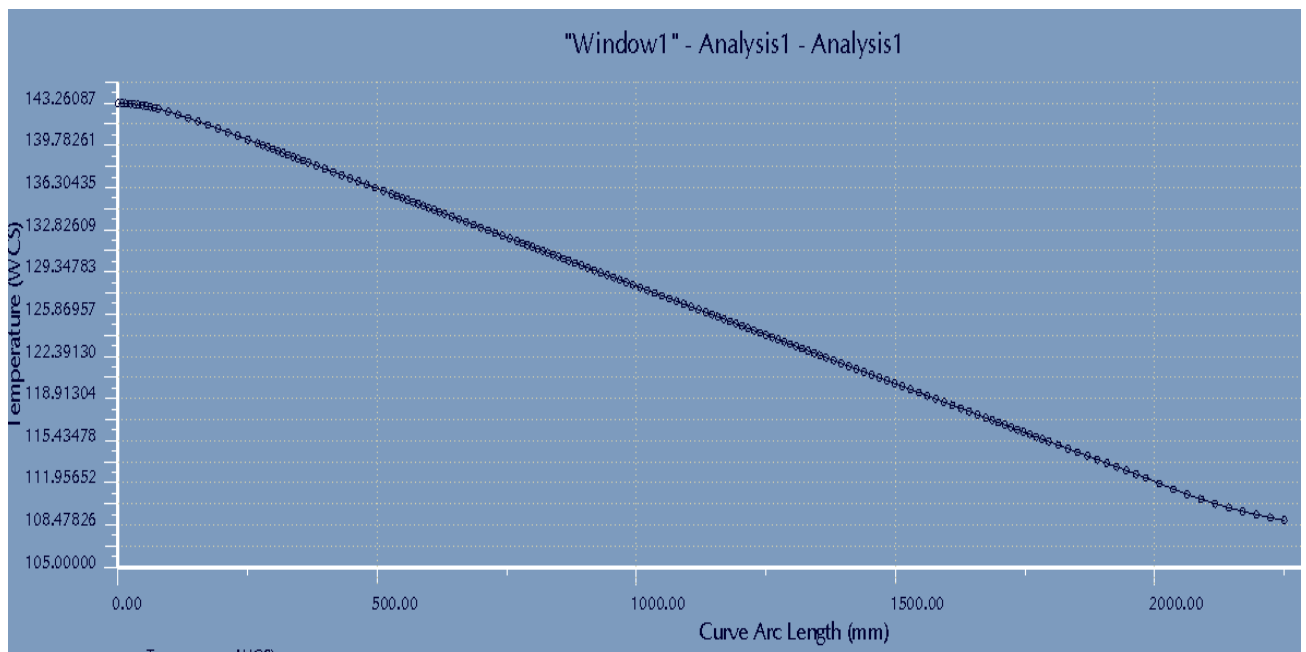


Εικ. 5.9



Εικ. 5.8

Με τον ίδιο τρόπο θα επιλεγθεί η ακμή CD, όπου το γράφημα φαίνεται παρακάτω (Εικ.11). Η θερμοκρασία στο σημείο C είναι 108.9 °C και στο σημείο D είναι 143.3 °C.



Εικ. 5.9

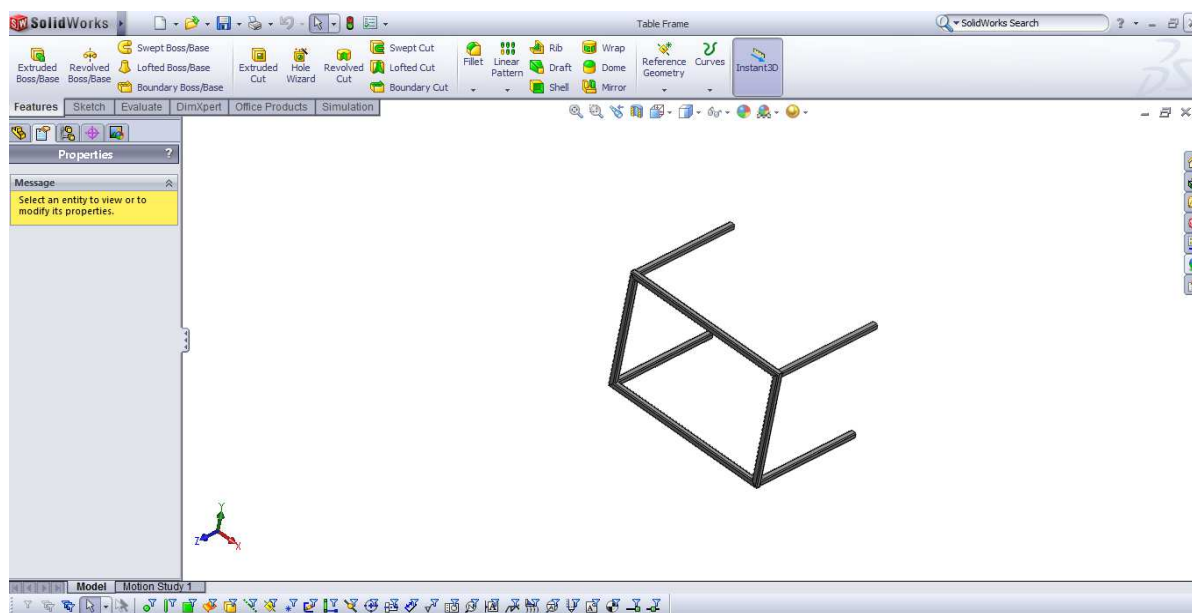
Συνοπτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω πίνακα(5.1) όπου επίσης φαίνεται και η ποσοστιαία μεταβολή:

	Pro Engineer	Θεωρία	Διαφορά
$T_A$	111.2°C	110.2°C	0.9 %
$T_B$	181.6°C	182.0°C	0.3 %
$T_C$	108.9°C	107.6°C	1.2 %
$T_D$	143.3°C	143.0°C	0.2 %

Πίνακας 5.1

#### Υπολογισμός με βάση το Solidworks 2010:

Έχει σχεδιαστεί το πλαίσιο τραπεζιού όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.12. Θα γίνουν λεπτομερώς τα βήματα θερμικής ανάλυσης, αφού δεν έχει γίνει κάποια επεξήγηση για το συγκεκριμένο λογισμικό σε προηγούμενες ενότητες.

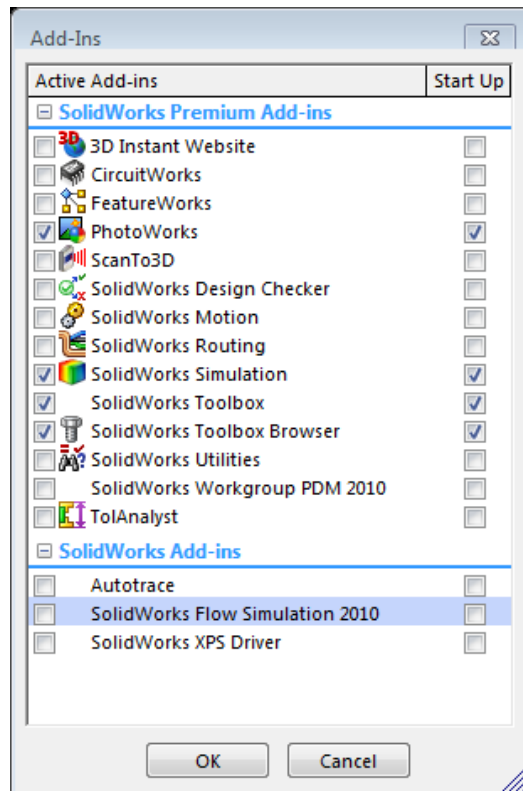


Εικ. 5.10) Μενού Solidworks 2010

Στο Solidworks, για να ξεκινήσει μία ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η ενότητα FEM, η οποία ονομάζεται **Solidworks Simulation** στο λογισμικό. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να γίνουν τα εξής βήματα:

- Από την πάνω κύρια μπάρα, επιλέγεται **Tools**. Έπειτα επιλέγεται η επιλογή **Adds in**. Εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικ. 5.13).
- Τσεκάρεται η επιλογή Solidworks Simulation στην επιλογή **Active Adds In** αλλά και στη επιλογή **Start Up**.

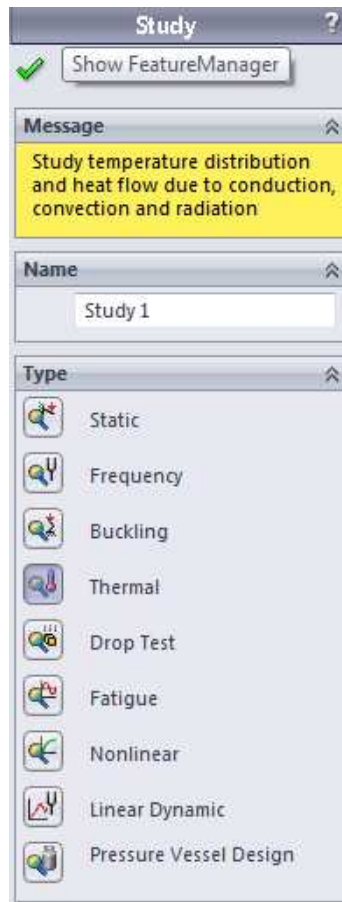
- Τσεκάροντας την επιλογή **Active Adds In**, το πρόγραμμα ενεργοποιεί την επιλογή για την παρούσα ανάλυση, ενώ τσεκάροντας και την επιλογή **Start Up** το πρόγραμμα ενεργοποιεί την επιλογή, όποτε και αν ανοίξει το λογισμικό.



Εικ. 5.11

Η διαδικασία για την ανάλυση είναι, ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, η προσθήκη υλικού, ορισμός συνοριακών συνθηκών και δημιουργία πλέγματος. Έχοντας προσθέσει την επιλογή *simulation*, αυτή εμφανίζεται ως νέα καρτέλα στο μενού. Για να ξεκινήσει η ανάλυση, πρέπει να επιλεγθεί η καρτέλα αυτή. Εμφανίζεται ένα νέο μενού, όπου πρέπει να γίνουν τα εξής βήματα

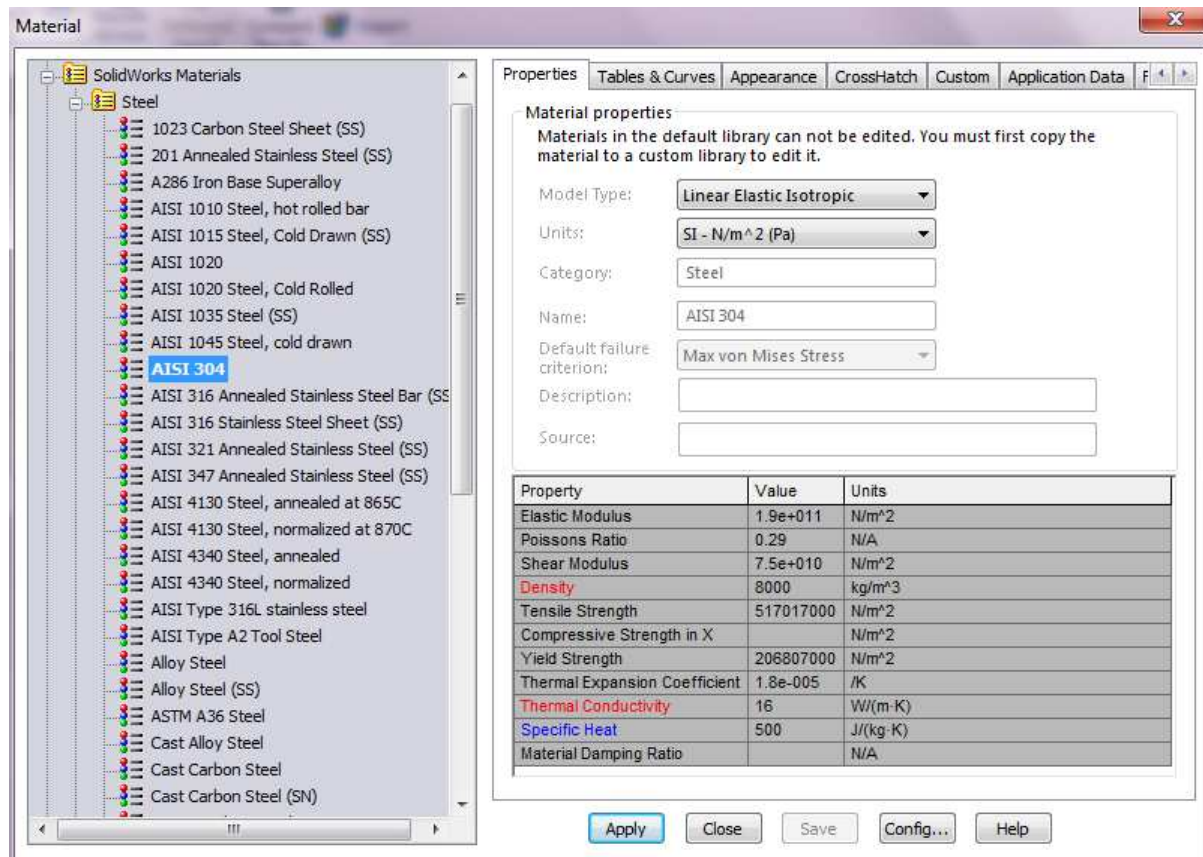
- Τσεκάρεται η επιλογή **Study** η οποία είναι πάνω αριστερά στο πρόγραμμα. Εμφανίζεται ένα βελάκι το οποίο πρέπει να πατηθεί για να εμφανιστούν οι επόμενες επιλογές.
- Επιλέγεται η εντολή **New Study**. Τότε εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο στα αριστερά του προγράμματος (Εικ. 5.14).
- Επιλέγεται η εντολή **Thermal** και στην πάνω μπάρα δίνεται όνομα της ανάλυσης. Έπειτα ok και έτσι το πρώτο βήμα έχει ολοκληρωθεί. Επόμενο βήμα είναι να οριστεί το υλικό του μοντέλου.



Εικ. 5.12


Για να οριστεί το υλικό θα πρέπει να επιλεγεί η εντολή **Apply Material** η οποία έχει ενεργοποιηθεί αφού ολοκληρώθηκε το προηγούμενο βήμα. Εμφανίζεται η βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού, η οποία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του Pro Engineer. Εδώ υπάρχουν σχεδόν όλα τα τυποποιημένα υλικά, έχοντας ξεχωριστές κατηγορίες για *χάλυβες, σίδηρο, κράματα αλουμινίου, κράματα τιτανίου, κράματα χαλκού, κράματα ψευδαργύρου, άλλα κράματα, πλαστικά, άλλα μέταλλα, άλλα μη μέταλλα, γενόσημες ίνες υάλου, ανθρακονήματα, καουτσούκ, ξύλα και σιλικόνες*. Στην υποκατηγορία steel υπάρχει το τυποποιημένο υλικό της εκφώνησης του προβλήματος AISI 304 (Εικ. 5.15). Επιλέγεται και έπειτα Apply.

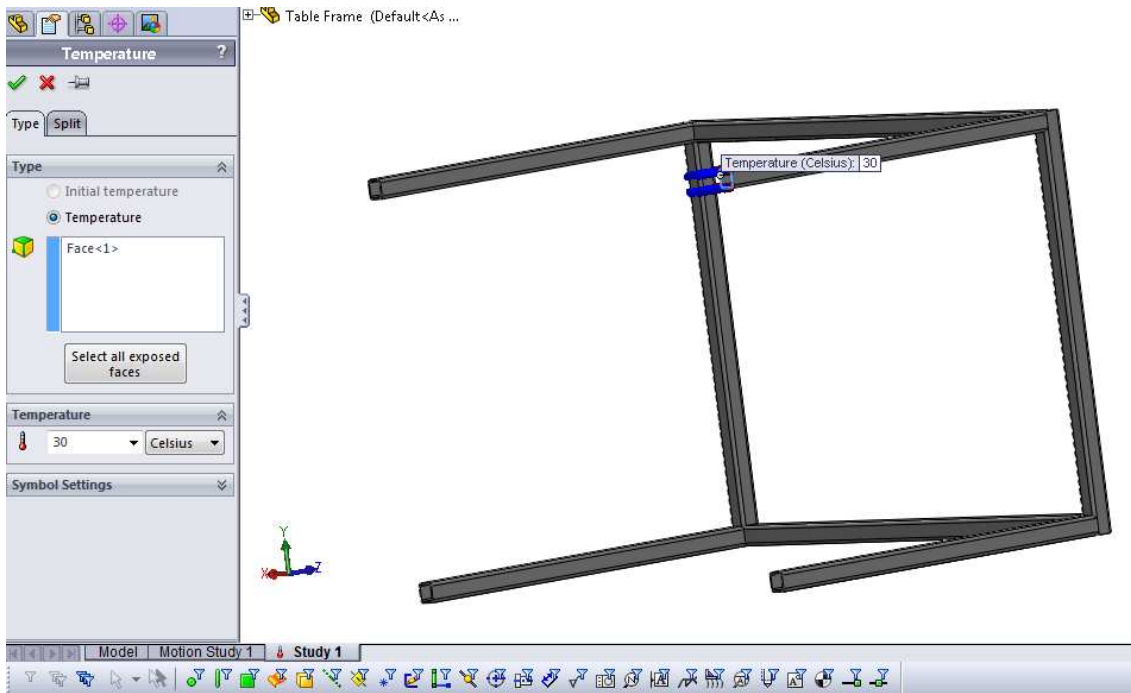




Εικ. 5.13

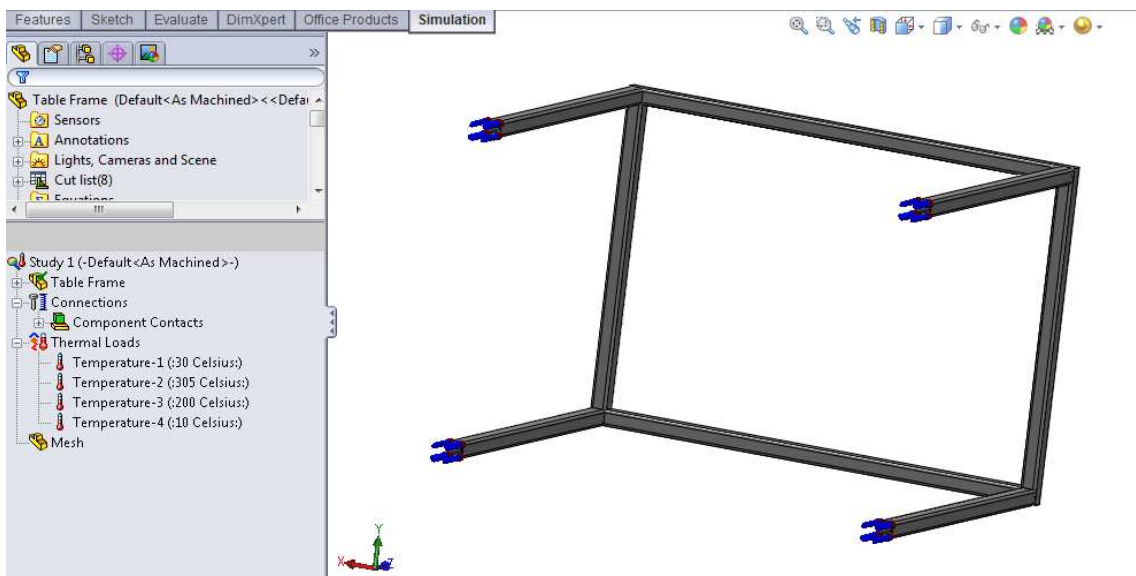
Αφού ορίστηκε το υλικό, το επόμενο βήμα είναι να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες. Για να γίνει αυτό πρέπει στην επιλογή **Thermal Loads** να επιλεγθεί η εντολή **Temperature** (αντίστοιχη εντολή Prescribed Temperature στο Pro Engineer). Παρατηρείται ότι υπάρχουν επίσης οι εντολές convection (συναγωγή), heat power (αντίστοιχο heat load στο Pro Engineer), heat flux (θερμική ροή, εδώ μπορεί να οριστεί και όχι απλώς να καταδειχθεί ως αποτέλεσμα) και radiation (ακτινοβολία, δεν υπάρχει αντίστοιχη εντολή στο Pro Engineer Wildfire 5.0 αλλά υπάρχει σε νεότερη έκδοση).

Αφού επιλεγθεί η εντολή temperature εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπου ζητάει να επιλεγθεί η επιφάνεια με την αντίστοιχη προκαθορισμένη θερμοκρασία (Εικ. 5.16). Αυτό γίνεται τσεκάροντας την αντίστοιχη επιφάνεια. Επιλέγεται λοιπόν το κάθε πόδι του πλαισίου τραπεζιού και στην μπάρα temperature, καθορίζεται η αντίστοιχη τιμή προσέχοντας να είναι σε βαθμούς Κελσίου και έπειτα τσεκάρεται το εικονίδιο .



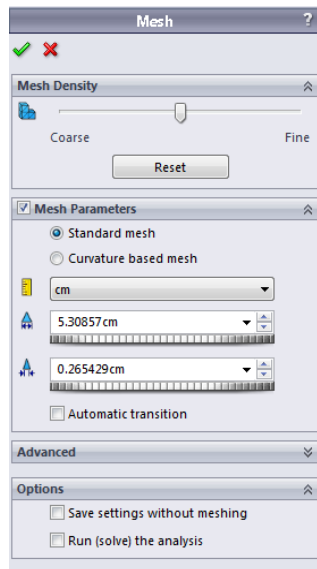
Εικ. 5.14

Αφού ορίστηκαν και οι τέσσερις συνοριακές συνθήκες το μοντέλο είναι έτοιμο προς το επόμενο βήμα, το οποίο είναι η δημιουργία πλέγματος. Ακόμα το πρόγραμμα εμφανίζει τις θερμοκρασίες με μπλε χαρακτηριστικό χρώμα και επίσης φαίνονται αριστερά στο δέντρο του μοντέλου (Εικ. 5.17).



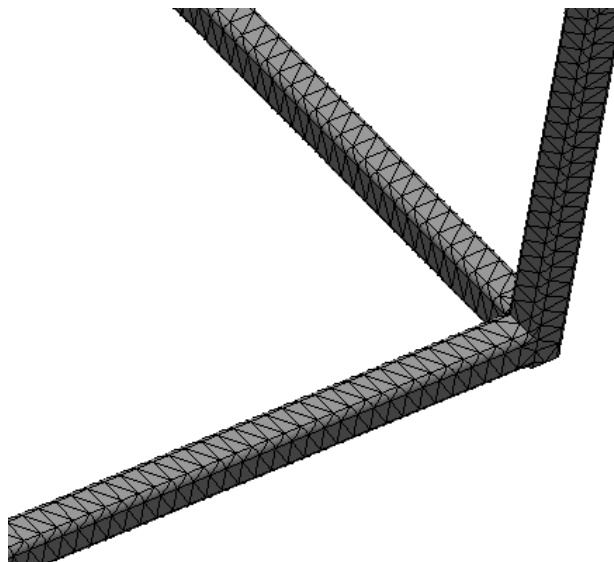
Εικ. 5.15

Για να καθορισθεί το πλέγμα πρέπει αριστερά στο δέντρο να γίνει δεξί κλικ στο εικονίδιο **Mesh** και έπειτα αριστερό κλικ στο **Create Mesh**. Εμφανίζεται ένα παράθυρο, στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί το πλήθος και η πυκνότητα του πλέγματος (Εικ. 5.18). Στο παράδειγμα αυτό για να γίνει η ανάλυση με μεγαλύτερη ακρίβεια, στην μπάρα όπου το ένα πεπερασμένο στοιχείο έχει απόσταση 5.3cm, θα γίνει 3.5cm.




Εικ. 5.16

Αυτομάτως ξεκινάει η διαδικασία δημιουργία πλέγματος, η οποία διαρκεί κάποια δευτερόλεπτα και το μοντέλο εμφανίζεται ξανά, αλλά χωρισμένο σε πεπερασμένα στοιχεία (Εικ. 5.19)




Εικ. 5.17

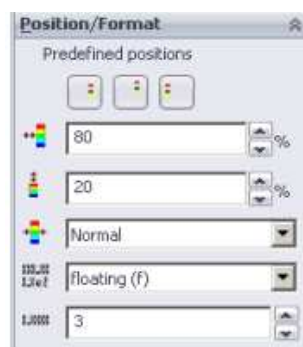
Το μοντέλο είναι έτοιμο προς ανάλυση. Για να ξεκινήσει η ανάλυση επιλέγεται η εντολή Run. Η ανάλυση διαρκεί ένα χρονικό διάστημα και έπειτα εμφανίζεται η εντολή Results, η οποία πρέπει να επιλεχθεί, αφού τελειώσει η διαδικασία ανάλυσης. Για να οριστεί τι είναι επιθυμητό να καταδείξει το πρόγραμμα πρέπει να γίνει δεξί κλικ στο Results και έπειτα αριστερό κλικ στο Defile Thermal Plot. Εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικ. 5.20) όπου επιλέγεται temperature , Celsius και .



Εικ. 5.18

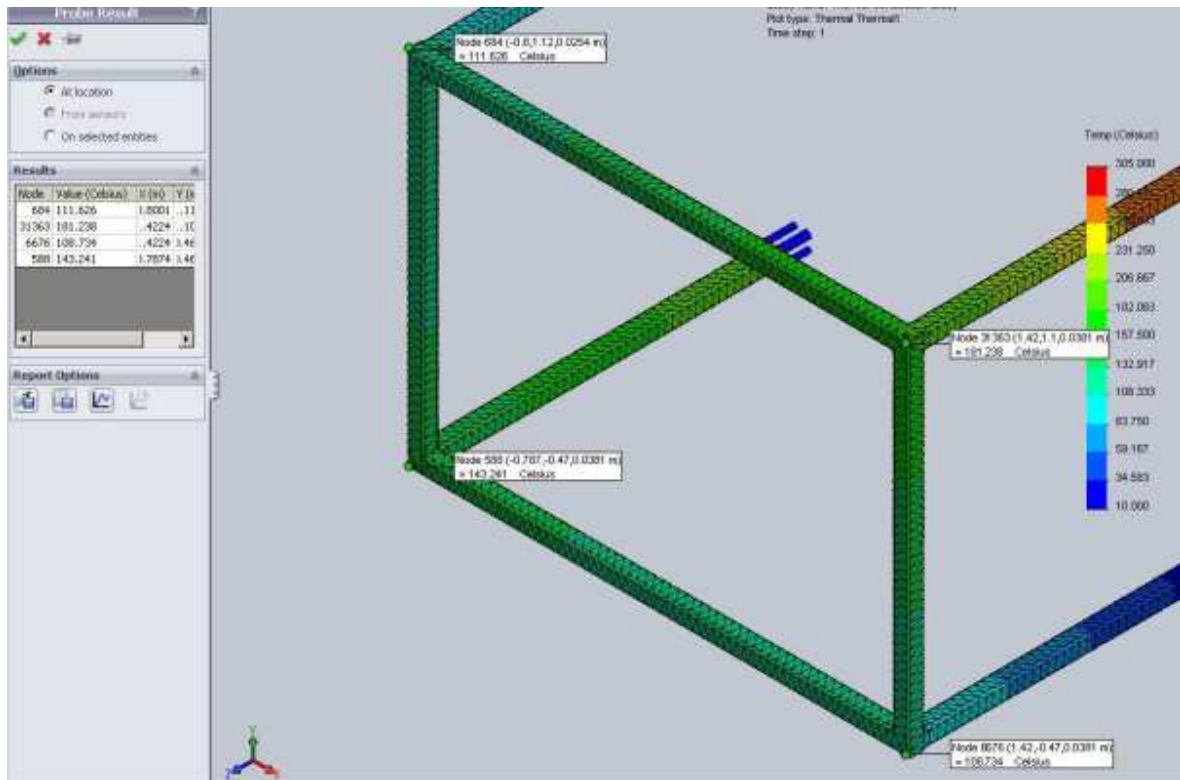
Τώρα είναι εμφανής η κατανομή θερμοκρασιών στο μοντέλο. Το πρόγραμμα εμφανίζει τους αριθμούς σε μορφή (3,05e+02) και δεν είναι δυνατόν να δειχθεί η ακριβής θερμοκρασία στα επιθυμητά σημεία. Για να γίνουν εμφανής τα αποτελέσματα σε απλή μορφή, πρέπει να γίνουν τα ακόλουθα βήματα:

- Δεξί κλικ στο **Results** και επιλογή του **Chart Options**
- Εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο (Εικ. 5.21) όπου στην θέση του *scientific*, γίνεται αντικατάσταση με **floating**
- Κλικ στο  για να εφαρμοστούν οι αλλαγές.



Εικ. 5.19

Άλλη μία αλλαγή που πρέπει να γίνει είναι να εμφανιστεί το πλέγμα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα με ένα κλικ να μπορεί κανείς να δει τη θερμοκρασία σε οποιοδήποτε κόμβο και σημείο. Για να γίνει αυτό, πρέπει κάτω από το results να γίνει δεξί κλικ και έπειτα να επιλεγεί η εντολή **settings**. Εκεί να αλλάξει η εντολή *Boundary Options* και να γίνει **Mesh**. Αφού γίνει αυτό κάνοντας ξανά δεξί κλικ κάτω από το results, υπάρχει η επιλογή Probe. Εμφανίζεται ένα παράθυρο εντολών, όπου αν γίνει η επιλογή **At Location** στην μπάρα **Options** και διαλέγοντας τις τέσσερις γωνίες εμφανίζονται οι θερμοκρασίες στα επιθυμητά σημεία (Εικ. 5.22).



Εικ. 5.20

Οι θερμοκρασίες είναι οι εξής:

- $T_A = 111.6 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_B = 181.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_C = 108.7 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_D = 143.2 \text{ }^\circ\text{C}$

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα(5.2):

	Θεωρητικός Υπολογισμός	Pro Engineer	Solidworks
T <sub>A</sub>	110.2°C	111.2°C	111.6 °C
T <sub>B</sub>	182.0°C	181.6°C	181.2 °C
T <sub>C</sub>	107.6°C	108.9°C	108.7 °C
T <sub>D</sub>	143.0°C	143.3°C	143.2 °C

Πίνακας 5.2

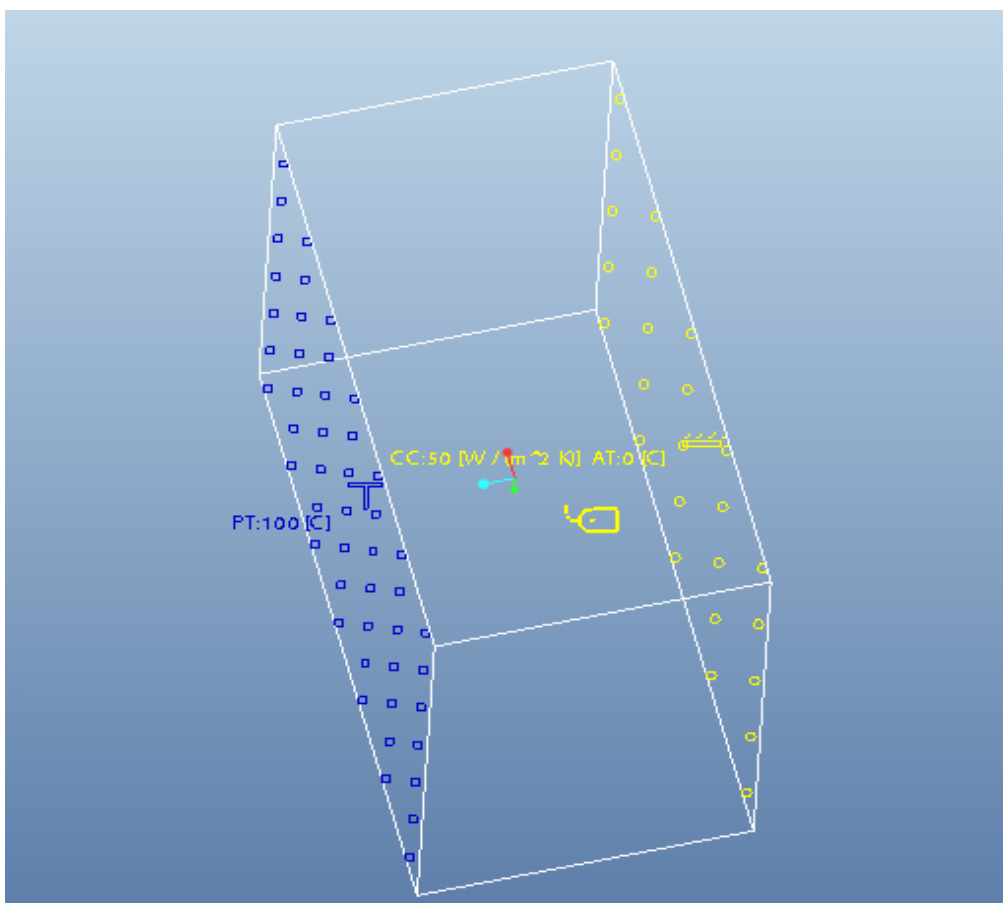
Όπως φαίνεται η διαφορά είναι ελάχιστη και η ακρίβεια μεγάλη και στα δύο λογισμικά. Παρακάτω (Πίνακας 5.3) φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή:

	Pro Engineer	Solidworks
T <sub>A</sub>	0.9 %	1.3 %
T <sub>B</sub>	0.3 %	0.4 %
T <sub>C</sub>	1.2 %	1.0 %
T <sub>D</sub>	0.2 %	0.1 %

Πίνακας 5.3

### 5.2) Παράδειγμα 2:Χάλκινη πλάκα, μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή

Χαλύβδινη πλάκα, μήκους 95mm, ύψους 100mm και πλάτους 50mm(Εικ. 5.23), έχει σταθερή θερμοκρασία 100°C στην μία επιφάνεια και η άλλη επιφάνεια εκτίθεται σε περιβάλλον με 0°C και συντελεστή συναγωγής 50 W/m<sup>2</sup>°C. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού είναι 121.23 W/m<sup>2</sup>°C. Να υπολογιστεί η θερμοκρασία στην κρύα επιφάνεια και η θερμική ροή.



Εικ. 5.23

Υπολογισμός με βάση τη θεωρία:

Πρέπει να υπολογιστεί η θερμοκρασία στην δεξιά επιφάνεια της εικόνας 5.23. Υπάρχει μεταφορά θερμότητας με αγωγή στην πλάκα και μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον με συναγωγή.

Αγωγή:

$$Q = \text{Σφάλμα!}, \text{ όπου } k = 121.23 \text{ W/m}^2\text{C} \text{ και } A = 0.0095\text{m}^2$$

Συναγωγή:

$$Q = h A (T_2 - 0), \text{ όπου } h = 50 \text{ W/m}^2\text{C} \text{ και } A = 0.0095\text{m}^2$$

Σε σταθερή κατάσταση η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή είναι ίση, οπότε

$$\text{Σφάλμα!} = h A (T_2 - 0)$$

$$2303.37 - 23.0337 T_2 = 0.475 T_2$$

$$2303.37 = 23.5087 T_2$$

$$\underline{T_2 = 97.97^\circ\text{C}}$$

Η θερμική ροή είναι:

$$q = k (\Delta T) / \Delta x$$

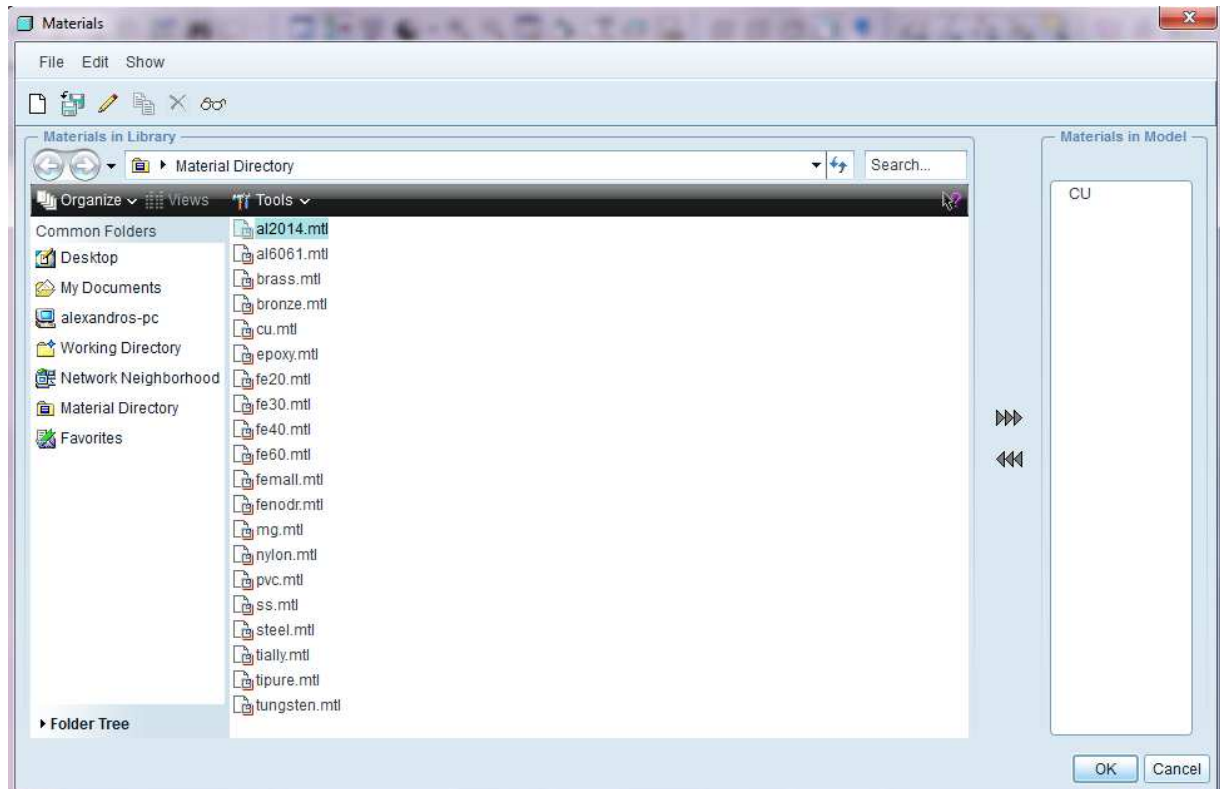
$$q = (121.23 \text{ W/m}^2\text{C} * 2.03 \text{ C}) / 0.05\text{m}^2$$

$$\underline{q = 4921 \text{ W/m}^2}$$

Υπολογισμός με βάση το Pro Engineer:

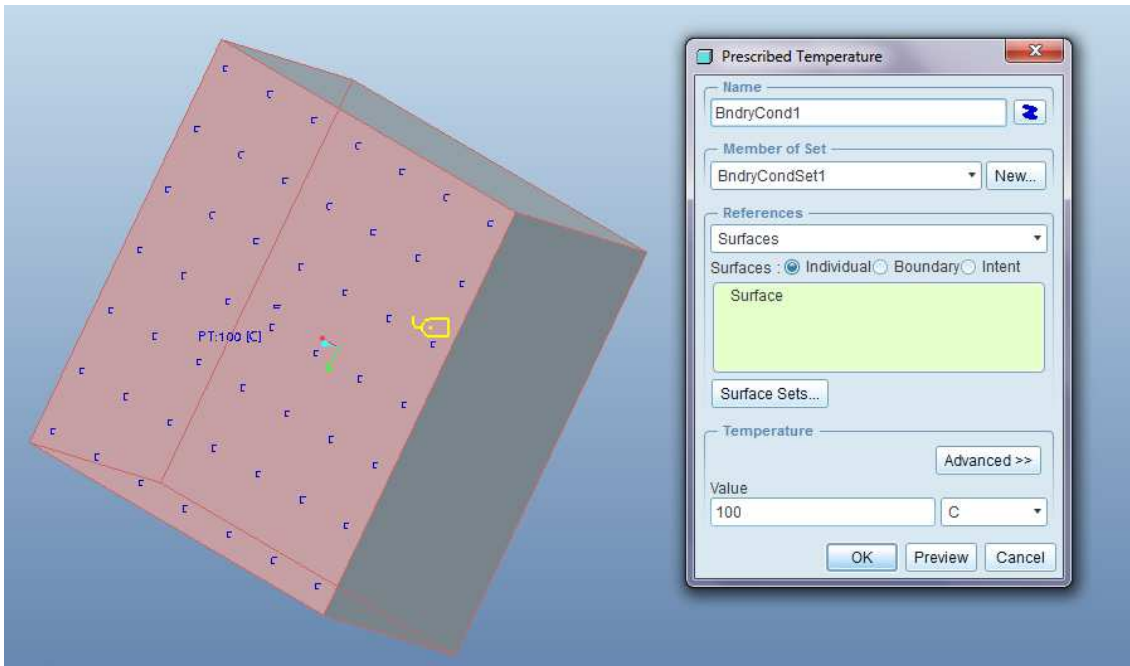


Σχεδιάζεται το αντικείμενο μελέτης (Εικ. 5.24). Έπειτα γίνεται εισαγωγή στο **mechanica thermal**. Ορίζεται το υλικό από την επιλογή properties → materials. Το συγκεκριμένο υλικό υπάρχει στην βιβλιοθήκη του λογισμικού (CU), αφού οι ιδιότητες του υλικού είναι ίδιες (Εικ. 5.24). Αφού οριστεί το υλικό, εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες.

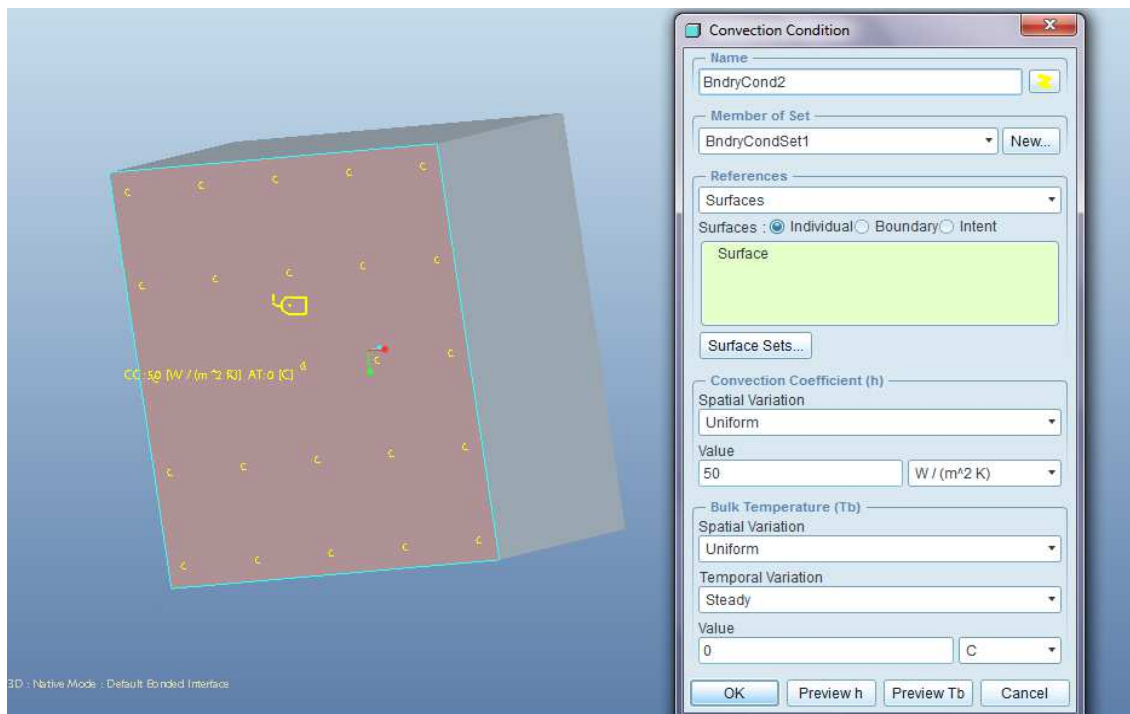


Εικ. 5.24

Ορίζεται σταθερή θερμοκρασία 100°C στην μία επιφάνεια (Εικ. 5.25) και στην άλλη συνθήκη συναγωγής (Εικ. 5.26) με 0°C και συντελεστή συναγωγής 50 W/m<sup>2</sup>C, μέσω των εντολών *prescribed temperature* και *convection condition*.

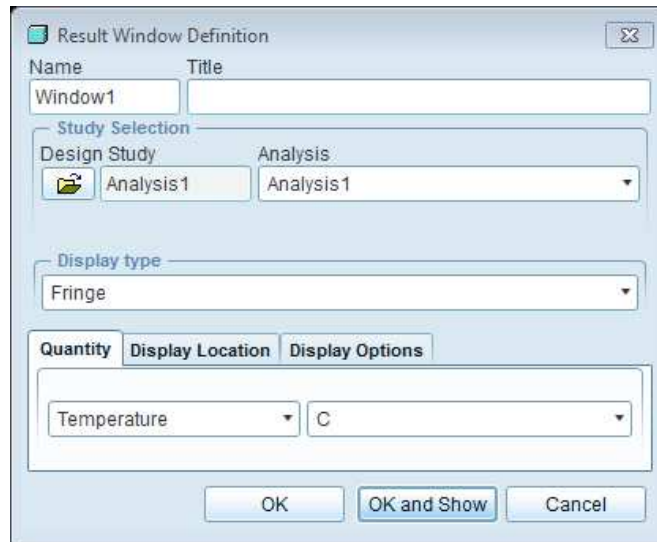


Εικ. 5.25

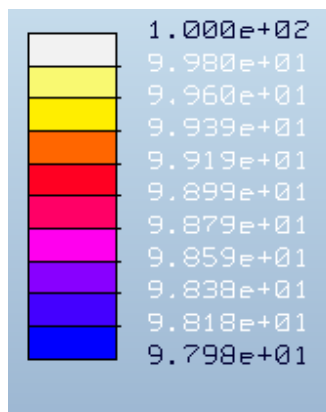


Εικ. 5.26

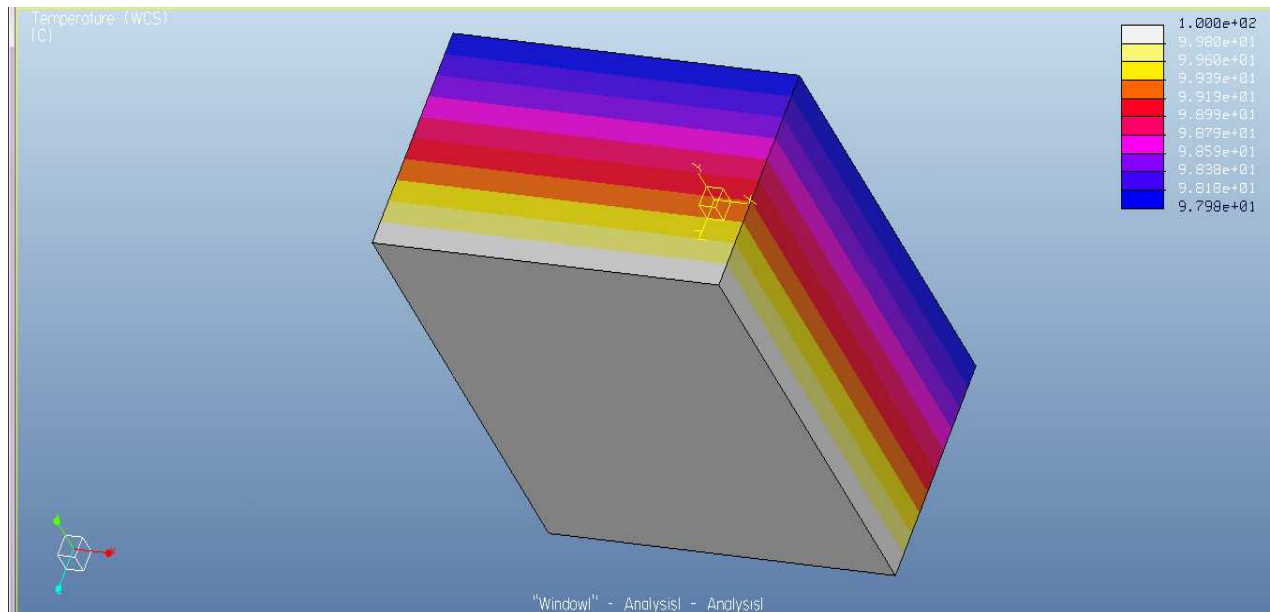
Γίνεται η ανάλυση όπως έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες. Στην παρουσίαση αποτελεσμάτων επιλέγεται ως *Display Type*, *Fringe* και ως *Quantity*, *Temperature*(Εικ. 5.27). Όπως φαίνεται στις εικόνες 5.28 και 5.29 η θερμοκρασία στην κρύα επιφάνεια είναι 97.98°C



Εικ. 5.27

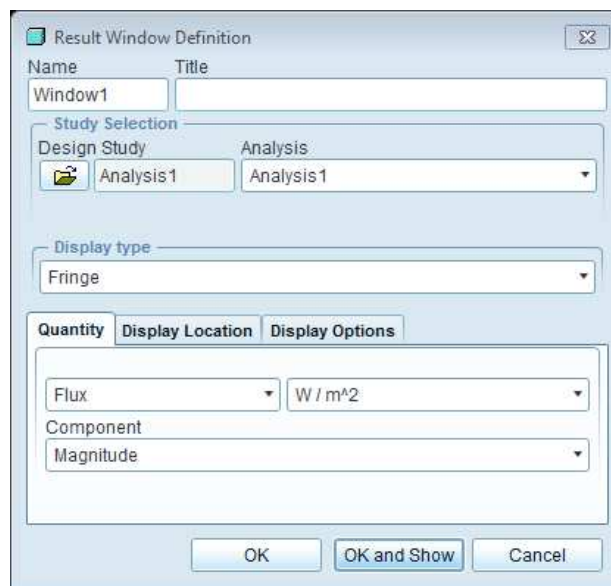


Εικ. 5.28

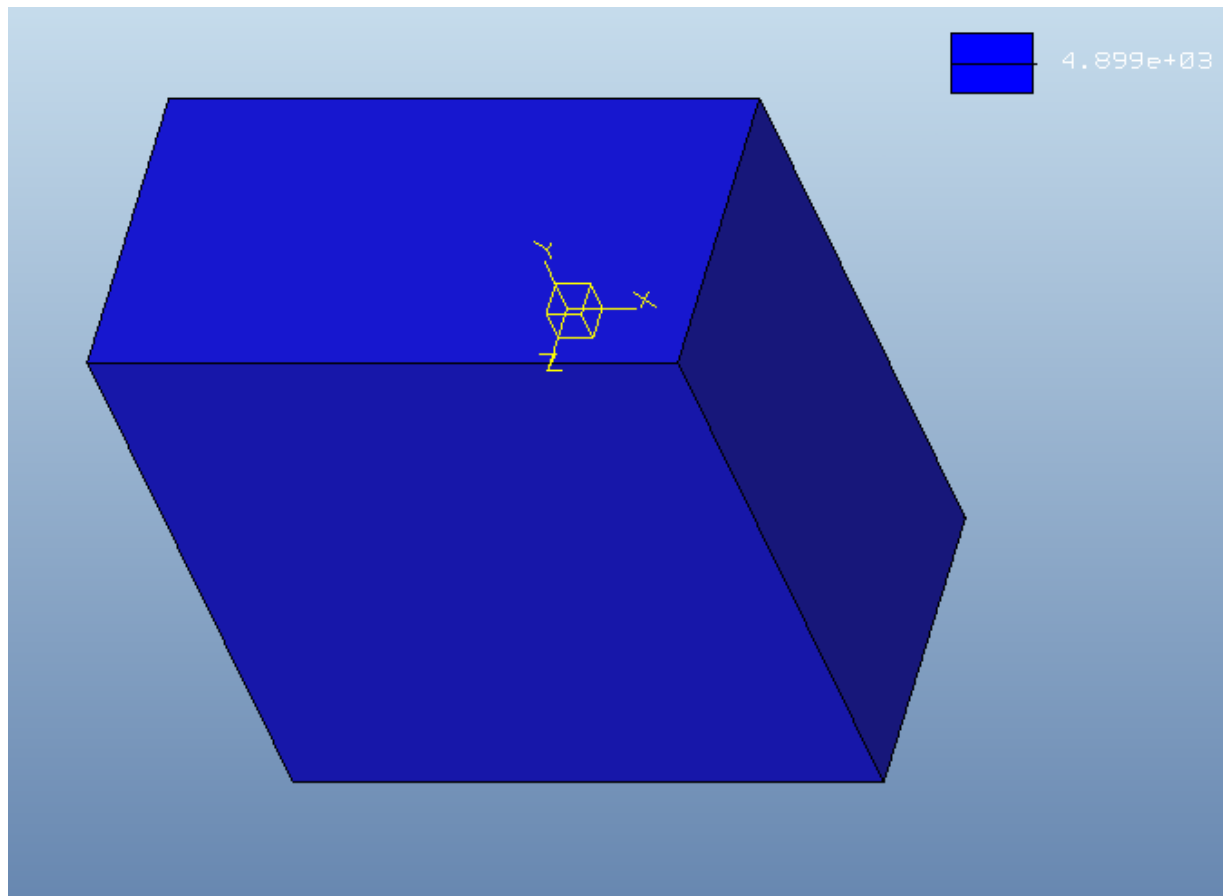


Εικ. 5.29

Για να βρεθεί η θερμική ροή επιλέγεται ως Display Type, Fringe και ως Quantity, Flux σε  $W/m^2$  (Εικ. 5.30)



Εικ. 5.30



Εικ. 5.31

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5.31 η θερμική ροή είναι 4899 W/ m<sup>2</sup>

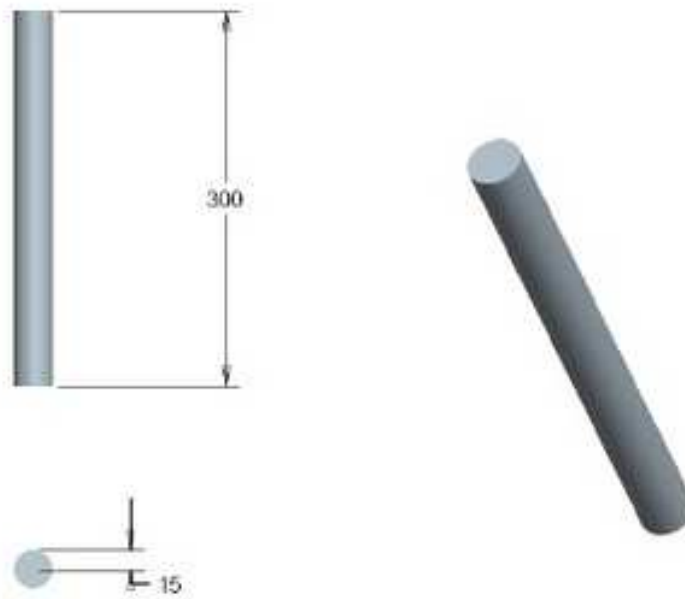
Συνοπτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα 5.4

	Θεωρητικός Υπολογισμός	Υπολογισμός Pro Engineer	Ποσοστιαία Μεταβολή
T	99.97°C	99.98°C	0.01%
q	4921 W/m <sup>2</sup>	4899 W/m <sup>2</sup>	0.45%

Πίνακας 5.4

### 5.3) Παράδειγμα 3: Χαλύβδινη ράβδος, θερμικό φορτίο και συναγωγή

Χαλύβδινη ράβδος (Εικ. 5.32), διαμέτρου 30mm και μήκους 300mm με συντελεστή αγωγιμότητας  $k=121.23 \text{ W/m}^2\text{C}$ , εκτίθεται σε περιβάλλον  $0^\circ\text{C}$  με συντελεστή συναγωγής  $50 \text{ W/m}^2\text{C}$  στην μία κάθετη επιφάνεια. Στην άλλη επιφάνεια, υπάρχει θερμικό φορτίο  $100\text{mW}$ . Να υπολογιστεί η θερμοκρασία στις δύο κάθετες επιφάνειες.



Εικ. 5.32

Υπολογισμός με βάση τη θεωρία:

Τα δεδομένα είναι:

$$h=50 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$k=121.23 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$q=0.1\text{W}$$

$$A=\pi r^2 = 0.0007\text{m}^2$$

$$L=0.3\text{m}$$

$$T_{\text{atm}}=0^\circ\text{C}$$

Στην επιφάνεια 1 (Αγωγή)

$$q = \Sigma \text{φάσμα!} \rightarrow$$

$$0.1 = 121.23 * 0.0007 (T_1 - T_2) / 0.3 \rightarrow$$

$$T_1 = 0.3535 + T_2 \text{ (Σχέση 1)}$$

Στην επιφάνεια 2 (Συναγωγή)

$$q = h A (T_2 - T_{\text{atm}}) \rightarrow$$

$$0.1 = 50 * 0.0007 (T_2 - 0) \rightarrow$$

$$T_2 = \underline{2.86^\circ\text{C}}$$

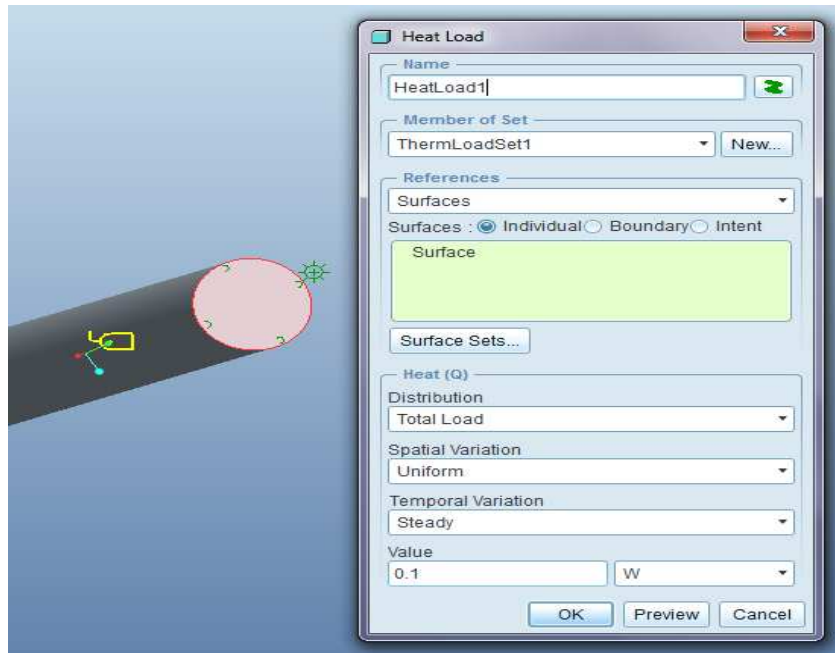
Από σχέση 1,

$$T_1 = \underline{3.21^\circ\text{C}}$$

Υπολογισμός με βάση το Pro Engineer:

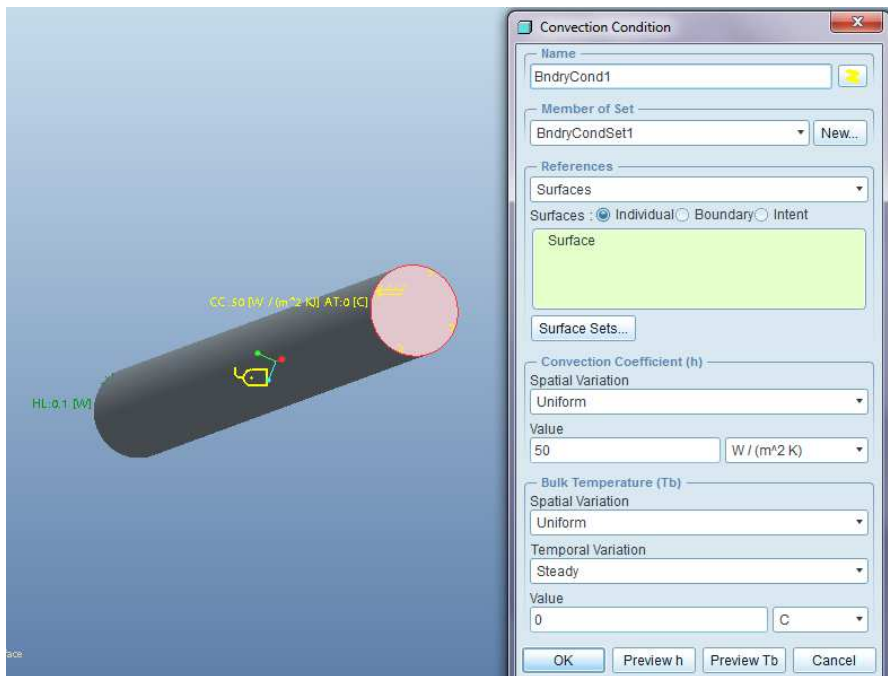
Σχεδιάζεται το αντικείμενο μελέτης (Εικ. 5.32). Έπειτα γίνεται εισαγωγή στο **mechanica thermal**. Ορίζεται το υλικό από την επιλογή properties  $\rightarrow$  materials. Το συγκεκριμένο υλικό υπάρχει στην βιβλιοθήκη του λογισμικού (CU), αφού οι ιδιότητες του υλικού είναι ίδιες (Εικ. 5.24). Αφού οριστεί το υλικό, εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες, όπως έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες.

Θερμικό φορτίο 0.1W (Εικ. 5.33)



Εικ. 5.33

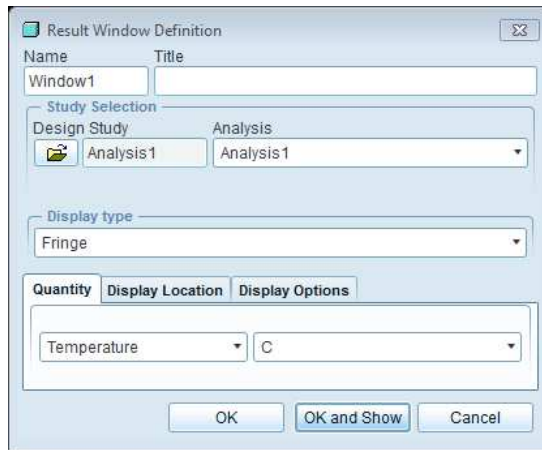
Συνθήκη συναγωγής με συντελεστή συναγωγής  $50 \text{ W/m}^2\text{C}$  σε περιβάλλον  $0^\circ\text{C}$  (Εικ.5.34)



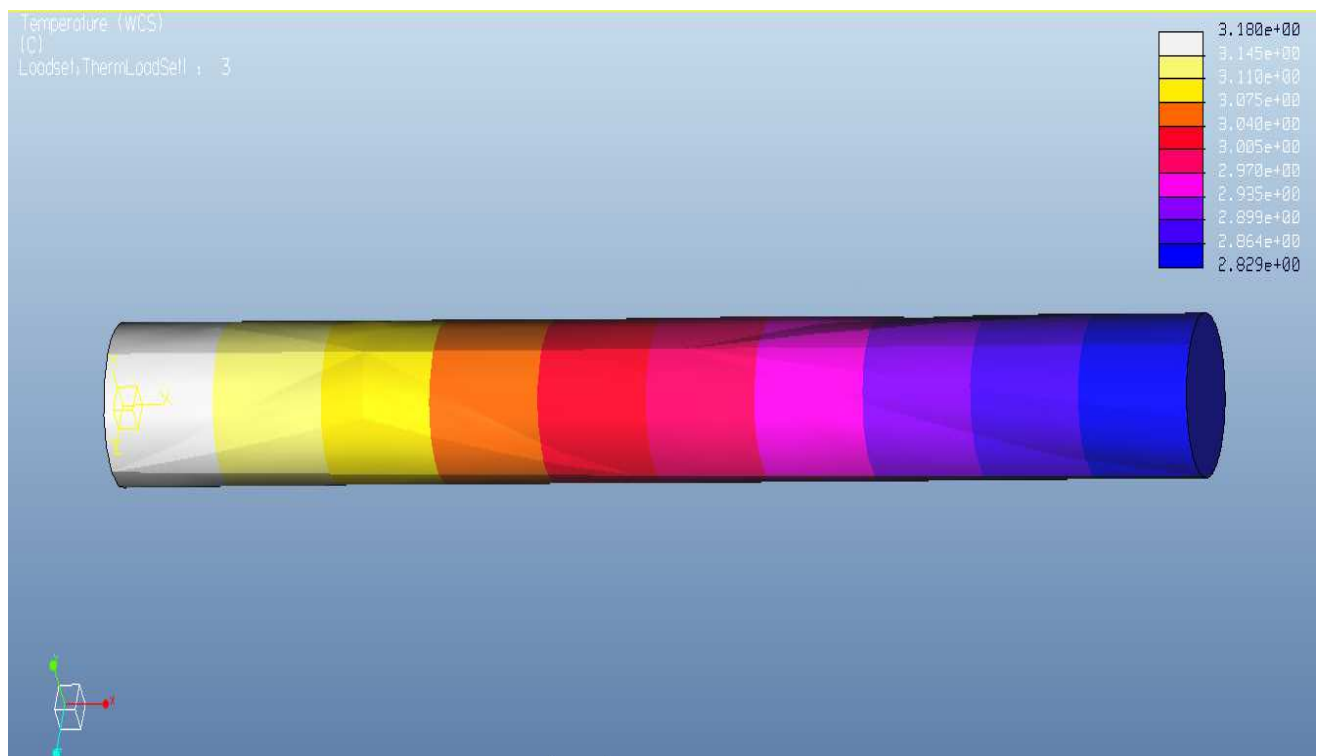
Εικ. 5.34



Γίνεται η ανάλυση όπως έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες. Στην παρουσίαση αποτελεσμάτων επιλέγεται ως *Display Type*, *Fringe* και ως *Quantity*, *Temperature*(Εικ. 5.35). Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.36 η θερμοκρασία στην κρύα επιφάνεια είναι 2.83°C και στην ζεστή επιφάνεια 3.18°C.

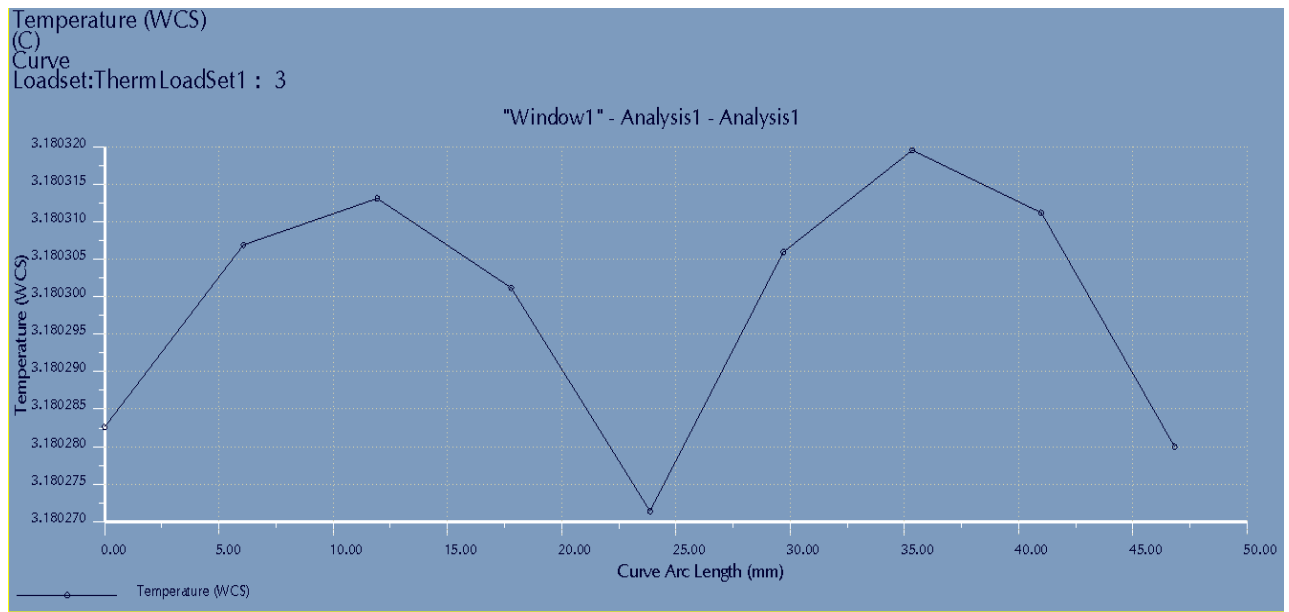


Εικ. 5.35

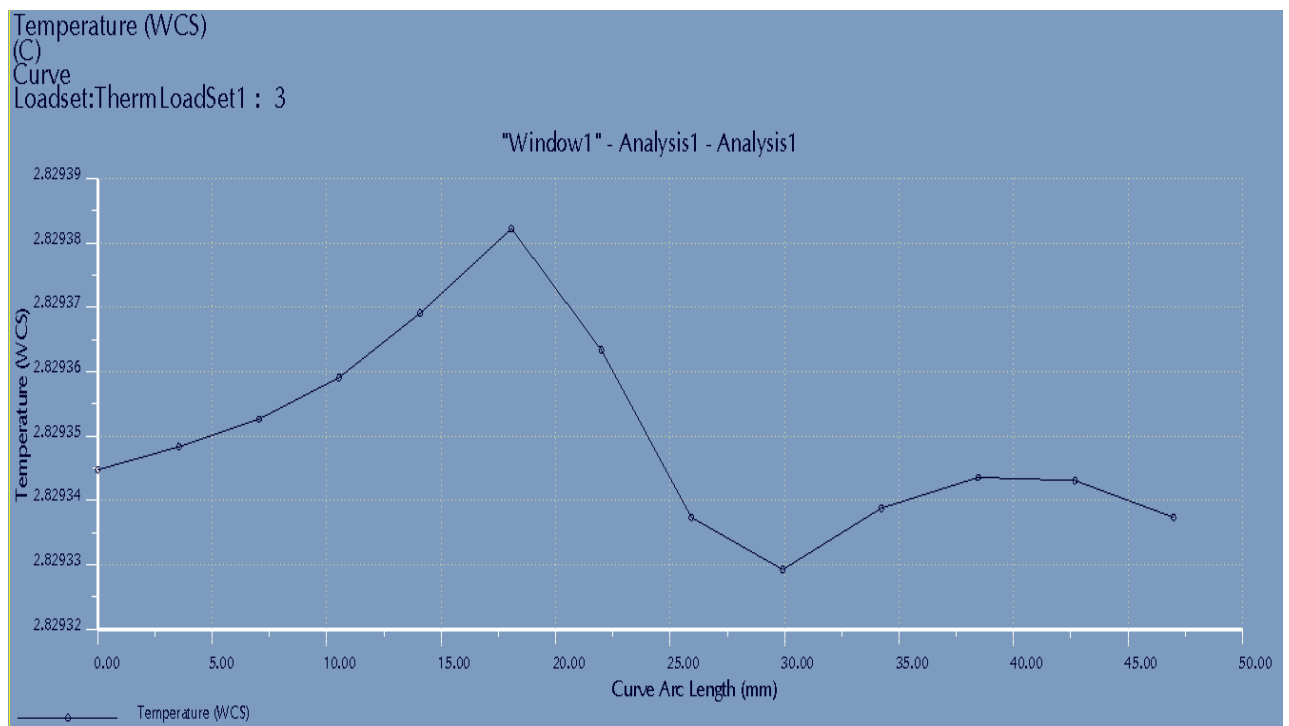


Εικ. 5.36

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας στις δύο ακμές(Εικ.5.37 και Εικ.5.38).



Εικ. 5.37



Εικ. 5.38

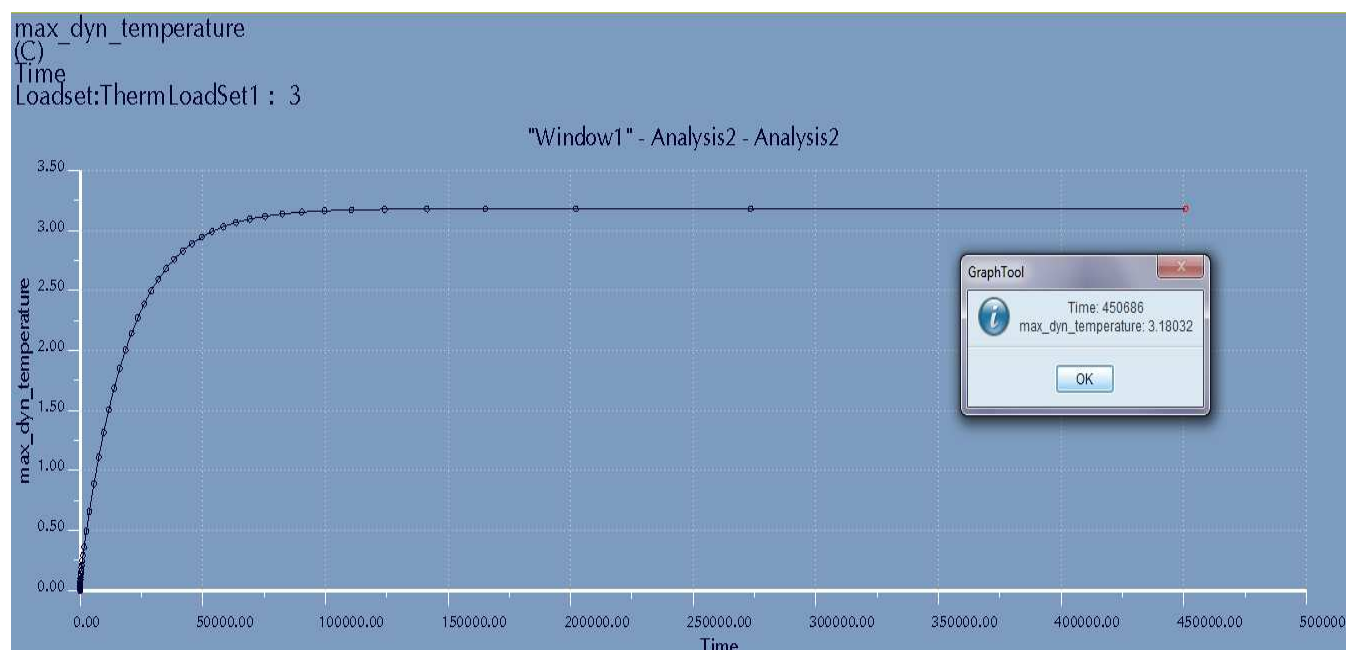
Συνοπτικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα(5.5):

	Θεωρητικός Υπολογισμός	Υπολογισμός Pro Engineer	Ποσοστιαία Μεταβολή
$T_1$	3.21°C	3.18°C	0.93%
$T_2$	2.86°C	2.83°C	1.05%

Πίνακας 5.5

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό μπορεί να βρεθεί σε τι χρόνο, το μοντέλο ήρθε σε σταθερή θερμική κατάσταση με μέγιστη θερμοκρασία 3.18°C.

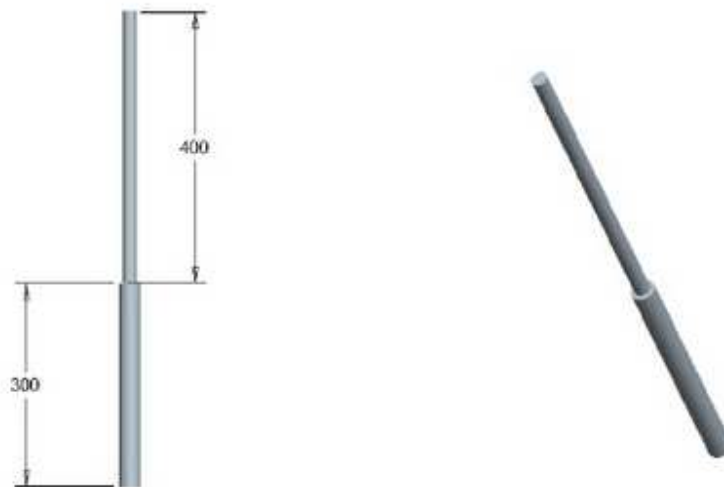
Κάνοντας μία καινούργια μεταβατική ανάλυση(**Transient Analysis**), με το ίδιο τρόπο που έχει καταδειχθεί στην ενότητα 4.4, το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω (Εικ. 5.39) με τον χρόνο να είναι 450686sec(125h)



Εικ. 5.39

#### 5.4) Παράδειγμα 4: Χάλκινη και χαλύβδινη ράβδος με θερμικό φορτίο και συναγωγή

Χαλύβδινη και χάλκινη ράβδος (Εικ. 5.40), διαμέτρου 30mm, μήκους 300mm και διαμέτρου 20mm, μήκους 400 mm αντίστοιχα με συντελεστή αγωγιμότητας του χάλυβα  $k = 43.01 \text{ W/m}^2\text{C}$  και του χαλκού  $121.23 \text{ W/m}^2\text{C}$ , εκτίθεται σε περιβάλλον  $0^\circ\text{C}$  με συντελεστή συναγωγής  $10 \text{ W/m}^2\text{C}$  στην μία κάθετη επιφάνεια. Στην άλλη επιφάνεια, υπάρχει θερμικό φορτίο  $100 \text{ mW}$ . Να υπολογιστεί η θερμοκρασία στις δύο κάθετες επιφάνειες και στην ένωση των ράβδων.



Εικ. 5.40

Υπολογισμός με βάση τη θεωρία:

Τα δεδομένα είναι:

$$q = 0.1 \text{ W}$$

$$k_1 = 43.01 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$k_2 = 121.23 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$A_1 = \pi r^2 = 0.000706 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \pi r^2 = 0.000314 \text{ m}^2$$

$$L_1 = 0.3 \text{ m}$$

$$L_2 = 0.4 \text{ m}$$

$$h = 10 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$T_{\text{atm}} = 0^\circ\text{C}$$

Επιφάνεια 1:

$$q = k_1 \cdot A_1 \cdot (T_1 - T_2) / L \rightarrow$$
$$0.1 = 43.01 \cdot 0.000706 (T_1 - T_2) / 0.3 \rightarrow$$
$$0.03 = 0.03036 T_1 - 0.0306 T_2 \rightarrow$$
$$T_1 = 0.99 + T_2 \text{ (Σχέση 1)}$$

Επιφάνεια 2:

$$q = k_2 \cdot A_2 \cdot (T_2 - T_3) / L \rightarrow$$
$$0.1 = 121.23 \cdot 0.000314 (T_2 - T_3) / 0.4 \rightarrow$$
$$0.04 = 0.03806 T_2 - 0.03806 T_3 \rightarrow$$
$$T_2 = 1.05 + T_3 \text{ (Σχέση 2)}$$

Επιφάνεια 3:

$$q = h \cdot A_2 \cdot (T_3 - T_{\text{atm}}) \rightarrow$$
$$0.1 = 10 \cdot 0.000314 (T_3 - 25)$$
$$T_3 = 56.84^\circ\text{C}$$

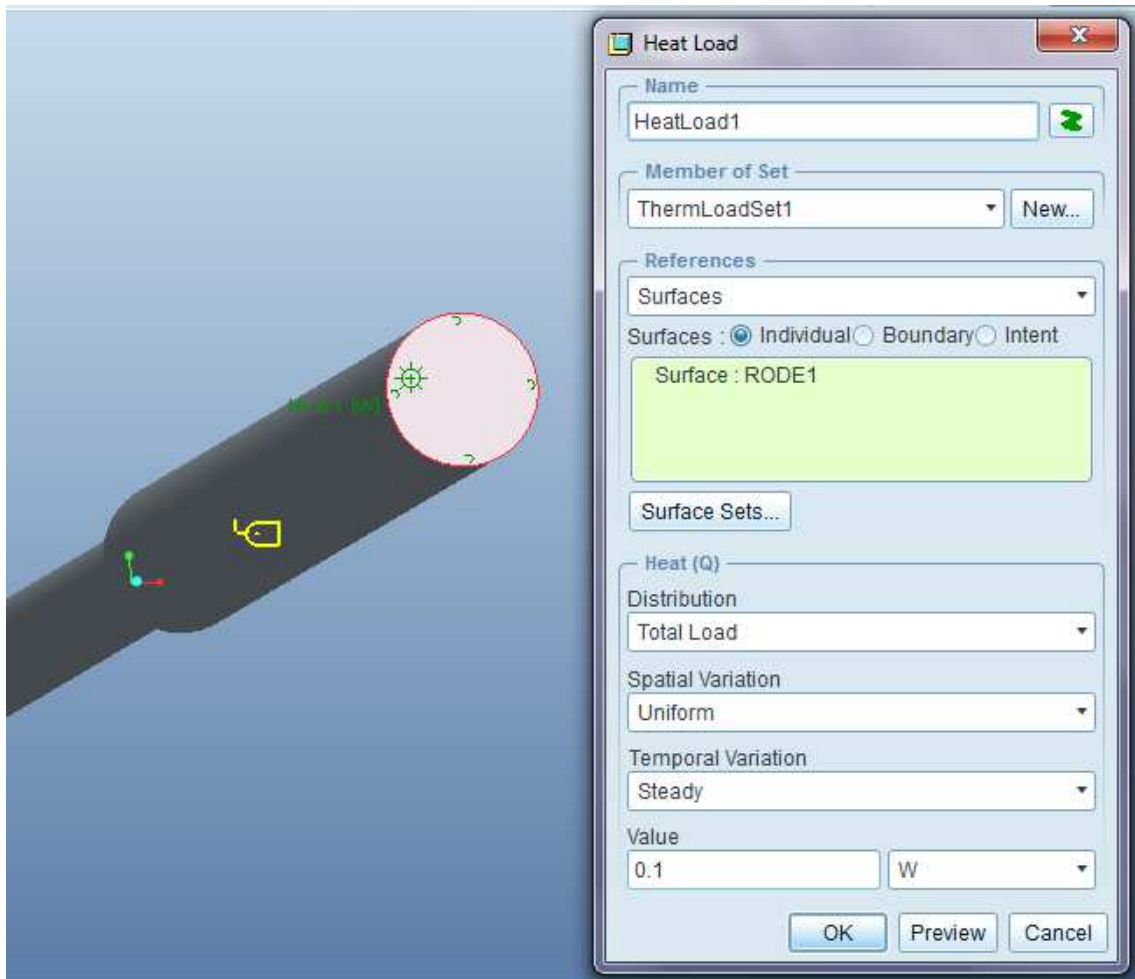
Από σχέσεις 1 και 2, ισχύει:

$$\underline{T_1 = 58.88^\circ\text{C}}$$
$$\underline{T_2 = 57.89^\circ\text{C}}$$
$$\underline{T_3 = 56.84^\circ\text{C}}$$

Υπολογισμός με βάση το Pro Engineer:

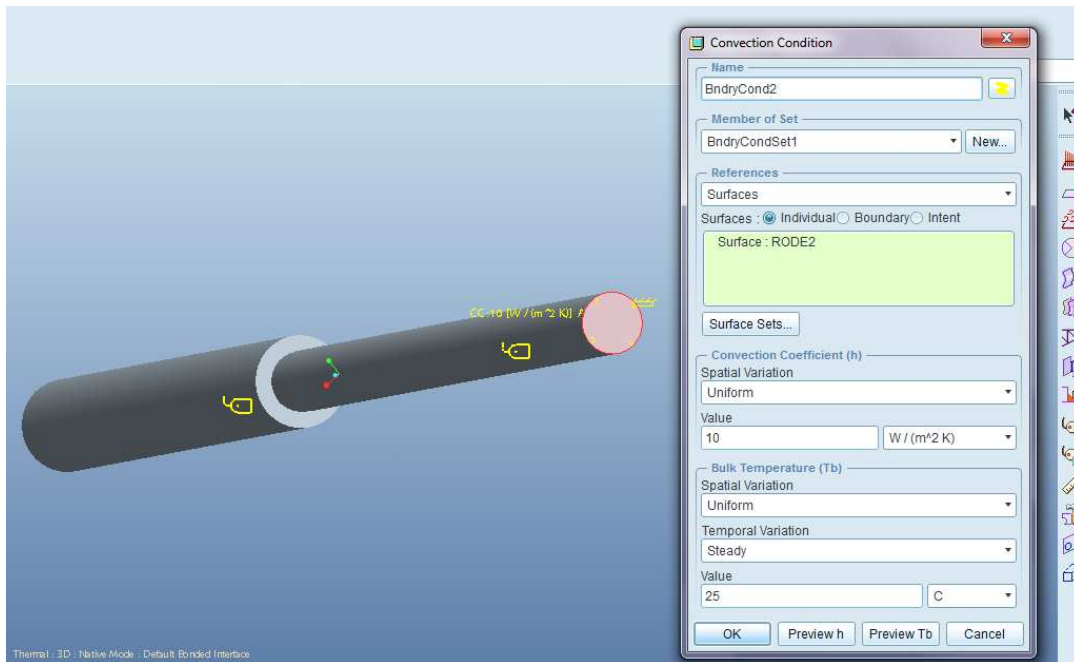
Σχεδιάζεται το αντικείμενο μελέτης, κάνοντας ξεχωριστά την κάθε ράβδο. (Εικ. 5.40). Έπειτα γίνεται εισαγωγή στο **mechanica thermal**. Ορίζονται τα υλικά από την επιλογή properties → materials. Τα συγκεκριμένα υλικά υπάρχουν στην βιβλιοθήκη του λογισμικού (CU) και (Steel), αφού οι ιδιότητες των υλικών είναι ίδιες. Αφού οριστούν τα υλικά, γίνεται η συναρμολόγηση (Assembly) και έπειτα στο **mechanica** εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες, όπως έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες.

Θερμικό φορτίο 0.1W (Εικ. 5.41)



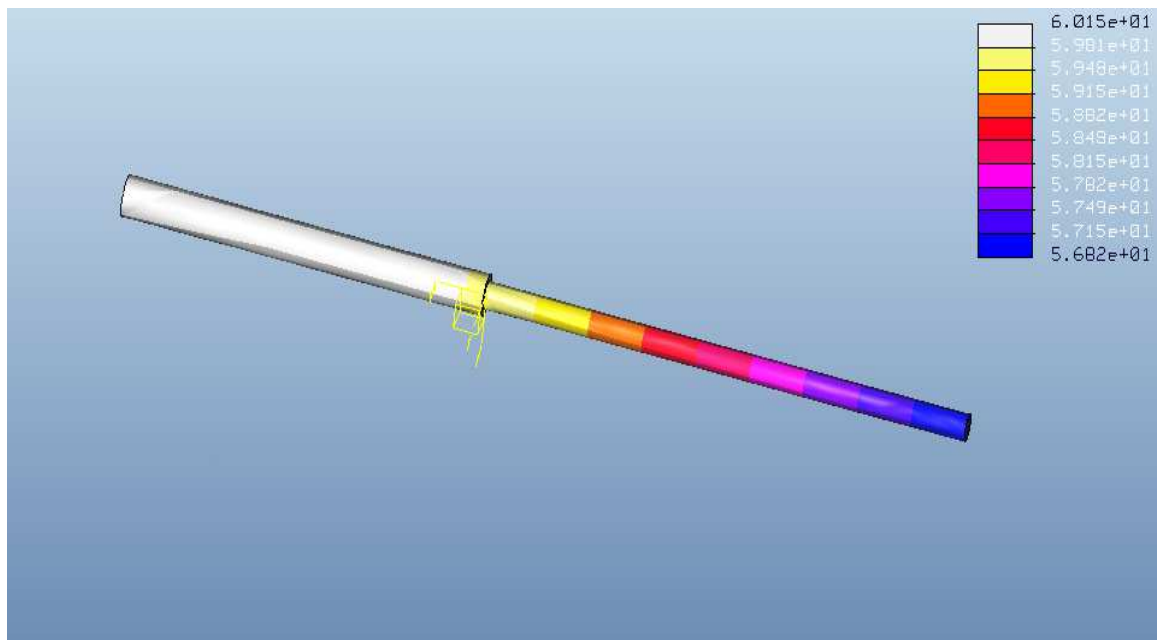
Εικ. 5.41

Συνθήκη συναγωγής με συντελεστή συναγωγής  $10 \text{ W/m}^2\text{C}$  σε περιβάλλον  $25^\circ\text{C}$  (Εικ.5.42)



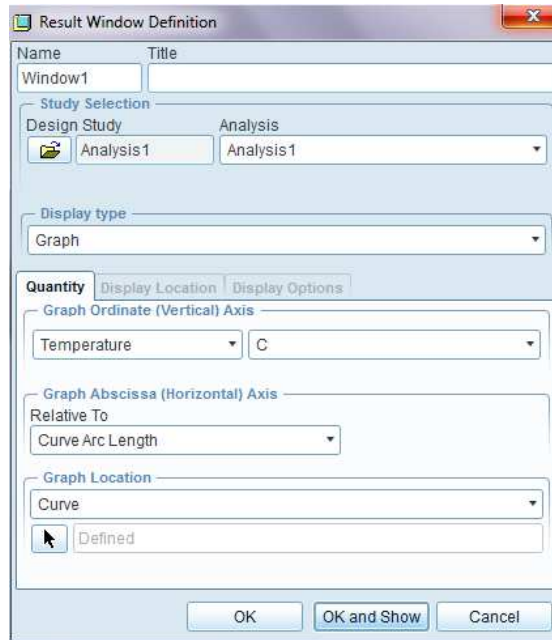
Εικ. 5.42

Γίνεται η ανάλυση όπως έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες ενότητες. Στην παρουσίαση αποτελεσμάτων επιλέγεται ως *Display Type, Fringe* και ως *Quantity, Temperature* (Εικ. 5.43). Από την πρώτη εικόνα, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα συμπίπτουν.

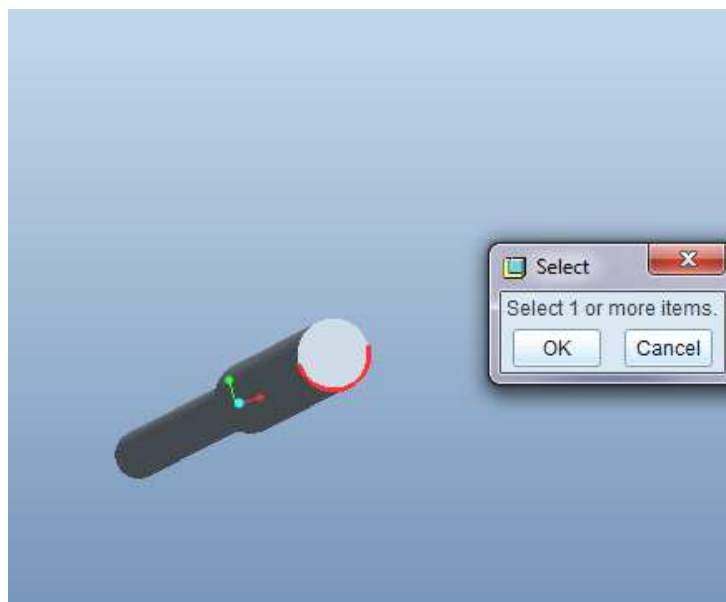


Εικ. 5.43

Για να φανούν οι θερμοκρασίες στις επιθυμητές ακμές, επιλέγεται ως *Display Type, Graph* και ως *Quantity, Temperature*(Εικ.5.44) και επιλέγεται η αντίστοιχη ακμή (Εικ.5.45)



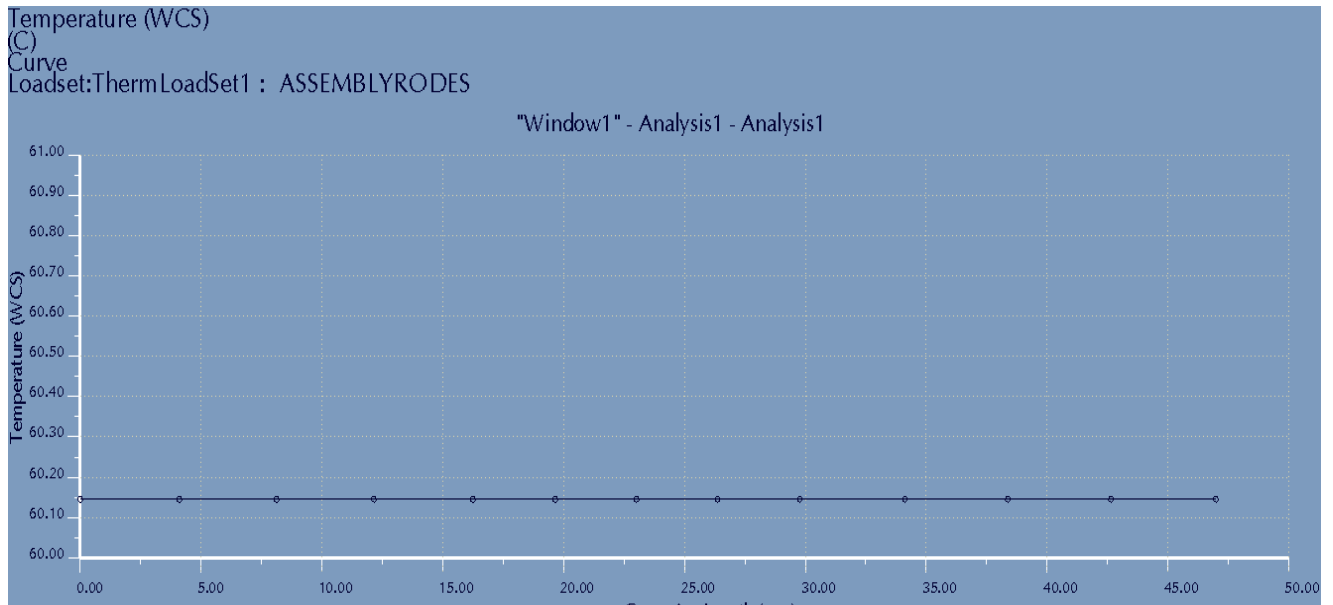
Εικ. 5.44



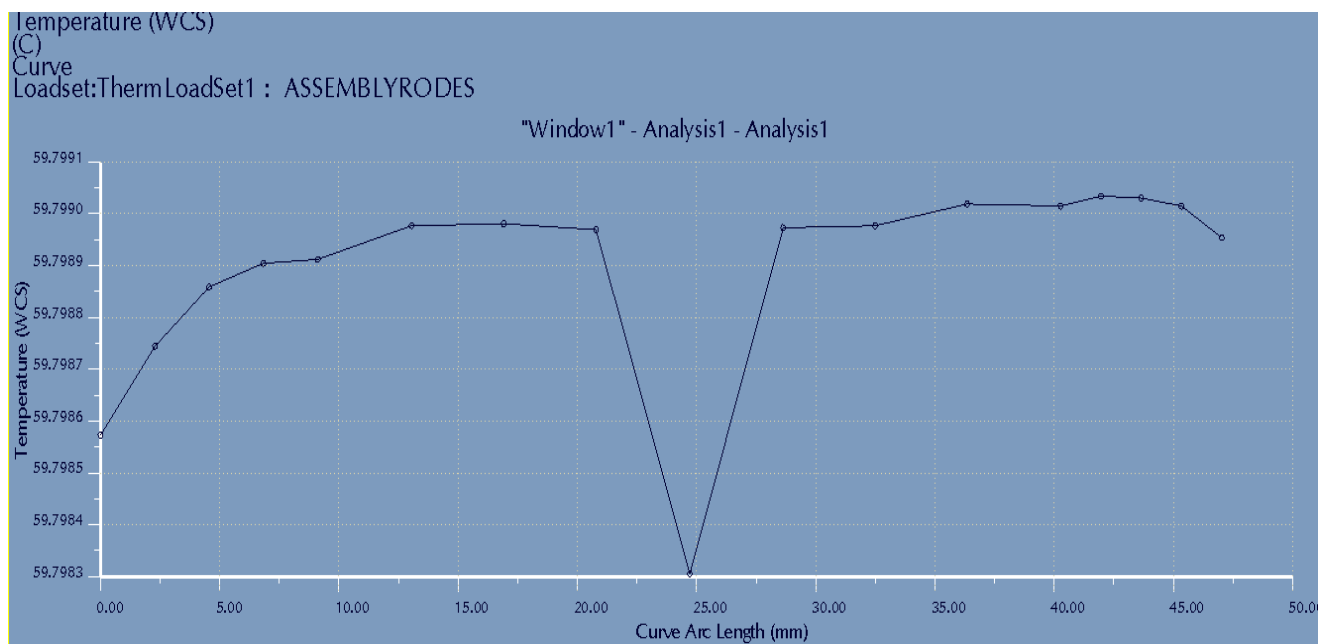
Εικ. 5.45



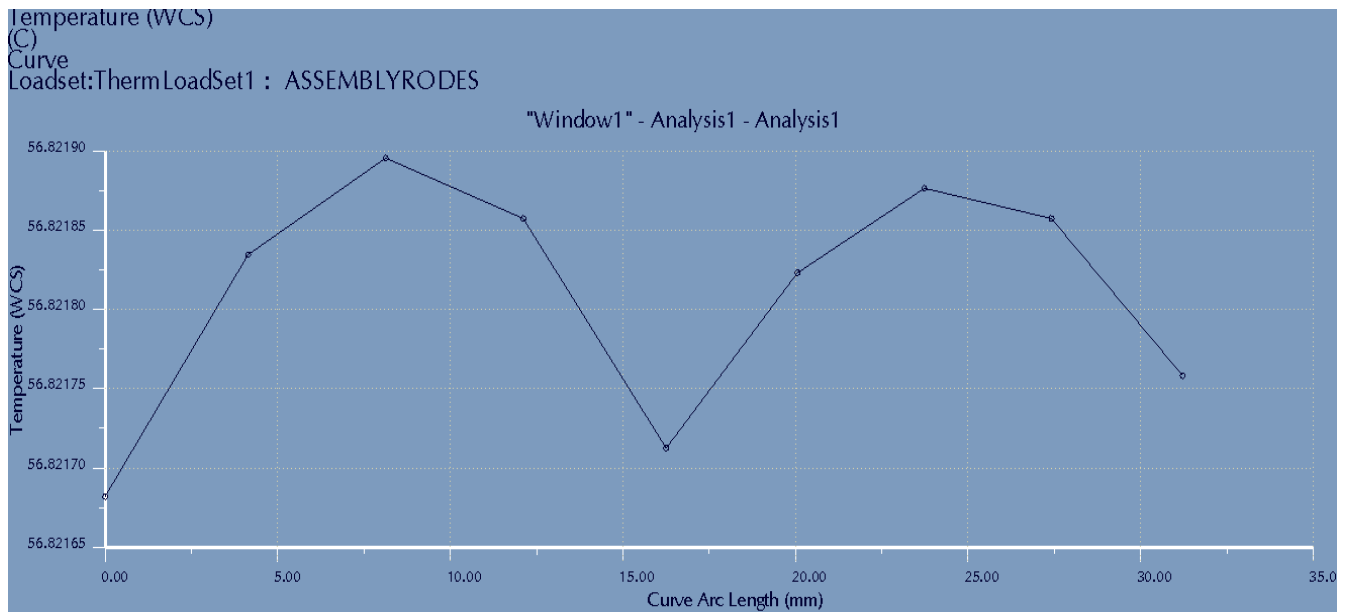
Τα διαγράμματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες, όπου  $T_1=60.14^\circ\text{C}$ ,  $T_2=59.79^\circ\text{C}$  και  $T_3=56.82^\circ\text{C}$



Εικ. 5.46



Εικ. 5.47



Εικ. 5.48

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα(5.6):

	Θεωρητικός Υπολογισμός	Υπολογισμός Pro Engineer	Ποσοστιαία Μεταβολή
$T_1$	58.88°C	60.14°C	2.14%
$T_2$	57.89°C	59.79°C	3.28%
$T_3$	56.84°C	56.82°C	0.03%

Πίνακας 5.6

## Συμπεράσματα και σχόλια

Η πτυχιακή εργασία είχε βασικό σκοπό να καταδείξει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται μια θερμική ανάλυση με χρήση FEA στο Pro Engineer αλλά και τις δυνατότητες του λογισμικού. Διαβάζοντας κανείς τους όρους FEA και θερμική ανάλυση, το πρώτο πράγμα που δημιουργείται στο μυαλό ενός μηχανικού, είναι μια εικόνα από πολύχρωμα διαγράμματα, τα οποία παριστάνουν τη θερμοκρασιακή κατανομή σε μία κατασκευή, εξαιτίας κάποιας φόρτισης και συγκεκριμένων συνοριακών συνθηκών. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, εκμεταλλευόμενη την ισχύ των ηλεκτρονικών υπολογιστών, επιλύει προβλήματα από την αντοχή των υλικών, την μεταφορά θερμότητας και την μηχανική ρευστών, των οποίων η λύση δεν μπορεί να προσεγγιστεί σε αναλυτική μορφή.

Στην πτυχιακή αυτή εργασία παρουσιάστηκαν μέθοδοι υπολογισμού, όπως για παράδειγμα, εύρεση τάσεων λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς, η οποία εύρεση είναι εξαιρετικά δύσκολη να υπολογιστεί. Είναι μια μελέτη με ταυτόχρονη επίδραση διαφόρων παραγόντων, καταπόνηση λόγω κατανομή θερμότητας. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα μελέτη καταπόνησης, λόγω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Αυτό καθιστά αυτομάτως το λογισμικό απαραίτητο στην λύση πολύπλοκων προβλημάτων. Η ραγδαία μείωση του κόστους ηλεκτρονικών υπολογιστών και η αύξηση της υπολογιστικής τους ισχύς, συντέλεσαν, έτσι ώστε η μέθοδος των FEA να έχει αναπτυχθεί τόσο πολύ, ώστε να μπορούν να λυθούν τέτοια πολύπλοκα προβλήματα.

Επίσης, η θερμική ανάλυση σε λογισμικό όπως το Pro Engineer, μειώνει τον χρόνο υπολογισμού (είτε αυτό είναι υπολογισμός θερμοκρασίας, υπολογισμός χρόνου, υπολογισμός θερμικής ροής, υπολογισμός τάσεων λόγω κατανομή θερμότητας κτλ), αλλά και την πιθανότητα λάθους υπολογισμού αν αυτός πρέπει να γίνει λύνοντας εξισώσεις με το χέρι. Η ανάλυση γίνεται πολύ πιο εύκολη, αφού το μόνο που χρειάζεται είναι η εισαγωγή των δεδομένων (γεωμετρία, επιλογή υλικού, συνοριακές συνθήκες) και έπειτα η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Σίγουρα η ακρίβεια δεν έχει φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα και αυτό αποδείχθηκε στην ενότητα 4.3, όπου σε ακμή που δεν έπρεπε να ανταλλάσει θερμότητα με το περιβάλλον αυτή αντάλλαζε έστω και ελάχιστα. Όμως, όπως φάνηκε στο κεφάλαιο 5, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τουλάχιστον σε απλές γεωμετρίες είναι εντυπωσιακή. Σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες, η σύγκριση αποτελεσμάτων είναι έτσι και αλλιώς πολύ δύσκολη και σε πολλές περιπτώσεις ανέφικτη. Ένας μηχανικός θα χρησιμοποιήσει αντίστοιχα λογισμικά, σε προβλήματα υπολογισμού θερμοκρασίας, τάσεων κτλ αλλά θα παραμένει ένας προσεγγιστικός υπολογισμός. Ακόμα σε τέτοια λογισμικά, μεγάλο ρόλο παίζει η πυκνότητα του πλέγματος, ειδικά σε σημεία με πολύπλοκη γεωμετρία.

Οι κατασκευάστριες εταιρίες FEA λογισμικών, υποστηρίζουν ότι δε χρειάζονται ειδικές γνώσεις για την χρήση τους. Στην πράξη όμως αποδεικνύεται, ότι για το χειρισμό των προγραμμάτων μέχρι και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, πρέπει να υπάρχει κάποιο θεωρητικό υπόβαθρο. Το λάθος είναι πολύ εύκολο να γίνει, από την χρησιμοποίηση λάθους μονάδας στην εισαγωγή δεδομένων μέχρι και την εξαγωγή λάθους αποτελέσματος.

Το πιο διαδομένο λογισμικό για θερμική ανάλυση είναι το ANSYS. Το Pro Engineer σε σχέση με το Solidworks και το ANSYS, υπερτερεί σε άλλες λειτουργίες όπως συνδυασμός CAM με CAD, αλλά στο πεδίο της θερμικής ανάλυσης, υστερεί σε κάποιες δυνατότητες, όπως εύρεση θερμοκρασιών λόγω τριβής ή υπολογισμός ακτινοβολίας. Στο κεφάλαιο 5 και συγκεκριμένα στο παράδειγμα 5.1, όπου χρησιμοποιήθηκαν το Pro Engineer wildfire 5.0 και το Solidworks 2010 τα αποτελέσματα ήταν ίδια. Η διαδικασία για την θερμική ανάλυση ήταν πιο απλή στο Solidworks από το Pro Engineer. Συγκεκριμένα, τα βήματα που πρέπει να γίνουν είναι αριθμημένα και στην σειρά. Για ένα νέο χρήστη θα ήταν πιο εύκολο να χρησιμοποιηθεί το Solidworks από το Pro Engineer. Από την άλλη, για το ίδιο πρόβλημα και την ίδια γεωμετρία, χρησιμοποιώντας τον ίδιο ηλεκτρονικό υπολογιστή, το χρονικό διάστημα επεξεργασίας των δεδομένων από το λογισμικό και ο χρόνος εμφάνισης των αποτελεσμάτων ήταν πιο μικρός στο Pro Engineer. Σε απλές γεωμετρίες, όπου η χρονική διάρκεια είναι κάποια δευτερόλεπτα, αυτό δεν παίζει τόσο πολύ μεγάλη σημασία, αλλά σε πολύπλοκες γεωμετρίες όπου η ανάλυση μπορεί να διαρκέσει ώρες, σαφώς και έχει σημασία στην απόφαση του χρήστη για την επιλογή του λογισμικού.

Όλα τα παραπάνω, δηλ. μείωση χρόνου, ανάλυση μοντέλων πολύπλοκων γεωμετριών, μελέτη πολύπλοκων προβλημάτων, συντελούν στην αύξηση της δημιουργικότητας και των καινοτομιών, στη παραγωγή προϊόντων ανώτερης ποιότητας και στο μειωμένο κόστος παραγωγής ενός προϊόντος.

## Βιβλιογραφία:

1. *Μεταφορά Θερμότητας, Δεύτερη Έκδοση, Σειρά Schaum, Donald Pitts, Leighton Sissom, ISBN 960-8050-39-5.*
2. *Μεταφορά Θερμότητας, Μια πρακτική προσέγγιση, Yunus A. Cengel ISBN 960-418-063-0.*
3. *Θερμοδυναμική Για Μηχανικούς, Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, 3<sup>η</sup> Έκδοση Α Τόμος, ISBN 960-7219-65-1.*
4. *Mechanica Tutorial (Structure / Thermal) Integrated Mode, Roger Toogood, Ph.D. Alberta ISBN: 978-1-58503-536-6.*
5. *Φυσική Τόμος Β, Hugh D. Young ISBN 960-02-1088-8*  
Πηγές από το διαδίκτυο:
6. *Bright Hub Engineering, <http://www.brighthubengineering.com/thermodynamics/>*
7. *PTC University Learning Exchange, <http://learningexchange.ptc.com/>*
8. *PTC, <http://www.ptc.com/>*
9. *CAD Lab, Technical University of Crete <http://www.cadlab.tuc.gr/cad.htm>*
10. *University of Cambridge Department of Engineering*  
<http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/cad/proewild3/usascii/proe>
11. *Wikipedia <http://el.wikipedia.org>*
12. *Shark Net [https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent13/help/ans\\_vm/Hlp\\_V\\_VMTOC.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent13/help/ans_vm/Hlp_V_VMTOC.html)*
13. *Solidworks Help*  
[http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c\\_Thermal\\_Analysis.htm](http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c_Thermal_Analysis.htm)