



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Πρόβλεψη της απόδοσης των Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM)  
στα Ελληνικά κτίρια με την μέθοδο των πεπερασμένων  
διαφορών»**

**« Prediction of Phase Change Materials (PCM) efficiency in Greek  
buildings by use of the Finite Difference Method»**

**Ασπρομάλλης Κυριάκος**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Κίμων Α. Αντωνόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**ΑΘΗΝΑ 2014**

**©ΕΜΠ**



## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή ολοκληρώθηκε με την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους αισθάνομαι την ανάγκη αλλά και την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά για τη στήριξη και τη συμβολή τους στην όλη μου προσπάθεια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος, τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα, την εποπτεία της εργασίας, την καθοδήγηση, την ενθάρρυνση και το χρόνο που μου προσέφερε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της. Οι ουσιαστικές του υποδείξεις, οι πολύτιμες συμβουλές, αλλά και οι προτροπές του υπήρξαν για μένα πηγή έμπνευσης και εξεύρεσης νέων γνωστικών πεδίων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, Νίκο, Αναστασία, Ιωάννα και Διονύση, τους παππούδες και γιαγιάδες μου Κυριάκο, Γιάννη, Διονυσία και Νίκη για την απεριόριστη αγάπη και υποστήριξη που μου δίνουν να συνεχίζω να εκπληρώνω τους στόχους μου όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και τη θετική επιρροή τους στη ζωή μου.



## Περίληψη

Η ανάγκη για αειφόρο ανάπτυξη και χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισής της, έχει γίνει επιτακτική όσο ποτέ άλλοτε. Η ραγδαία αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης προκαλεί τη σταδιακή εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και μόλυνση του περιβάλλοντος. Πολλοί ερευνητές έχουν οδηγηθεί στην αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών που θα καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες με ανανεώσιμους πόρους και χωρίς περιβαλλοντικές συνέπειες.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει μία τέτοια εναλλακτική τεχνολογία η οποία είναι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση των Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM). Τα PCM είναι υλικά, τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν ποσά θερμότητας.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση στις ανάγκες που οδήγησαν στην χρήση νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας, στα παθητικά και ενεργητικά ηλιακά συστήματα, στα υλικά αλλαγής φάσης, στις κατηγορίες και στις ιδιότητες τους καθώς και στα προβλήματα που συχνά εμφανίζονται. Στη συνέχεια αναλύονται οι εφαρμογές που έχουν γίνει σε κτίρια και παρουσιάζονται ανάλογα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι σήμερα.

Στο δεύτερο μέρος, αρχικά γίνεται μια θεωρητική προσομοίωση της ηλιακής φόρτισης εσωτερικής τοιχοποιίας απέναντι από υαλοπίνακα, όταν ενσωματώνεται σε αυτόν στρώμα υλικού αλλαγής φάσης, με σκοπό την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης και ύστερα ακολουθεί παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμική συμπεριφορά του τοίχου, όταν είναι στρωμένος σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Τέλος εκτελείται βελτιστοποίηση με στόχο την πλήρη αξιοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης.



## **Abstract**

The need for sustainable development and use of renewable energy sources and alternative energy management systems has become imperative as ever. Tremendous increase of energy consumption is causing gradual depletion of conventional fuels and also environmental pollution. Many researchers have been forced to seek alternative technologies with renewable resources that meet the energy needs without environmental consequences.

This dissertation aims to present such an alternative technology. That is thermal energy storage using Phase Change Materials (PCM). PCM are materials that can storage and release amounts of heat.

The dissertation consists of two parts. The first part is a theoretical approach to the needs that led to the use of new energy-saving technologies, to passive and active solar systems, to phase change materials, to their categories and properties, but also the problems that often occur. Furthermore, applications that have been made in buildings are being analyzed and several experiments carried so far are being presented.

In the second part, initially, there is a theoretical simulation of solar charging of the inner wall, opposite of a pane, when a layer of a PCM is being incorporated into it, in order to achieve thermal comfort conditions. Afterwards, there is a parametric study on the thermal performance of the wall when it is paved in different directions. Finally optimization is being performed in order to fully exploit the PCM.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Γενικά</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3 Αξιολόγηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ)</b> .....	<b>16</b>
<b>1.4 Ηλιακή ενέργεια</b> .....	<b>17</b>
<b>1.5 Αξιοποίηση της Ηλιακής Ενέργειας</b> .....	<b>19</b>
<b>1.5.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα</b> .....	<b>20</b>
<b>1.5.1.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης</b> .....	<b>22</b>
<b>1.5.1.1.1 Συστήματα με Άμεσο ή Απευθείας Ηλιακό Κέρδος</b> .....	<b>23</b>
<b>1.5.1.1.2 Συστήματα Έμμεσου Ηλιακού Κέρδους</b> .....	<b>28</b>
<b>1.5.1.1.3 Συστήματα Απομονωμένου Ηλιακού Κέρδους</b> .....	<b>34</b>
<b>1.5.1.2 Παθητικά Συστήματα και Τεχνικές Φυσικού Δροσισμού</b> .....	<b>37</b>
<b>1.5.2 Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα</b> .....	<b>38</b>
<b>1.5.3 Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα</b> .....	<b>40</b>
<b>1.6 Αποθήκευση ενέργειας</b> .....	<b>42</b>
<b>1.6.1 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας</b> .....	<b>43</b>
<b>1.6.1.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας</b> .....	<b>43</b>
<b>1.6.1.2 Αποθήκευση ως λανθάνουσα θερμότητα</b> .....	<b>45</b>
<b>Βιβλιογραφία 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>48</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ</b> .....	<b>50</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>50</b>
<b>2.2 Ταξινόμηση των PCM</b> .....	<b>51</b>
<b>2.2.1 Οργανικά Υλικά Αλλαγής Φάσης:</b> .....	<b>52</b>
<b>2.2.1.1 Παραφίνες</b> .....	<b>53</b>
<b>2.2.1.2 Μη-παραφίνες</b> .....	<b>55</b>
<b>2.2.2 Ανόργανα Υλικά Αλλαγής Φάσης</b> .....	<b>59</b>
<b>2.2.2.1 Ένυδρα Άλατα</b> .....	<b>59</b>
<b>2.2.2.2 Μεταλλικά PCM</b> .....	<b>63</b>
<b>2.2.3 Εύτηκτα μείγματα</b> .....	<b>64</b>
<b>2.3 Σύγκριση των διαφορετικών κατηγοριών PCM</b> .....	<b>66</b>
<b>2.4 Κριτήρια επιλογής των Υλικών Αλλαγής Φάσης</b> .....	<b>67</b>
<b>2.5 Προβλήματα των Υλικών Αλλαγής Φάσης</b> .....	<b>68</b>
<b>2.5.1 Το φαινόμενο του supercooling</b> .....	<b>68</b>
<b>2.5.2 Το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων</b> .....	<b>70</b>
<b>2.5.3 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση</b> .....	<b>71</b>
<b>2.6 Ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στα δομικά υλικά</b> .....	<b>72</b>
<b>2.6.1 Άμεση Ενσωμάτωση</b> .....	<b>72</b>
<b>2.6.2 Εμβάπτιση</b> .....	<b>73</b>



<b>2.6.3 Συσκευασία PCM</b> .....	<b>73</b>
<b>2.6.3.1 Μακροενσωμάτωση</b> .....	<b>74</b>
<b>2.6.3.2 Μικροενσωμάτωση</b> .....	<b>75</b>
<b>2.6.3.3 Νανοενσωμάτωση (nanoencapsulation)</b> .....	<b>79</b>
<b>2.6.3.4 Μαζική αποθήκευση (Bulk systems)</b> .....	<b>79</b>
<b>2.6.4 PCM σταθεροποιημένου σχήματος</b> .....	<b>80</b>
<b>Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>82</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ PCM</b> .....	<b>84</b>
<b>3.1 Ιστορική αναδρομή</b> .....	<b>84</b>
<b>3.1.1 Πρώτες προσπάθειες</b> .....	<b>84</b>
<b>3.1.1.1 Dr. Maria Telkes</b> .....	<b>84</b>
<b>3.1.1.2 Dr. Lawrence Gardshire</b> .....	<b>86</b>
<b>3.1.1.3 Dr J. W. Hodgins και Dr T. W. Hoffman</b> .....	<b>86</b>
<b>3.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα</b> .....	<b>87</b>
<b>3.1.2.1 ΗΠΑ</b> .....	<b>88</b>
<b>3.1.2.2 Ευρώπη</b> .....	<b>90</b>
<b>3.1.2.3 Άπω Ανατολή (Ιαπωνία)</b> .....	<b>91</b>
<b>3.2 Εφαρμογές PCM στα κτίρια</b> .....	<b>92</b>
<b>3.2.1 Γυψοσανίδες με PCM</b> .....	<b>93</b>
<b>3.2.2 Βελτιωμένα στοιχεία με υλικά αλλαγής φάσης σταθεροποιημένου σχήματος –SSPCM</b> .....	<b>98</b>
<b>3.2.3 Ενσωμάτωση PCM σε Τούβλα</b> .....	<b>100</b>
<b>3.2.4 Μπλόκ σκυροδέματος και κονιάματα εμποτισμένα με PCM</b> .....	<b>103</b>
<b>3.2.5 Τοίχος Trombe με PCM</b> .....	<b>106</b>
<b>3.2.6 Θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM</b> .....	<b>110</b>
<b>3.2.7 Παραθυρόφυλλα, εσωτερικές περσίδες με PCM και ημιδιαφανείς τοίχοι με PCM</b> .....	<b>112</b>
<b>3.2.8 Σύστημα θέρμανσης και ψύξης χώρου τοποθετημένο στην οροφή</b> .....	<b>116</b>
<b>3.2.9 Υποδαπέδια ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης με PCM</b> .....	<b>119</b>
<b>3.2.10 Ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας</b> .....	<b>119</b>
<b>Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>121</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΩΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ</b> .....	<b>125</b>
<b>4.1 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων PCM</b> .....	<b>125</b>
<b>4.1.2 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)</b> .....	<b>128</b>
<b>4.1.3 Μέθοδος T-history (Temperature-history method)</b> .....	<b>133</b>
<b>Βιβλιογραφία 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>138</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ</b> .....	<b>139</b>



<b>5.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>139</b>
<b>5.2 Γενική εξίσωση μεταφοράς</b> .....	<b>139</b>
<b>5.3 Γενική εξίσωση μεταφοράς ενέργειας</b> .....	<b>140</b>
<b>5.4 Διεργασία αλλαγής φάσης του υλικού</b> .....	<b>141</b>
<b>5.5 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης των υλικών στις κτιριακές εφαρμογές</b> .....	<b>141</b>
<b>5.5.1 Μοντέλο της Ενθαλπίας</b> .....	<b>142</b>
<b>5.5.2 Μοντέλο Ενεργού Θερμοχωρητικότητας</b> .....	<b>142</b>
<b>5.6 Αναλυτικές εκφράσεις ενεργούς θερμοχωρητικότητας <math>c_p</math>, <math>eff(T)</math> για διαφορά PCM</b> .....	<b>143</b>
<b>5.7 Εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών</b> .....	<b>146</b>
<b>5.7.1 Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων</b> .....	<b>146</b>
<b>5.7.1.1 Μέθοδος όγκου αναφοράς</b> .....	<b>147</b>
<b>5.8 Υπολογιστικό πλέγμα</b> .....	<b>150</b>
<b>5.9 Οριακές συνθήκες</b> .....	<b>150</b>
<b>5.10 Επίλυση προκύπτοντος συστήματος</b> .....	<b>151</b>
<b>Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>153</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΛΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ</b> .....	<b>154</b>
<b>6.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>154</b>
<b>6.2 Υποθέσεις εργασίας</b> .....	<b>155</b>
<b>6.2.1 Άμεση διατύπωση</b> .....	<b>157</b>
<b>6.2.2 Έμμεση διατύπωση</b> .....	<b>158</b>
<b>6.2.3 Διατύπωση Crank-Nicolson</b> .....	<b>159</b>
<b>6.2.4 Συγκριτικά διατυπώσεων-άλλες διατυπώσεις</b> .....	<b>160</b>
<b>Βιβλιογραφία 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b> .....	<b>161</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ PCM ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ</b> .....	<b>163</b>
<b>7.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>163</b>
<b>7.2 Δυναμική ενός κτιρίου</b> .....	<b>164</b>
<b>7.2.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργειακού ισοζυγίου σε ένα δωμάτιο</b> .....	<b>164</b>
<b>7.2.2 Μαθηματικό μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων που ακολουθήθηκε</b> .....	<b>165</b>
<b>7.2.3 Ενσωμάτωση των PCM σε τοίχους</b> .....	<b>172</b>
<b>7.2.4 Διακριτοποίηση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας</b> .....	<b>172</b>
<b>7.2.4.1 Διακριτοποίηση του χώρου</b> .....	<b>172</b>
<b>7.2.4.2 Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων και οριακών συνθηκών</b> .....	<b>173</b>
<b>7.3 Προσομοίωση της δυναμικής ενός τοίχου</b> .....	<b>176</b>
<b>7.3.1 Μελέτες προσομοίωσης</b> .....	<b>176</b>
<b>7.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης</b> .....	<b>179</b>



<b><u>7.4.1 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους εσωτερικούς τοίχους .....</u></b>	<b><u>179</u></b>
<b><u>7.4.2 PCM σε εσωτερικούς τοίχους σπιτιών στην Αθήνα .....</u></b>	<b><u>186</u></b>
<b><u>7.4.2.1 Εσωτερικός τοίχος με PCM προσανατολισμένος στον νότο .....</u></b>	<b><u>186</u></b>
<b><u>7.4.2.1.1 Σύγκριση με πρότυπο, συνήθη τοίχο .....</u></b>	<b><u>193</u></b>
<b><u>7.4.2.2 Εσωτερικός τοίχος με προσανατολισμό στην ανατολή .....</u></b>	<b><u>199</u></b>
<b><u>7.4.2.3 Εσωτερικός τοίχος με προσανατολισμό στην Ανατολή-Δύση.....</u></b>	<b><u>201</u></b>
<b><u>7.4.2.4 Εσωτερικός τοίχος με προσανατολισμό στη Δύση .....</u></b>	<b><u>214</u></b>
<b><u>7.4.3 Βελτιστοποίηση με στόχο την πλήρη αξιοποίηση του PCM.....</u></b>	<b><u>217</u></b>
<b><u>Βιβλιογραφία 7<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....</u></b>	<b><u>225</u></b>





## **ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ**

### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Η ενέργεια αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αγαθά της σύγχρονης κοινωνίας καθώς συνδέεται με τη συνεχιζόμενη οικονομική ανάπτυξη και την άνοδο της κοινωνικής ευημερίας. Οι βιομηχανικές κοινωνίες έχουν γίνει όλο και περισσότερο εξαρτημένες από ορυκτά καύσιμα για μυριάδες χρήσεις. Οι σύγχρονες ανέσεις, η μηχανοποιημένη γεωργία και η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού εδράζονται στην εκμετάλλευση άφθονης και φθηνής ενέργειας. Όμως η ανεξέλεγκτα πλέον ανοδική τιμή των ορυκτών καυσίμων, η μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων και η αυξανόμενη ανασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού καθώς και η αύξηση των περιβαλλοντικών ανησυχιών απειλούν να οδηγήσουν την ανθρωπότητα σε μια πρωτοφανή ενεργειακή καταιγίδα.

Λόγω της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, της έντασης του ανταγωνισμού και της απαίτησης του εκσυγχρονισμού στην οικονομία, η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας εκτιμάται ότι θα υπερδιπλασιαστεί κατά την διάρκεια του πρώτου μισού του εικοστού πρώτου αιώνα και θα υπερτριπλασιαστεί μέχρι το τέλος του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της τιμής των ορυκτών καυσίμων. Ο πληθυσμός της γης έχει φτάσει πια τα 7 δισεκατομμύρια και εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια έως το 2050. Επίσης περίπου το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε αγροτικές περιοχές χωρίς πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στοιχειώδης βελτίωση των υφιστάμενων δικτύων ενέργειας θα είναι ανεπαρκής για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης. Λόγω της συρρίκνωσης των συμβατικών καυσίμων και των διαρκώς αυξανόμενων ανησυχιών για τις επιπτώσεις της καύσης τους στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή, οι πηγές ορυκτών καυσίμων δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες των κοινωνιών όπως στο παρελθόν. Οι μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες μπορούν να καλυφθούν μόνο με την εισαγωγή όλο και μεγαλύτερου ποσοστού εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Μια άλλη διάσταση του προβλήματος αποτελεί η εξαντλησιμότητα των ορυκτών καυσίμων. Τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων, δηλαδή του γαιάνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου αλλά και των πυρηνικών καυσίμων, δεν είναι άπειρα ή ανανεώσιμα αλλά περιορισμένα, και δεν είναι ακριβώς γνωστό το πότε θα



εξαντληθούν. Αναμφίβολα λοιπόν θα υπάρξουν σημαντικές αλλαγές στις σύγχρονες υποδομές ενέργειας της κοινωνίας έως το τέλος του εικοστού πρώτου αιώνα.

Δυστυχώς η παραδοσιακή χρήση ενέργειας, από ορυκτά καύσιμα όπως ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, έχει σοβαρές και αυξανόμενες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αποτέλεσμα αυτής της χρήσης είναι οι τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), καθώς και άλλων ανεπιθύμητων συστατικών που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα και οι οποίες συνεισφέρουν στο λεγόμενο «φαινόμενο του θερμοκηπίου», που υπερθερμαίνει τον πλανήτη και προκαλεί τις παρατηρούμενες ήδη κλιματικές αλλαγές. Παρατηρείται επίσης ρύπανση του αέρα, αποψίλωση των δασών και μια συνολική παγκόσμια περιβαλλοντική υποβάθμιση. Οι παραπάνω επιπτώσεις από την χρήση της ενέργειας μπορούν να περιοριστούν με την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την λήψη μέτρων για εξοικονόμηση ενέργειας.

Η αύξηση του πληθυσμού της γης και η θεμιτή προσπάθεια των αναπτυσσόμενων χωρών για βελτίωση του βιοτικού τους επιπέδου θα οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας με συνέπεια τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Η συνειδητοποίηση των πιο πάνω από πλευράς των κρατών οδήγησε σε μια παγκόσμια προσπάθεια για μια βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη απαλλαγμένη από περιβαλλοντικές απειλές.

Η αειφόρος αυτή ανάπτυξη, δηλαδή η ανάπτυξη με την οποία να επιτυγχάνεται η ικανοποίηση των αναγκών της σημερινής γενιάς, χωρίς να διακυβεύεται η ικανοποίηση των αναγκών των μελλοντικών γενεών, είναι η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν σήμερα τα κράτη. Αυτό είναι δυνατό να γίνει πραγματικότητα αν στηριχτεί στην υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τις ανανεώσιμες πηγές, όπως ο ήλιος, ο αέρας και η βιομάζα, καθώς και στην ορθολογική χρήση της ενέργειας, όπως τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών μετατροπών, τη μείωση των απωλειών θερμότητας, την αντικατάσταση ενεργοβόρων διεργασιών και συσκευών κτλ. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν σπουδαίες προοπτικές χρήσης σε πολλές εφαρμογές, αποτελούν καθαρές πηγές ενέργειας, χωρίς εκπομπές ρύπων, και παράλληλα είναι δωρεάν, άφθονες και ανανεώσιμες.

Πολλά είναι τα τεχνικά προβλήματα όμως που θα πρέπει να λυθούν για να μπορέσουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να καλύψουν σημαντικό μέρος των αναγκών μας. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα είναι η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας, είτε όπως έχει είτε με την μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων ικανών να λειτουργήσουν με τέτοια χρονική καθυστέρηση, ώστε η παροχή ενέργειας να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή. Τέτοια συστήματα είναι τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, τα οποία παρέχουν έναν πρακτικό και φυσικό τρόπο χρονικής καθυστέρησης, επιτρέποντας τη χρήση της θερμότητας που αποθηκεύουν, όποτε αυτή χρειάζεται.[1]

## 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ, renewable energy sources) αποτελούν την παλαιότερη μορφή ενέργειας στον πλανήτη μας. Είναι οι μορφές ενέργειας οι οποίες δε θα εξαντληθούν στο απώτερο ορατό μέλλον της ανθρωπότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σταθερό και αξιόπιστο τρόπο και δε ρυπαίνουν το περιβάλλον. Ο Sorensen (2000) ορίζει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως « οι ενεργειακές ροές που αντικαθίστανται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται». Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια ή εναλλακτικές μορφές ενέργειας ή πρόσθετες, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Ο όρος «ήπιες» μορφές ενέργειας αναφέρεται στο γεγονός ότι οι μορφές αυτές έχουν σχετικά μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον ή μικρότερες από τις επιπτώσεις των συμβατικών πηγών ενέργειας. Η εκμετάλλευσή τους δεν απαιτεί κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση κάποιου καύσιμου υλικού, αλλά απλώς εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση εν αντιθέσει με τις μέχρι τώρα ορυκτές πηγές ενέργειας. Επίσης, ο ίδιος όρος αναφέρεται και στο γεγονός ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γενικά δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες και διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Ο όρος «εναλλακτικές» χρησιμοποιείται γιατί μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Επίσης τονίζει την διαφορά τους από τις μέχρι σήμερα ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας και υποδηλώνει κάτι το καινούριο, κάτι το διαφορετικό από τα ήδη καθιερωμένα δεδομένα.

Ο όρος «πρόσθετες» χρησιμοποιείται επειδή με το τωρινό επίπεδο τεχνολογίας μόνο συμπληρωματικά μπορούν να συνυπάρχουν με τις συμβατικές μορφές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση, η οποία άρχισε το 1973 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων τα τελευταία χρόνια.

#### **Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι ακόλουθες:**

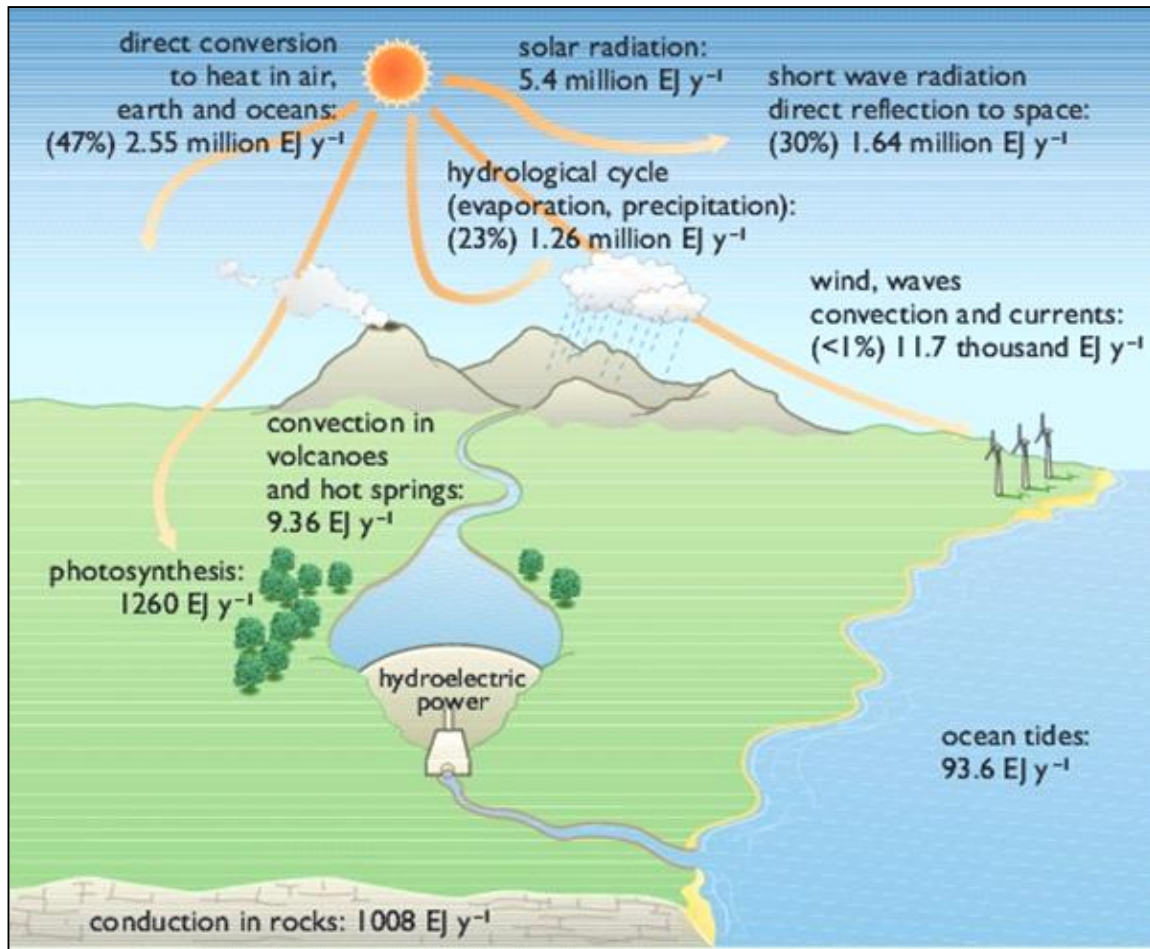
- **Ηλιακή Ενέργεια:** Είναι η ενέργεια που παράγεται από τη χρήση των τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται την θερμότητα και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ήλιου.
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια:** Είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την πτώση του νερού ποταμών ή λιμνών (φυσικών και τεχνητών) με τη βοήθεια υδροστροβίλων. Αξιοποιείται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς.
- **Αιολική Ενέργεια:** Είναι η κινητική ενέργεια που παράγεται από την δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ανεμογεννητριών. Τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια αποτελεί μία «ώριμη» ενεργειακή πηγή, με χαμηλό σχετικά κόστος, η οποία μπορεί να παράσχει σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Βιομάζα:** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά.

- **Γεωθερμική ενέργεια:** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες, στις πηγές ζεστού νερού και στις ατμίδες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- **Ενέργεια από τη θάλασσα:** Χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:
  - **Παλιρροϊκή ενέργεια:** Εκμεταλλεύεται την βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό.
  - **Ενέργεια από τα κύματα:** Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
  - **Ενέργεια από τους ωκεανούς:** Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. (Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.)

Όλες οι ΑΠΕ, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την ενέργεια από τις παλίρροιες που σχετίζεται με τη βαρύτητα, αποτελούν έμμεση ηλιακή ενέργεια, μιας και ο κύκλος του νερού, η δύναμη του ανέμου και η ανάπτυξη των φυτών οφείλονται στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στη γη.

Το σχήμα 1.1 παρουσιάζει τη σύνοψη των ποσοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης και τους τρόπους με τους οποίους αυτή η ενέργεια μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας στην ατμόσφαιρα, τη γη και τη θάλασσα. Φαίνεται ότι κύρια και απόλυτη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Η Γη απορροφά ετησίως από τον ήλιο 5,4 εκατομμύρια exajoule (EJ) ηλιακής ενέργειας. Περίπου το 30% των 5,4 εκατομμυρίων EJ που φθάνουν στη Γη ετησίως ανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο 70% είναι διαθέσιμο για χρήση στην γη και ανέρχεται στα 3,8 εκατ. EJ περίπου.



**Σχήμα 1.1:** Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. [4]

Η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα το 2009 ανήλθε στα 462 EJ περίπου. (Εάν συμπεριλάβουμε τα βιοκαύσιμα και την υδροηλεκτρική ενέργεια, η συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ήταν 502 EJ).

Αυτό σημαίνει ότι η ηλιακή ακτινοβολία, που δέχεται ο πλανήτης ετησίως, είναι 8200 φορές μεγαλύτερη από την ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στον κόσμο. Στο σχήμα 1.1 φαίνονται επίσης οι δύο μη-ηλιακές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: η παλιρροϊκή ενέργεια και η γεωθερμία (ηφαίστεια, θερμές πηγές και αγωγιμότητα σε βράχους).

Πρακτικά, συνεπώς, το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αντληθεί από την φυσική προσφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση υπαρχουσών τεχνολογιών, είναι πολλαπλάσιο της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Το

πρόβλημα είναι η αξιοποίησή τους.[2,3,4,5,6,7]

### 1.3 Αξιολόγηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ)

**Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ είναι τα εξής :**

- Το βασικότερο πλεονέκτημα των ΑΠΕ είναι ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον προσφέροντας περιβαλλοντικά οφέλη. Το κυριότερο περιβαλλοντικό όφελος από την αξιοποίηση των ΑΠΕ αποτελεί ο περιορισμός των εκπομπών στην ατμόσφαιρα από την υποκατάσταση των συμβατικών, και επομένως μείωση των επιπτώσεων που προκαλούν την κλιματική αλλαγή. Οι ΑΠΕ έχουν ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Οι ΑΠΕ είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας διότι βασίζονται σε φυσικές διεργασίες, όπως ο άνεμος, η ακτινοβολία του ήλιου, η ροή των ποταμών και η παλίρροια, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα αλλά και την πυρηνική ενέργεια (που βασίζεται στο ουράνιο).
- Είναι εγχώριες και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού μιας χώρας, με συνέπεια τη σταθεροποίηση των ενεργειακών τιμών. Οι ΑΠΕ δεν επηρεάζονται από γεωπολιτικά επεισόδια σαν αυτό του «εμπάργκο» πετρελαίου το 1973.
- Οι μονάδες παραγωγής είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και συμβάλλουν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα περιοχών χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή, κ.α.).
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και στη συντήρηση και έχει μεγάλο



χρόνο ζωής. Το βασικό τους κόστος είναι αυτό της κατασκευής και της εγκατάστασης του εξοπλισμού, ενώ το κόστος λειτουργίας είναι σχετικά μικρό (βιοκαύσιμα, βιομάζα) ή μηδενικό (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες) και δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).

#### **Τα βασικά Μειονεκτήματα της Χρήσης ΑΠΕ είναι τα πιο κάτω.**

- Ο συντελεστής απόδοσης των ΑΠΕ είναι αρκετά μικρός σε σχέση με τους υπόλοιπους τρόπους παραγωγής, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλο αρχικό κεφάλαιο και μεγάλη επιφάνεια γης.
- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν εξασφαλίζουν σταθερή ροή ενέργειας. Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους καθώς επίσης και από το γεωγραφικό πλάτος, το κλίμα και τις καιρικές συνθήκες της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί ή έχουν σε σημαντικό βαθμό μειωθεί.[2,3,6,7]

## **1.4 Ηλιακή ενέργεια**

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα ο ήλιος αποτελεί την απόλυτη πηγή ενέργειας για τους περισσότερους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους. Η ηλιακή



ενέργεια είναι η ενέργεια που μεταφέρεται στη γη από τον ήλιο, χωρίς την οποία δεν θα μπορούσε να υπάρχει ζωή στην γη. Υπάρχει άμεση ηλιακή ενέργεια και έμμεση, με τη μορφή της βιομάζας, των ανέμων, της θερμότητας των ωκεανών κτλ.

Ο Ήλιος είναι απλανής αστέρας μέσου μεγέθους, που λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών των στοιχείων που τον συνθέτουν, μεταξύ των οποίων και το υδρογόνο, τα μόρια αλλά και τα άτομά τους βρίσκονται σε μια κατάσταση " νέφους " θετικών και αρνητικών φορτίων ή κατάσταση πλάσματος όπως ονομάστηκε. Σ' αυτές τις θερμοκρασίες, μερικών εκατομμυρίων °C, οι ταχύτατα κινούμενοι πυρήνες υδρογόνου (H) συσσωματώνονται, υπερνικώντας τις μεταξύ τους απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και δημιουργούν πυρήνες του στοιχείου ηλίου (He). Η ενέργεια του ήλιου, που ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις στο διάστημα, οφείλεται στις αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης που γίνονται στη μάζα του ήλιου, μετατρέποντας το υδρογόνο σε ήλιο. Ένα μέρος της μάζας του υδρογόνου μετατρέπεται σε ενέργεια. Με άλλα λόγια ο ήλιος είναι ένας τεράστιος πυρηνικός αντιδραστήρας.

Επειδή ο ήλιος είναι τόσο μακριά από τη Γη, μόνο ένα μικρό ποσοστό (περίπου δύο εκατομμυριοστά της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της Γης. Το ποσό της ενέργειας αυτής είναι ισοδύναμο με περίπου 8200 φορές τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες και συνεπώς αρκεί να αξιοποιηθεί μόνον το 0,012% αυτής, σύμφωνα με τα στοιχεία του 2009, ώστε να καλυφθεί το σύνολο των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας. Αν και αυτό συμβαίνει συνεχώς εδώ και 5 δισεκατομμύρια χρόνια περίπου, ο ήλιος διαθέτει τεράστιες ποσότητες υδρογόνου και δεν αναμένεται να υπάρξει μείωση της ενέργειας που ακτινοβολείται από αυτόν. Υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 δισεκατομμύρια χρόνια ζωής.

Τα κυριότερα προβλήματα για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αφορούν στη χρονική διακύμανση της ακτινοβολίας τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά την διάρκεια του έτους, γεγονός που κάνει απαραίτητη προϋπόθεση την ύπαρξη αξιόπιστων και αποδοτικών μεθόδων αποθήκευσης της ενέργειας αυτής, καθώς και στη μικρή ενεργειακή της πυκνότητα, που κάνει αναγκαία τη δέσμευση μεγάλων επιφανειών.

Η ηλιακή ακτινοβολία ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με την τοποθεσία στη Γης. Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της στην επιφάνεια κάθε τόπου εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Η

έρημος π.χ. δέχεται περίπου το διπλάσιο ποσό ηλιακής ενέργειας από άλλες περιοχές. Η Ελλάδα είναι σχετικά ευνοημένη σε σχέση με την ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να υποκαταστήσει ένα σημαντικό ποσοστό των αναγκών σε ενέργεια. Η διάρκεια ηλιοφάνειας στην Ελλάδα σύμφωνα με τις μετρήσεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, ανέρχονται στις 2700 ώρες ετησίως. Η Δυτική Μακεδονία και η Ήπειρος εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές και κυμαίνονται από 2200 ως 2300 ώρες, ενώ στη Ρόδο και τη νότια Κρήτη ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως. Συνεπώς η Ελλάδα αποτελεί μία από τις κατεξοχήν κατάλληλες περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για εφαρμογές εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια, αντίθετα με τις άλλες πηγές ενέργειας, μπορεί να συλλέγεται κατ' ευθείαν μέσα στο σπίτι μας και απόκειται σε εμάς να τη χρησιμοποιήσουμε κατά τον καλύτερο τρόπο. Με τη χρησιμοποίηση του ήλιου για τη θέρμανση και ψύξη του σπιτιού μας και την παρασκευή ζεστού νερού, μειώνουμε την εξάρτησή μας από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

Ο ήλιος είναι ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, διαθέσιμη για όλους. Ακτινοβολεί πάνω στους τοίχους και τις ταράτσες των σπιτιών μας και καλύπτει στο πολλαπλάσιο το ποσό της ενέργειας που απαιτείται το χειμώνα για τη θέρμανσή τους. Έτσι, απόκειται στους ιδιοκτήτες, τους μελετητές, τους αρχιτέκτονες και τους κατασκευαστές να κάνουν την ηλιακή θέρμανση και ψύξη πραγματικότητα για όλους.[4,8,9]

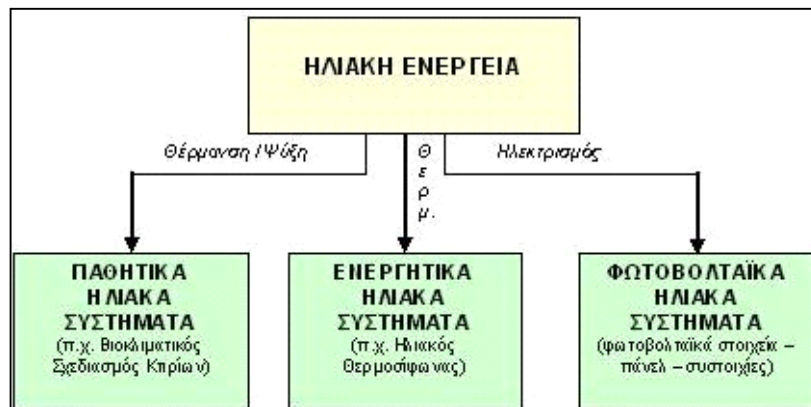
## 1.5 Αξιοποίηση της Ηλιακής Ενέργειας

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και η ανάπτυξη της ανάλογης τεχνολογίας, αποσκοπεί στην εύρεση των βέλτιστων μεθόδων για το σκοπό αυτό και στην ανάπτυξη συστημάτων που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική.

Οι κυριότερες τεχνολογίες για την αξιοποίηση της άμεσης ηλιακής ενέργειας είναι:

- **Παθητικά ηλιακά συστήματα:** Ουσιαστικά εννοούνται όλα τα κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα δομικά στοιχεία των οικοδομικών κατασκευών (κτιρίων) που υποβοηθούν την καλύτερη άμεση ή έμμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είτε για την θέρμανση των κτιρίων το χειμώνα είτε για το δροσισμό τους το καλοκαίρι.

- **Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή Ηλιοθερμικά συστήματα:** Τα συστήματα αυτά συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμότητα σε κάποια θερμομονωμένη δεξαμενή, όπου την αποθηκεύουν.
- **Φωτοβολταϊκά συστήματα:** Μετατρέπουν κατευθείαν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.



**Σχήμα 1.2:** Συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας [10]

Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. [10]

### 1.5.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Με τον όρο παθητικά ηλιακά συστήματα εννοούμε τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για να αξιοποιηθούν οι φυσικές πηγές, όπως ο ήλιος, ο άνεμος κ.α. για τη θέρμανση, την ψύξη και την παροχή φυσικού φωτισμού του κτιρίου, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια, χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα ή πρόσθετη παροχή ενέργειας. Ο τρόπος λειτουργίας τους, βασίζεται στην ανταλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον και περιλαμβάνει και την αποθήκευση και διανομή της ενέργειας μέσα στους χώρους του σπιτιού. Τα παθητικά συστήματα αποτελούν δομικά στοιχεία του κτιρίου.

Σκοπός των παθητικών ηλιακών συστημάτων είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα από τον κτιριακό τομέα, αναφορικά με τη θέρμανση, ψύξη και φωτισμό. Χρησιμοποιούν το ίδιο το κτίριο (υλικά,

σχεδιασμό) σε συνδυασμό με την ηλιακή ενέργεια ως ένα σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας. Τα παθητικά συστήματα εντάσσονται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Με λίγα λόγια τα παθητικά συστήματα είναι αυτά τα οποία επιτυγχάνουν τους βιοκλιματικούς στόχους χωρίς τη βοήθεια ενέργειας, δηλαδή αποκλειστικά και μόνο από την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει:

- Τη μέγιστη ηλιακή συλλογή
- Τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα
- Τις ελάχιστες θερμικές απώλειες

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε θερμότητα.
- Τη θερμική υστέρηση των υλικών -θερμοχωρητικότητα για την αποθήκευση της θερμότητας.
- Τις αρχές μετάδοσης της θερμότητας-την ιδιότητα της θερμότητας να μεταφέρεται από το χώρο συλλογής στην αποθήκη θερμότητας ή και στο χώρο που θα θερμανθεί.

Με τη συμβολή των παθητικών ηλιακών συστημάτων θεωρείται εφικτή η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας σε ποσοστό πλέον του 10% σε εθνικό επίπεδο, η οποία αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση πλέον των 35 εκατομμυρίων Τ.Ι.Π. (τόνων ισοδύναμου πετρελαίου) συμβατικών καυσίμων, υπό την προϋπόθεση ότι οι θερμικές ανάγκες στον οικιακό και στον τριτογενή τομέα θα παραμείνουν σταθερές.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης.
- Παθητικά συστήματα και τεχνικές φυσικού δροσισμού.
- Συστήματα και τεχνικές φυσικού φωτισμού

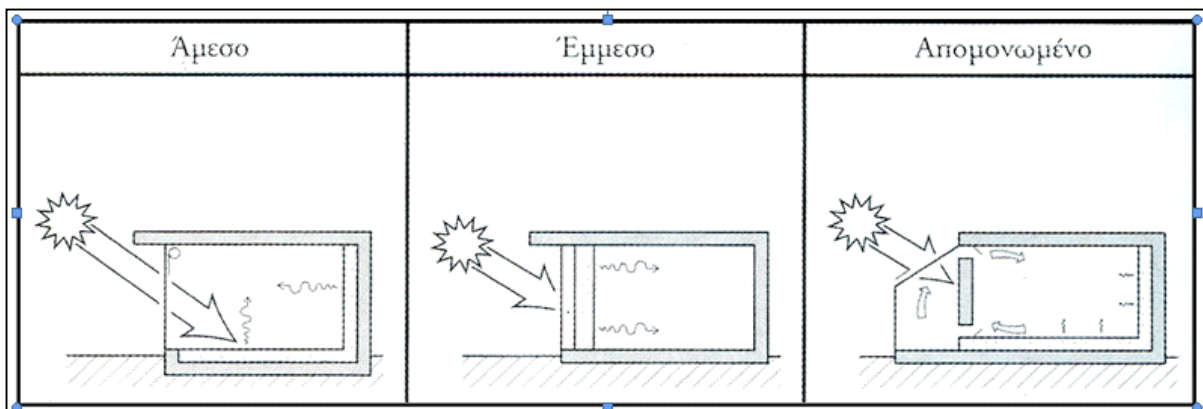
Στις επόμενες παραγράφους για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θα αναπτύξουμε μόνο τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης και τα παθητικά συστήματα και τεχνικές φυσικού δροσισμού.[11,12,13]

### 1.5.1.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης

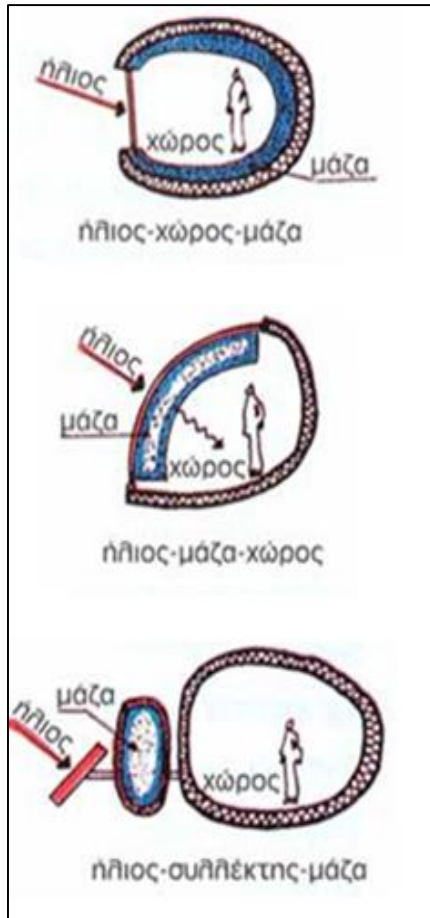
Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, αξιοποιώντας τους νόμους μεταφοράς θερμότητας, συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν κατάλληλα στο χώρο. Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και στον εγκλωβισμό της προκύπτουσας θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από το γυαλί.

Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης πρέπει να έχουν προσανατολισμό περίπου νότιο, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας του χειμώνα. Τα συστήματα αυτά πρέπει επίσης να συνδυάζονται με την κατάλληλη θερμομόνωση του κτιρίου για την ομαλότερη κατανομή της θερμότητας μέσα στον χώρο κατά την διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον το καλοκαίρι θα πρέπει να συνδυάζονται με τα κατάλληλα συστήματα ηλιοπροστασίας αλλά και με την δυνατότητα αερισμού.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούμε για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας σε εφαρμογές παθητικής ηλιακής θέρμανσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πού προσπίπτει και αποθηκεύεται το ηλιακό κέρδος στα κτίρια, και χωρίζονται σε άμεσου ή απευθείας, έμμεσου και απομονωμένου ηλιακού κέρδους.



**Σχήμα 1.3:** Διαχωρισμός παθητικών ηλιακών συστημάτων[14]



Στα συστήματα **Άμεσου ή Απευθείας Ηλιακού Κέρδους**, οι ηλιακές ακτίνες εισέρχονται απευθείας μέσα στο κτίριο, απορροφώνται από τη θερμική μάζα και αποδίδονται στο χώρο διαβίωσης.

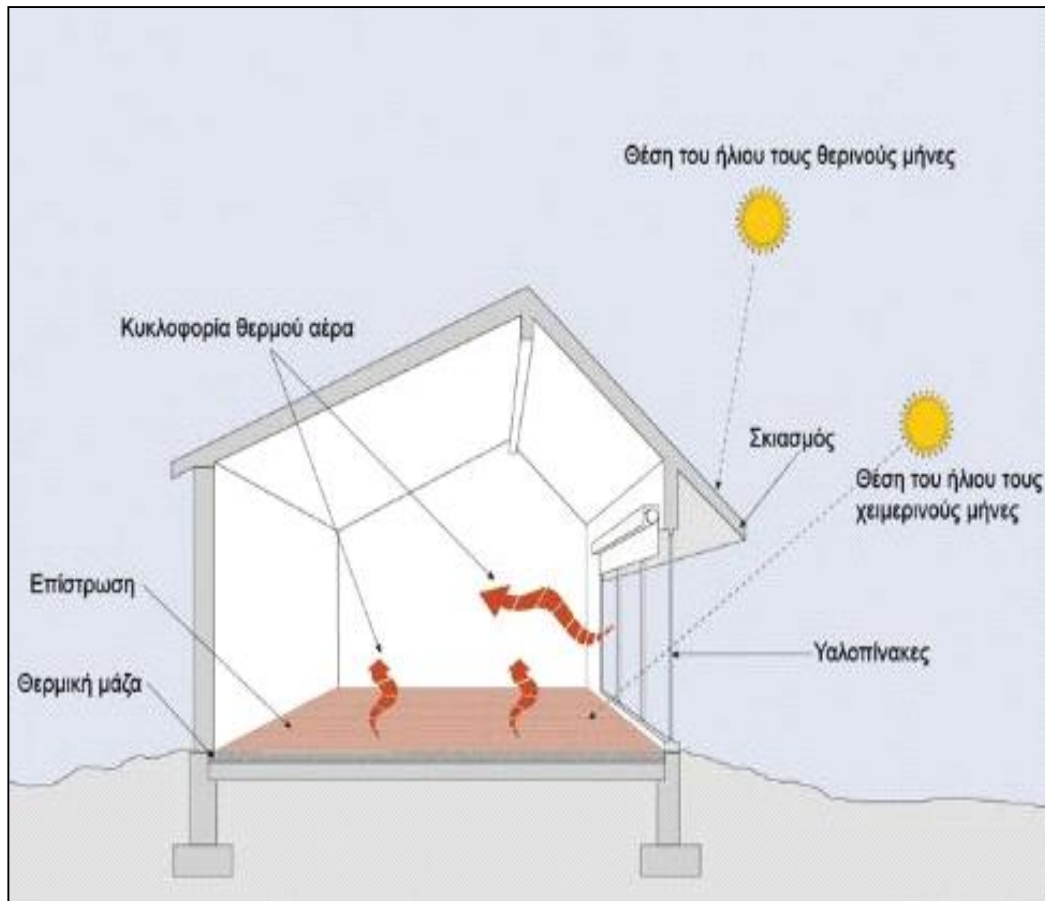
Στα συστήματα **Έμμεσου Ηλιακού Κέρδους**, οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν στην περίμετρο του κτιρίου που αποτελεί τη θερμική μάζα, και στη συνέχεια μεταδίδονται μέσα στο χώρο διαβίωσης (τοιχος μάζας Trombe κλπ).

Στα συστήματα **Απομονωμένου Ηλιακού Κέρδους**, οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν σε χώρο που είναι προσαρτημένος στο κτίριο και η θερμότητα μεταφέρεται μέσα στο χώρο διαβίωσης (θερμοσιφωνικό πανέλο κλπ).

#### 1.5.1.1.1 Συστήματα με Άμεσο ή Απευθείας Ηλιακό Κέρδος

Το σύστημα Άμεσου ή Απευθείας Ηλιακού Κέρδους, είναι το συνηθέστερο σύστημα ηλιακής θέρμανσης και μπορεί να αξιοποιήσει με άμεσο τρόπο την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση, μέσα από τα γυάλινα ανοίγματα του κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή, το κτίριο λειτουργεί ως συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας. Τα συστήματα άμεσου (ηλιακού) κέρδους προϋποθέτουν την ύπαρξη μεγάλης νότιας επιφάνειας με τζάμι και την ύπαρξη χώρου διαβίωσης πίσω από αυτό.

Η ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη) συλλέγεται από τα ανοίγματα του κτιρίου και στη συνέχεια μετατρέπεται σε θερμότητα και αποθηκεύεται ως θερμική ενέργεια στα δομικά στοιχεία του χώρου, ιδιαίτερα σε εκείνα που δέχονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμότητα που αποθηκεύεται, αποδίδεται με χρονική υστέρηση, αναλόγως των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων, καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας.



**Σχήμα 1.4:** Στοιχεία παθητικού ηλιακού σχεδιασμού όπως φαίνονται σε εφαρμογή άμεσου κέρδους [17]

Καθώς η θερμότητα απελευθερώνεται σταδιακά στο εσωτερικό του κτιρίου, αποφεύγεται η υπερθέρμανση κατά τις περιόδους με μεγάλη ηλιοφάνεια και η θέρμανση αποδίδεται στο χώρο όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, όπως τις απογευματινές και τις νυκτερινές ώρες. Είναι σημαντικό, ιδιαίτερα τα δομικά υλικά στο εσωτερικό του κτιρίου που δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία, να έχουν ικανή απορροφητικότητα και θερμική μάζα, ώστε αφενός να μεγιστοποιείται η απολαβή των ηλιακών κερδών και αφετέρου να αποθηκεύεται η θερμότητα.

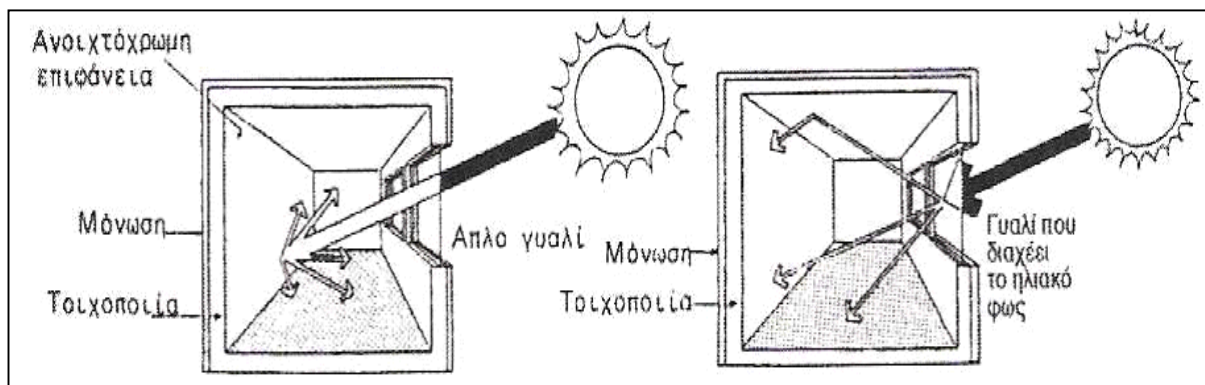
Ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, το σχεδιασμό του κελύφους του κτιρίου, τον προσανατολισμό, το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του διαφανούς υλικού καθώς και τη θέση, το μέγεθος και το υλικό της θερμικής αποθήκης, η εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση μπορεί να κυμαίνεται από 30% έως και 100%.



Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των κτιρίων Άμεσου Κέρδους είναι οι εξής:

### Ο προσανατολισμός ηλιακών υαλοπινάκων

Το παράθυρο όταν είναι σωστά τοποθετημένο, είναι ο καλύτερος συλλέκτης ηλιακής ενέργειας. Η ικανότητα που έχει το τζάμι να παγιδεύει την ηλιακή ακτινοβολία στηρίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή στην ιδιότητά του να αφήνει την ορατή ηλιακή ακτινοβολία να περνάει μέσα από αυτό και να εμποδίζει τη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία, η οποία παράγεται από τις ηλιακές ακτίνες όταν αυτές προσκρούουν σε μια εσωτερική επιφάνεια.



**Σχήμα 1.5:** Διανομή ηλιακής θερμικής ενέργειας από υαλοπίνακες[14]

Κατάλληλος προσανατολισμός των ανοιγμάτων μεγάλων διαστάσεων θεωρείται ο νότιος (μεσημβρινός) με κάποια απόκλιση προς την ανατολή ή τη δύση, κι αυτό διότι στόχος είναι η ύπαρξη ηλιακής πρόσπτωσης υπό μικρή γωνία στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα. Τα ανοίγματα αυτά δέχονται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα, και με το κατάλληλο οριζόντιο σκίαστρο, ελάχιστη το καλοκαίρι. Κατάλληλος προσανατολισμός των μικρότερων ανοιγμάτων θεωρείται ο βορινός, προκειμένου να αποφεύγεται η απώλεια ενέργειας. Τα ανατολικά και τα δυτικά ανοίγματα έχουν τη χειρότερη συμπεριφορά όλο το χρόνο, γι' αυτό συνιστώνται μόνο όπου είναι απαραίτητα για λόγους φωτισμού ή θέας.

Σε χώρους με δυσμενείς προσανατολισμούς και ελάχιστη πρόσβαση στο άμεσο ηλιακό φως, πρέπει να προβλεφθούν φεγγίτες ή κατάλληλα ανοίγματα στην οροφή, τα οποία θα εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία και συμβάλλουν στη διανομή της.

### **Το μέγεθος των ηλιακών υαλοπινάκων**

Γενικά, όσο μεγαλύτερα είναι τα ανοίγματα στο νότιο προσανατολισμό και ικανοποιητική σε μέγεθος η επιφάνεια αποθήκευσης, τόσο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση. Αυξάνοντας την επιφάνεια των ηλιακών υαλοπινάκων σε κτίρια Άμεσου Κέρδους αυξάνεται αναλογικά το ηλιακό κέρδος κατά τη διάρκεια της ημέρας, το οποίο είναι επιθυμητό σε περιόδους θέρμανσης, αρκεί η εσωτερική θερμοκρασία να μην υπερβεί τις συνθήκες θερμικής άνεσης το χειμώνα κατά τις ηλιόλουστες μέρες. Όμως αυξάνει επίσης και την απώλεια θερμότητας μέσω της περιοχής των υαλοπινάκων κατά τη διάρκεια των χειμωνιάτικων νυχτών και μάλιστα αναλογικά. Επίσης παρατηρείται και μια ανεπιθύμητη αύξηση της θερμότητας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υπερθέρμανσης και να οδηγήσει στην ανάγκη εγκατάστασης μηχανικού κλιματισμού.

Το μέγεθος των ανοιγμάτων που δημιουργούνται εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της γεωγραφικής ζώνης και είναι αντιστρόφως ανάλογο της εξωτερικής θερμοκρασίας τον χειμώνα.

### **Ο τύπος των ηλιακών υαλοπινάκων**

Ο τύπος του ηλιακού υαλοπίνακα επιλέγεται από σχετικά εγχειρίδια με βάση το κλάσμα της ηλιακής εξοικονόμησης (SSF), το κλίμα, το λόγο φορτίου του συλλέκτη (LCR) και τη διαθεσιμότητα της νυχτερινής μόνωσης. Ο τύπος του υαλοπίνακα σχετίζεται με τον τρόπο που διαχέεται το φως, αλλά και με τις θερμικές απώλειες. Υπάρχουν τα κοινά λευκά τζάμια και τα ειδικά τζάμια όπως τα αντανακλαστικά και τα απορροφητικά, καθώς επίσης και μονά ή διπλά τζάμια.

Επίσης οι κατακόρυφες γυάλινες επιφάνειες είναι προτιμότερες από τις κεκλιμένες γιατί το καλοκαίρι σκιάζονται ευκολότερα ενώ τον χειμώνα δέχονται εξίσου με τις κεκλιμένες σημαντική ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας.

### **Η ποιότητα και ο σχεδιασμός της διαθέσιμης θερμικής μάζας**

Το σύστημα του Άμεσου Ηλιακού Κέρδους συνδέεται με τον προσδιορισμό των επιφανειών θερμικής αποθήκευσης, γιατί η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται στη διάρκεια της ημέρας, αποδίδεται σταδιακά τη νύχτα, καθορίζοντας έτσι αφενός την



απόδοση του συστήματος και αφετέρου τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας, άρα και τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Με άλλα λόγια, αυτό που επιδιώκεται είναι, αφενός η επάρκεια θερμικής μάζας, έτσι ώστε η αποθήκευση θερμότητας να καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου περισσότερες ώρες, επομένως η εφεδρική θέρμανση να λειτουργεί όσο το δυνατόν λιγότερες ώρες, και αφετέρου η θερμοκρασία στο χώρο να μην παρουσιάζει μεγάλες αυξομειώσεις -πολύ υψηλή το μεσημέρι ή πολύ χαμηλή το βράδυ.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της θερμότητας είναι συνήθως τούβλα, κεραμικά, σκυρόδεμα, νερό ή άλλα υγρά, τα οποία χρησιμοποιούνται είτε μόνα τους είτε σε συνδυασμό. Η θερμοχωρητικότητα των υλικών αυτών είναι συνάρτηση της ειδικής θερμότητας, που είναι παρόμοια σχεδόν για το σύνολο των υλικών τοιχοποιίας και περίπου ίση με  $860 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ , και της μάζας που είναι ανάλογη με το συνολικό όγκο και την πυκνότητα του υλικού.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των στοιχείων θερμικής αποθήκευσης εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα απορροφάται, και αργότερα από το ρυθμό με τον οποίο δίνεται πίσω στον εσωτερικό αέρα, που με τη σειρά του εξαρτάται από την επιφάνεια των στοιχείων αποθήκευσης που εκτίθενται στον εσωτερικό χώρο καθώς και από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού.

Για την επιφάνεια των στοιχείων θερμικής αποθήκευσης έχει δειχθεί ότι θα πρέπει να είναι τουλάχιστον έξι φορές την επιφάνεια του ηλιακού υαλοπίνακα, ανεξάρτητα από το πάχος.

### **Θερμομόνωση του κτιρίου**

Το σύστημα του Άμεσου Ηλιακού Κέρδους εκτός από τα ανοίγματα κατάλληλου προσανατολισμού και διαστάσεων προαπαιτεί και ένα καλά μονωμένο κτίριο. Η θερμική μάζα βρίσκεται στην οροφή, στο δάπεδο και στους τοίχους, που πρέπει να είναι μονωμένοι για να προστατεύονται από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και για να αποφεύγεται η απώλεια της θερμότητας τη νύχτα. Το τζάμι θα πρέπει να είναι επίσης καλά μονωμένο για ελαχιστοποίηση των απωλειών. Τέλος, θα ήταν καλό να υπάρχει κινητή μόνωση με ρολά ή πατζούρια για τη νυχτερινή προστασία των ανοιγμάτων κατά την χειμερινή περίοδο.

## **Η διάταξη των επίπλων στα ηλιακά δωμάτια.**

Τα έπιπλα και τα χαλιά εμποδίζουν την έκθεση ενός μεγάλου μέρους της επιφάνειας του δαπέδου στον ήλιο, μονώνοντας το πάτωμα που είναι κάτω, από την άμεση ηλιακή ενέργεια με αποτέλεσμα μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής επιφάνειας του δαπέδου να εκτίθεται τελικά στην ηλιακή ακτινοβολία. Γι' αυτό πρέπει να δοθεί προσοχή σε όλες τις επιφάνειες που περιβάλλουν τον εσωτερικό χώρο λόγω των ικανοτήτων τους για θερμική αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας διασκορπισμένης από τις ακτινοβολούμενες επιφάνειες.

## **Η θερμική σύνδεση μεταξύ των ηλιακών και μη ηλιακών δωματίων**

Για να επιτευχθεί υψηλό ποσοστό ηλιακής κάλυψης μέσω του Άμεσου Ηλιακού Κέρδους είναι απαραίτητο να υπάρχει αποτελεσματική κυκλοφορία αέρα μεταξύ ηλιακών και μη ηλιακών χώρων. Μπορεί λοιπόν σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι αναγκαία η χρήση ανεμιστήρα για την ενίσχυση της κυκλοφορίας μέσω των ανοιγμάτων στους τοίχους μεταξύ των δωματίων καθώς και μέσω αγωγών ή ψευδοροφών, αν και οι μικρές διαφορές θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα δυσχεραίνουν τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.[16,17,18,19,20,21]

### **1.5.1.1.2 Συστήματα Έμμεσου Ηλιακού Κέρδους**

Συστήματα Έμμεσου Ηλιακού Κέρδους είναι τα παθητικά ηλιακά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και την αποδίδουν έμμεσα στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου μέσω δομικών στοιχείων ή διαφόρων ειδών ανοιγμάτων (π.χ. θυρίδων, αγωγών κ.α.). Συνήθως προσαρτώνται σε νότιες όψεις κτιρίων. Τα συστήματα αυτά απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης. Βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών είναι η χρονική υστέρηση της απόδοσης της θερμότητας στο χώρο από την ώρα που πραγματοποιείται η συλλογή.

Τα συστήματα Έμμεσου Ηλιακού Κέρδους ταξινομούνται γενικά σε τρεις κατηγορίες που είναι οι ηλιακοί τοίχοι, τα θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι) και τα ηλιακά αίθρια.

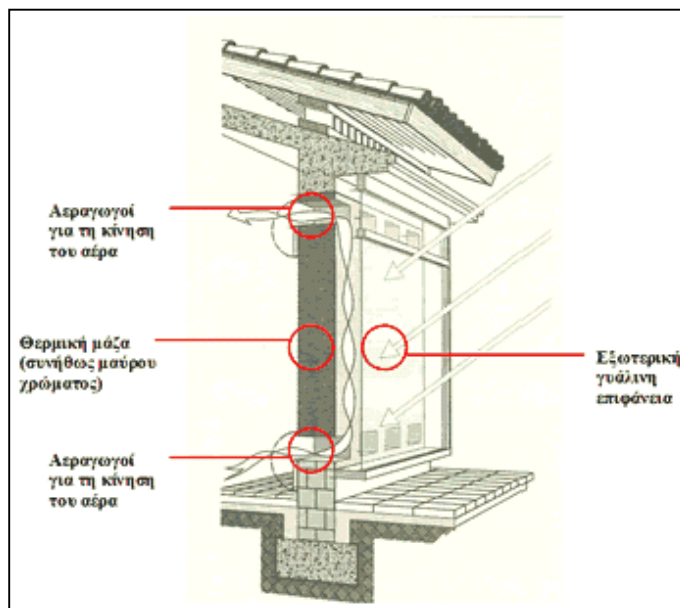
## Ηλιακοί τοίχοι

Έχουν στην εξωτερική τους πλευρά, σε μικρή απόσταση από την τοιχοποιία, τζάμι (υαλοπίνακα) και λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες, μεταφέροντας τη θερμότητα είτε μέσω του υλικού του τοίχου (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε μέσω θυρίδων (θερμοσιφωνικό πάνελ) στον εσωτερικό χώρο.

## Τοίχοι θερμικής αποθήκευσης

Είναι ένας συνδυασμός τοίχου νότιου προσανατολισμού ή με απόκλιση έως 30° προς την Ανατολή ή τη Δύση, και εξωτερικού υαλοστασίου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 10cm περίπου από τον τοίχο και είναι σταθερό ή ανοικτό με μονούς ή διπλούς υαλοπίνακες. Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης αποτελούνται από τοίχο κατασκευασμένο από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας όπως σκυρόδεμα, πέτρα, συμπαγή τούβλα, ή δοχεία που περιέχουν νερό ή άλλο υλικό (υλικό αλλαγής φάσης). Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου πρέπει να είναι σκουρόχρωμη ώστε να μεγιστοποιεί την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απορροφημένη ακτινοβολία μεταδίδεται με αγωγή, ακτινοβολία και συναγωγή (μεταφορά μέσω του αέρα) στον εσωτερικό χώρο.

Στην εξωτερική πλευρά του τοίχου πρέπει να υπάρχει οπωσδήποτε κινούμενο σκίαστρο, το οποίο προστατεύει τον χώρο από την υπερθέρμανση το καλοκαίρι και τις θερμικές απώλειες τις νύχτες του χειμώνα.



**Σχήμα 1.6:** Τοίχος θερμικής αποθήκευσης[22]

**Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης αναλόγως της κατασκευής τους μπορεί να είναι:**

- **Απλοί τοίχοι μάζας**

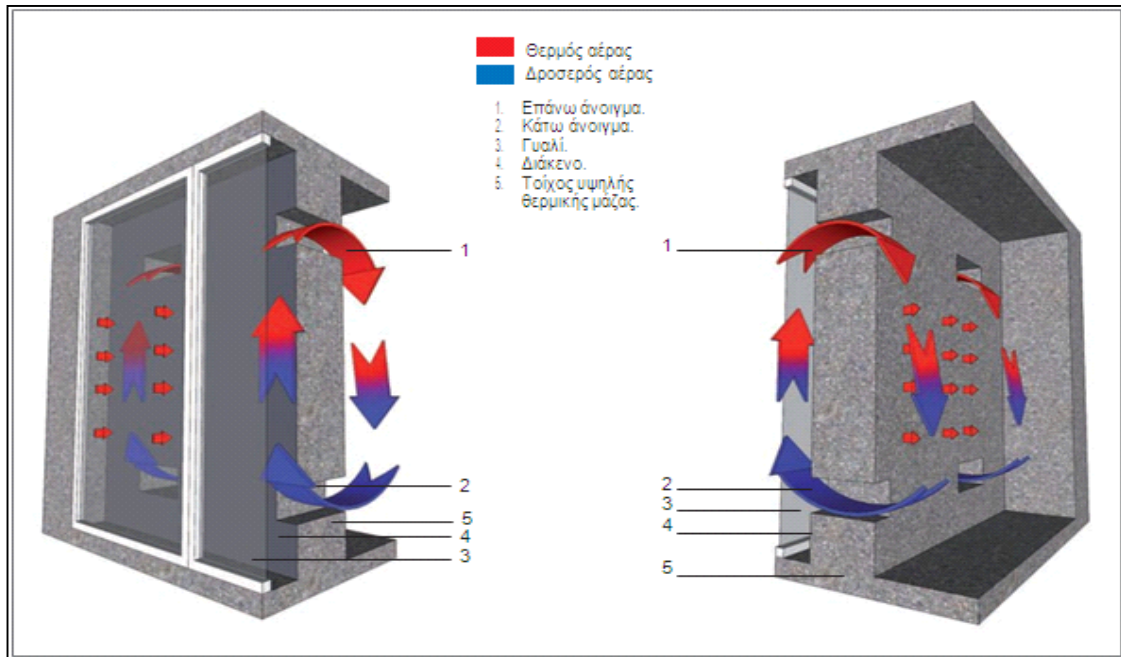
Οι απλοί τοίχοι μάζας είναι τοίχοι μη θερμοσιφωνικής ροής, χωρίς θυρίδες, είτε συμπαγούς κατασκευής είτε αποτελούμενοι από δοχεία νερού ή με υλικά αλλαγής φάσης.

- **Τοίχοι μάζας θερμοσιφωνικής ροής (Trombe - Michel)**

Ο τοίχος **Trombe - Michel** είναι ένα τοίχος θερμικής αποθήκευσης, κατασκευασμένος από υλικά τοιχοποιίας, με θυρίδες στο επάνω και κάτω τμήμα του συμπαγούς τμήματος. Έτσι διευκολύνεται η φυσική κυκλοφορία του αέρα. Όσον αφορά στη συλλογή ενέργειας, τμήμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται από τη γυάλινη επιφάνεια, κάποιο ποσό θερμικής ενέργειας απορροφάται από τον τοίχο και έπειτα ένα τμήμα ακτινοβολείται προς τα έξω (χάνεται), ενώ ένα σημαντικό ποσό ακτινοβολείται προς τον εσωτερικό χώρο με κάποια χρονική υστέρηση. Επιπρόσθετη θερμική ενέργεια έχουμε από την θερμότητα που μεταφέρεται από τον αέρα του διακένου.

Η λειτουργία του ηλιακού αυτού τοίχου βασίζεται στην φυσική κυκλοφορία του αέρα ανάμεσα στο γυαλί και τον τοίχο και μέσα από τις θυρίδες, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας. Ο ψυχρός αέρας του δωματίου εισέρχεται στην κάτω θυρίδα, θερμαίνεται, ανέρχεται και επιστρέφει στο χώρο διαβίωσης θερμός από την άνω θυρίδα. Αντίστοιχα, ο ψυχρός αέρας του χώρου μεταφέρεται μέσω των θυρίδων στο κάτω μέρος του τοίχου στο διάκενο, όπου και θερμαίνεται και ανέρχεται, δημιουργώντας συνεχή ροή θερμότητας προς το χώρο.

Κατά τη διάρκεια της νύκτας και τις νεφοσκεπείς ημέρες οι θυρίδες στο επάνω μέρος του τοίχου μπορούν να παραμένουν κλειστές, ώστε να εμποδίζεται η αντίστροφη κίνηση του θερμού αέρα από το χώρο προς την εξωτερική ψυχρή επιφάνεια του υαλοπίνακα. Το καλοκαίρι για να έχει καλή λειτουργία ο τοίχος αυτός πρέπει να σκιάζεται με σταθερό ή κινούμενο σκίαστρο και ο φεγγίτης στο πάνω μέρος του υαλοστασίου να ανοίγει για να εξασφαλιστεί η απομάκρυνση του θερμού αέρα.[22,23,24,25,26,27]

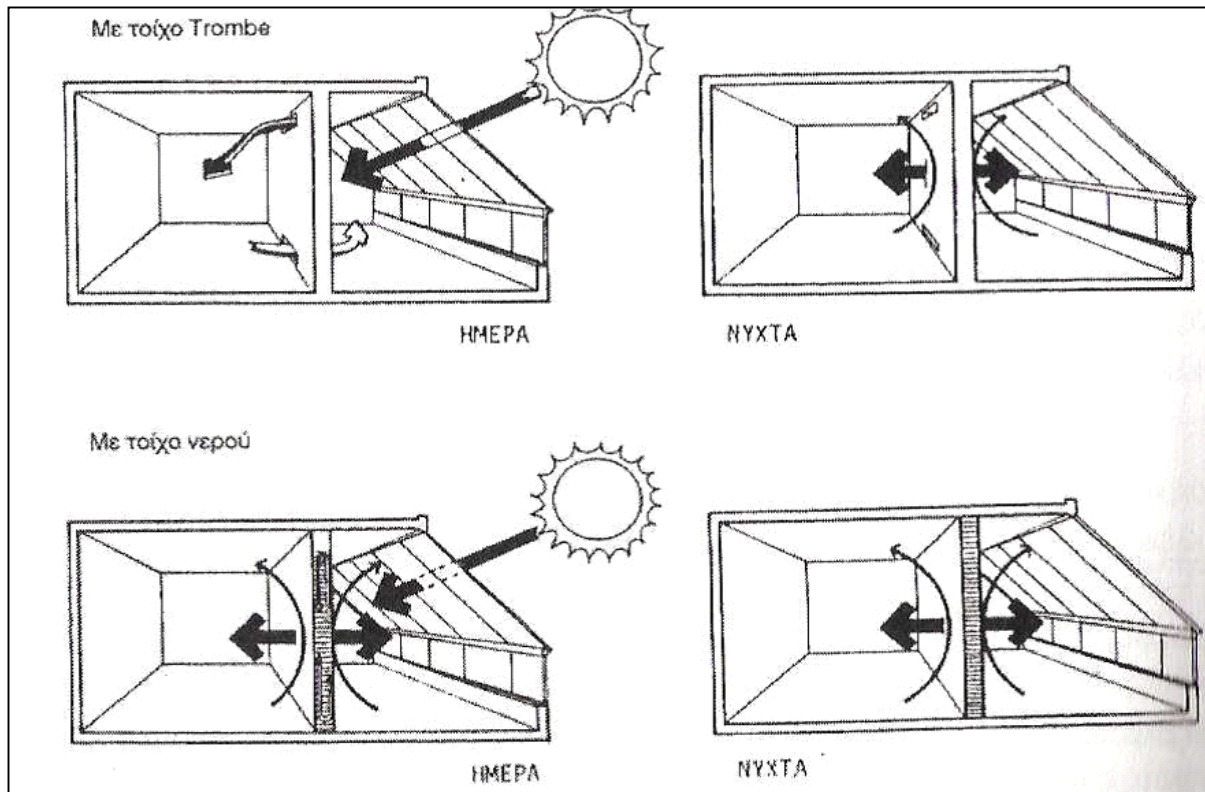


**Σχήμα 1.7:** Ροή ηλιακής ενέργειας σε έναν τοίχο Trombe[23]

**Θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι):** Είναι κλειστοί χώροι που ενσωματώνονται σε νότια τμήματα του κτιριακού κελύφους και περιβάλλονται από υαλοστάσια. Η ηλιακή θερμότητα από το θερμοκήπιο μεταφέρεται στους κυρίως χώρους του κτιρίου διαπερνώντας τον τοίχο. Η απόδοση βελτιώνεται αν προβλεφθούν θυρίδες στο πάνω και κάτω μέρος του τοίχου για την κίνηση του αέρα. Το σύστημα λειτουργεί καλύτερα αν μεταξύ του θερμοκηπίου και του κτιρίου υπάρχει τοίχος θερμικής αποθήκευσης κατασκευασμένος από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.

Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Όταν οι ακτίνες του ήλιου πέσουν στο υαλοστάσιο, μεγάλο μέρος από την ορατή και μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία μεταδίδεται στο εσωτερικό, απορροφάται από τα διαφανή ή στερεά στοιχεία του χώρου (δάπεδο, τοίχοι, έπιπλα) που θερμαίνονται, και επανεκπέμπεται ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η οποία κατά ένα μέρος της απορροφάται από το υαλοστάσιο και η υπόλοιπη ανακλάται. Η ενέργεια αυτή επανεκπέμπεται στη συνέχεια και στις δύο πλευρές του υαλοστασίου. Έτσι, τμήμα της ακτινοβολίας που εισέρχεται παγιδεύεται στο εσωτερικό και προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, που χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ως αποτέλεσμα, το χειμώνα, κατά τη διάρκεια της

ημέρας και σε περίπτωση ηλιοφάνειας, το θερμοκήπιο λειτουργεί ως επιλεκτική επιφάνεια, αφήνοντας να διέρχεται συνολικά η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ μειώνει τις απώλειες-ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, που απορροφάται από τις επιφάνειες και τη θερμική μάζα του θερμοκηπίου.

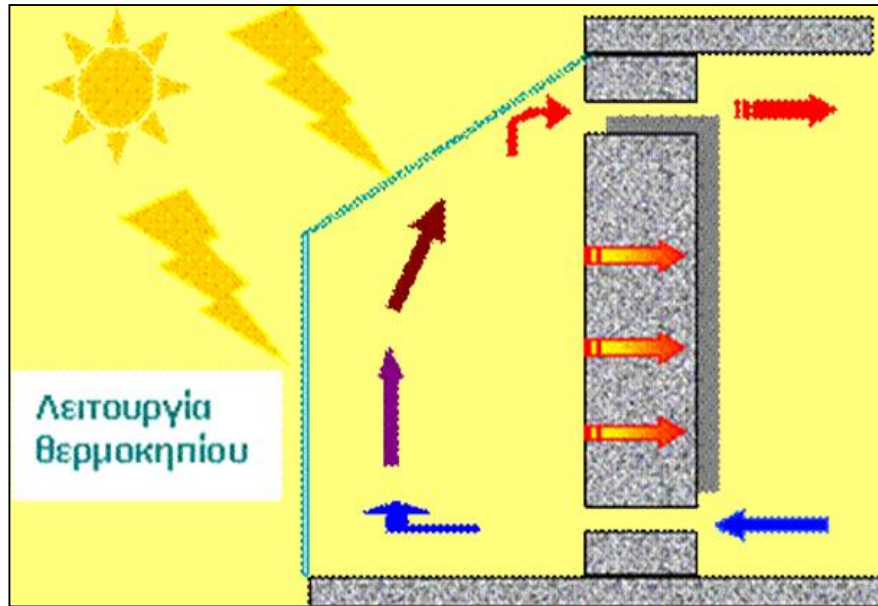


**Σχήμα 1.8:** Συνδυασμός θερμοκηπίου με τοίχο θερμικής αποθήκευσης [14]

Ο προσανατολισμός, το μέγεθος, η κλίση του υαλοστασίου και τα υλικά κατασκευής του επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Για να αποφεύγονται υψηλές θερμοκρασίες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού πρέπει να προβλέπονται ανοίγματα στην οροφή του θερμοκηπίου, καλός αερισμός και ηλιοπροστασία του χώρου.

Ένα θερμοκήπιο συμβάλλει στη θερμική άνεση στους βασικούς χώρους καθώς απομονώνει τους κύριους χώρους από τις ακραίες καταστάσεις έκθεσης, μειώνοντας έτσι πιθανή θερμοκρασιακή διακύμανση και την αντηλιά, ενώ παράλληλα αυξάνει τις δυνατότητες συλλογής θερμότητας μιας δεδομένης πρόσοψης, με το να επιτρέπει μια μεγαλύτερη περιοχή από υαλοπίνακες από ό,τι είναι δυνατόν και επιθυμητό με άμεσο κέρδος. [14,28,23]





Σχήμα 1.9: Λειτουργία θερμοκηπίου[28]



Σχήμα 1.10: Θερμοκήπιο προσαρτημένο στην νότια πλευρά κτιρίου [23]

**Ηλιακά αίθρια:** Αυτοί είναι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου, οι οποίοι έχουν στην οροφή τους υαλοστάσιο και λειτουργούν όπως τα θερμοκήπια. Η δημιουργία αιθρίων στα σύγχρονα κτίρια συμβάλλει στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών θερμικής άνεσης. Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από το

γυάλινο στοιχείο της οροφής, συσσωρεύεται στο εσωτερικό χώρο του αιθρίου και μέρος της μεταφέρεται στους υπάρχοντες εσωτερικούς χώρους του κτιρίου ή των κτιρίων, μέσω ανοιγμάτων, ενώ μέρος αποθηκεύεται στα δομικά στοιχεία. Τα αίθρια κατά τη χειμερινή περίοδο λειτουργούν ως χώροι θερμικής ανάσχεσης. Κατά τη θερινή περίοδο, για την αποφυγή υπερθέρμανσης απαιτείται αερισμός τους, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω ανοιγμάτων στη γυάλινη οροφή αλλά και με κατάλληλη σκίαση.



**Σχήμα 1.11:** Ηλιακό αίθριο[29]

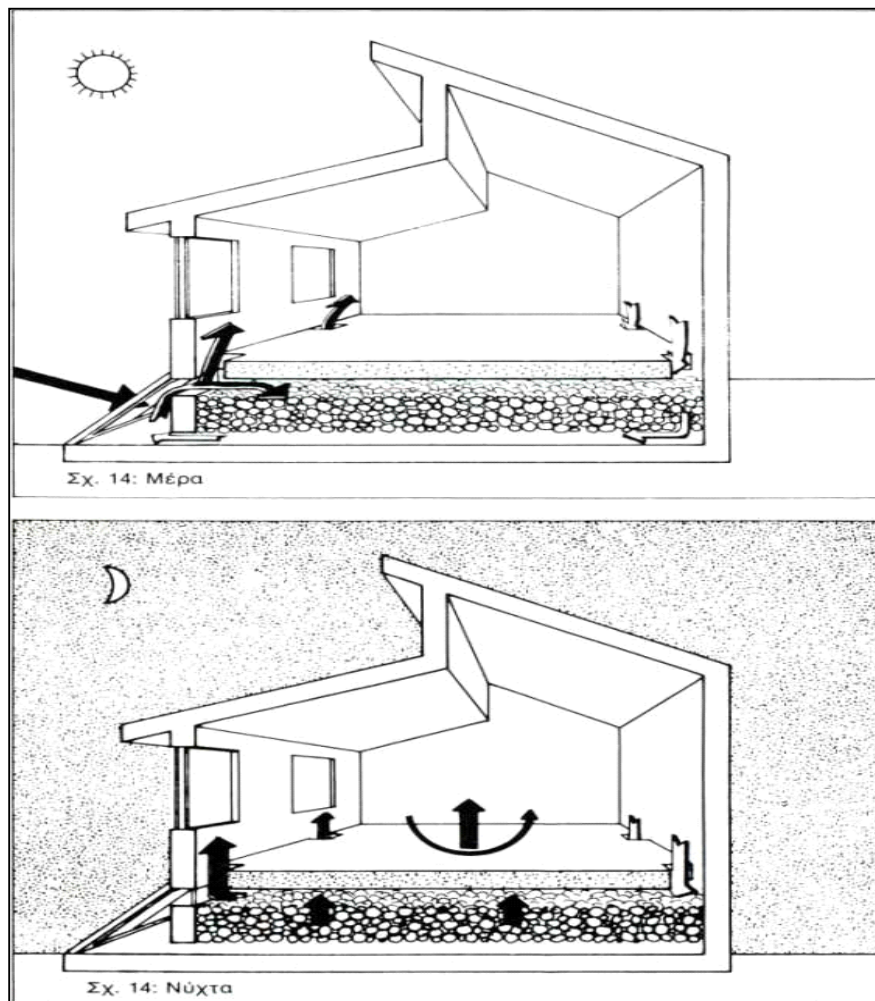
Η συνεισφορά των αίθριων, είτε ανοιχτά, είτε με κάλυψη, είναι σημαντική και στη βελτίωση των συνθηκών φυσικού φωτισμού, ιδιαίτερα σε κτίρια μεγάλης επιφάνειας.[15,16,29]

### **1.5.1.1.3 Συστήματα Απομονωμένου Ηλιακού Κέρδους**

Στα Συστήματα Απομονωμένου Κέρδους, η επιφάνεια ηλιοσυλλογής δε βρίσκεται σε επαφή με το χώρο που θέλουμε να θερμάνουμε, αλλά οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν σε χώρο που είναι προσαρτημένος στο κτίριο και η θερμότητα μεταφέρεται μέσα στο

χώρο διαβίωσης. Τα Συστήματα Απομονωμένου Κέρδους χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να κινήσουν παθητικά τη θερμότητα από ή προς το χώρο που θέλουμε χρησιμοποιώντας ένα ρευστό, όπως το νερό ή τον αέρα με τη φυσική ή αναγκασμένη μεταφορά (π.χ. ανεμιστήρες) ή ακτινοβολία.

Ο πιο κοινός τρόπος μεταφοράς ενέργειας από τον συλλέκτη είναι μέσω μιας συγκεκριμένης μορφής θερμοαγωγιμότητας του λεγόμενου θερμοσιφωνικού κύκλου. Δηλαδή, ο αέρας θερμαίνεται στο συλλέκτη, ακολουθεί ανοδική πορεία, ελκύνοντας δροσερότερο αέρα από τα χαμηλά επίπεδα του χώρου. Ο θερμός αέρας μεταφέρει τη θερμική ενέργεια στο μηχανισμό αποθήκευσης ή στο προς θέρμανση χώρο και τους χρήστες του, γίνεται δροσερότερος και κατευθύνεται προς το συλλέκτη όπου αναθερμαίνεται, ακολουθεί ανοδική πορεία και ξαναρχίζει τον κύκλο του. Το φαινόμενο διαρκεί όσο ο συλλέκτης θερμαίνεται επαρκώς.

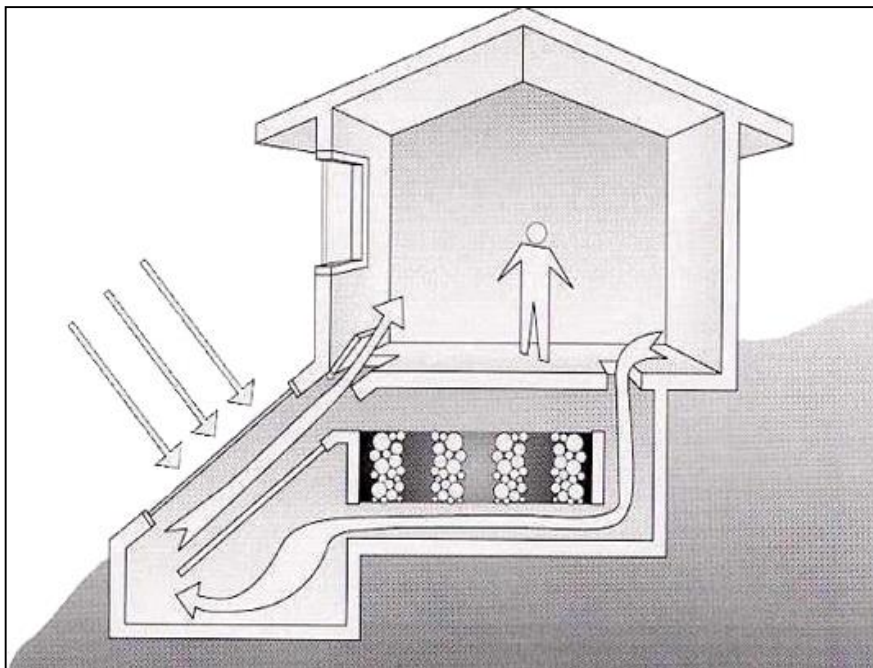


**Σχήμα 1.12:** Σύστημα θερμοσιφωνισμού [14]

Τα Συστήματα Απομονωμένου Κέρδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πρόσθετα συστήματα, αλλά γενικά τα ηλιακά θερμικά συστήματα καλό είναι να είναι ενταγμένα στην αρχιτεκτονική του κτιρίου ειδικά όταν σχεδιάζουμε νέα κτίρια. Ένα παράδειγμα Απομονωμένου Κέρδους είναι το θερμοσιφωνικό πανέλο-αεροσυλλέκτης με rock bed.

### Θερμοσιφωνικό πανέλο εκτός του κτιριακού περιβλήματος

Το απομονωμένο θερμοσιφωνικό πανέλο τοποθετείται ανεξάρτητα από το κτιριακό κέλυφος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ναλοπίνακα, διάκενο αέρα και μεταλλική σκουρόχρωμη επιφάνεια που φέρει εξωτερική μόνωση. Η θερμότητα που συλλέγεται στο διάκενο αέρα, μεταφέρεται μέσω αγωγών με θερμοσιφωνική ροή είτε απ' ευθείας στους χώρους του κτιρίου, είτε σε αποθήκη θερμότητας (rock bed), απ' όπου αποδίδεται σταδιακά στους χώρους, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



**Σχήμα 1.13:** Θερμοσιφωνικό πανέλο εκτός του κτιριακού περιβλήματος

Έχει νότιο προσανατολισμό, με απόκλιση έως  $\pm 30^\circ$  από το νότο και κλίση είτε κατακόρυφη, είτε υπό γωνία, με βέλτιστη κλίση τις  $30-40^\circ$  για τον ελλαδικό χώρο. Το χειμώνα, λόγω του μονωμένου τοίχου δεν έχουμε απώλειες θερμότητας ενώ το καλοκαίρι αποφεύγουμε ηλιακά κέρδη.[31,33]

### 1.5.1.2 Παθητικά Συστήματα και Τεχνικές Φυσικού Δροσισμού

Οι πιο συνηθισμένες και απλές μέθοδοι φυσικού δροσισμού είναι:

- **Η ηλιοπροστασία** (σκίαση) του κτιρίου, η οποία επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους και μέσα, όπως η φυσική βλάστηση, τα γεωμετρικά στοιχεία (προεξοχές) του κτιρίου, σκίαστρα μόνιμα ή κινητά, εξωτερικά ή εσωτερικά των ανοιγμάτων, υαλοπίνακες με ειδικές επιστρώσεις ή ειδικής επεξεργασίας (ανακλαστικοί, επιλεκτικοί, ηλεκτροχρωμικοί, κ.λ.π.).
- **Ο φυσικός εξαερισμός** με κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία των ανοιγμάτων στο κέλυφος και θυρίδες στο πάνω και κάτω τμήμα των διαχωριστικών εσωτερικών τοίχων που επιτρέπουν την κίνηση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους
- **Ο νυχτερινός διαμπερής αερισμός** είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, ιδιαίτερα τις θερμές ημέρες, κατά τις οποίες ο ημερήσιος αερισμός δεν είναι δυνατός. Ο νυχτερινός αερισμός συνεισφέρει στην αποθήκευση «δροσιάς» στη θερμική μάζα του κτιρίου, με αποτέλεσμα την μειωμένη επιβάρυνση του κτιρίου κατά την επόμενη μέρα.
- **Η χρήση ανεμιστήρων**, ιδιαίτερα ανεμιστήρων οροφής, ενισχύει το φαινόμενο του φυσικού αερισμού, με ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, συνεισφέρει στην επίτευξη θερμικής άνεσης σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τις συνήθειες (περίπου 2-3°C), καθώς με την κίνηση του αέρα που δημιουργείται, μεταφέρεται θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα.
- **Η χρήση της θερμικής μάζας** για τη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.
- **Μείωση των εσωτερικών κερδών** του κτιρίου (θερμότητα που παράγεται από τις ηλεκτρικές, κυρίως συσκευές).

Άλλες μέθοδοι παθητικού δροσισμού πιο σύνθετες και όχι τόσο ευρείας εφαρμογής, επιφέρουν επιπρόσθετα οφέλη ψύξης, και είναι:

- **Θερμική προστασία** του κτιριακού περιβλήματος με τεχνικές όπως φυτεμένο δώμα, αεριζόμενο κέλυφος, ανακλαστικά επιχρίσματα εξωτερικών επιφανειών, φράγμα ακτινοβολίας.

- Ενίσχυση του φυσικού εξαερισμού με πύργους αερισμού ή ηλιακές καμινάδες
- Δροσισμός με εξάτμιση νερού με τεχνικές όπως: επιφάνειες νερού, πύργος δροσισμού, ψυκτικές μονάδες εξάτμισης (άμεσης, έμμεσης ή συνδυασμένης εξάτμισης), ή και βλάστηση (μέσω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών).
- Δροσισμός με απόρριψη της θερμότητας στην ατμόσφαιρα με ακτινοβολία στο νυχτερινό ουρανό.
- Δροσισμός με απόρριψη της θερμότητας από το κτίριο στη γη με αγωγή, (υπόσκαφα ή ημιυπόσκαφα κτίρια, ή υπεδάφιο σύστημα αγωγών και εναλλάκτες εδάφους-αέρα).[34]

### 1.5.2 Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα

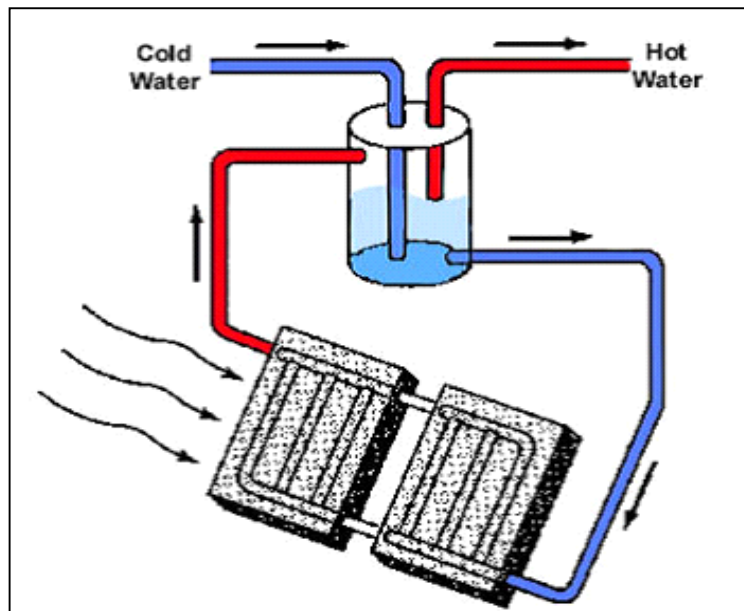
Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ονομάζονται τα συστήματα τα οποία συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία, και τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό.

Ένα τυπικό ενεργητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού αποτελείται από μια επίπεδη απορροφητική μεταλλική πλάκα, που είναι συνήθως βαμμένη με μαύρο χρώμα για να επιτυγχάνεται η μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό), το οποίο παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες, μέσα από τους οποίους διοχετεύεται κάποιο υγρό, που απάγει την θερμότητα και τη μεταφέρει, με τη βοήθεια μικρών αντλιών (κυκλοφορητές), σε μια μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης.

Επομένως τα κυριότερα μέρη ενός ενεργού ενεργητικού ηλιακού συστήματος αποτελούνται από δύο βασικά μέρη:

- Το τμήμα συλλογής (οι ηλιακοί συλλέκτες, η επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας).
- Το τμήμα αποθήκευσης (η δεξαμενή αποθήκευσης του νερού) που συνήθως διαθέτει και ηλεκτρική αντίσταση με θερμοστάτη, για να μπορεί να παράγεται ζεστό νερό και σε περιόδους μικρής ή μηδενικής ηλιοφάνειας.

Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή των ενεργητικών συστημάτων είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, δηλαδή οι ηλιακοί θερμοσίφωνες. Κατά την λειτουργία τους εκτός από το φαινόμενο του θερμοκηπίου που αναπτύσσεται στους συλλέκτες τους, εκμεταλλεύονται και την αρχή του θερμοσιφώνου, δηλαδή το φυσικό φαινόμενο της ροής των ρευστών λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (διαφοράς πυκνότητας). Έτσι πετυχαίνεται, με φυσικό τρόπο χωρίς κυκλοφορητή (αντλία), συνεχής ροή του θερμαινόμενου μέσου, από το θερμότερο σημείο (ηλιακοί συλλέκτες) προς το ψυχρότερο (δεξαμενή νερού), μέχρις ότου τα δύο σημεία να αποκτήσουν παρόμοιες θερμοκρασίες. Για να είναι όμως αυτό δυνατό πρέπει το ψυχρότερο σημείο να είναι ψηλότερα από το θερμότερο σημείο και για τον λόγο αυτό σε όλους τους ηλιακούς θερμοσίφωνες η δεξαμενή αποθήκευσης είναι πάντα ψηλότερα από τους ηλιακούς συλλέκτες.



**Σχήμα 1.14:** Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού θερμοσίφωνα

Η συνολική απόδοση του ηλιακού θερμοσίφωνα εξαρτάται κι απ' τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τη νεφοκάλυψη και την αποτελεσματικότητα της θερμικής μόνωσης του συστήματος.

Διακρίνουμε δύο είδη θερμοσίφωνων ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου:

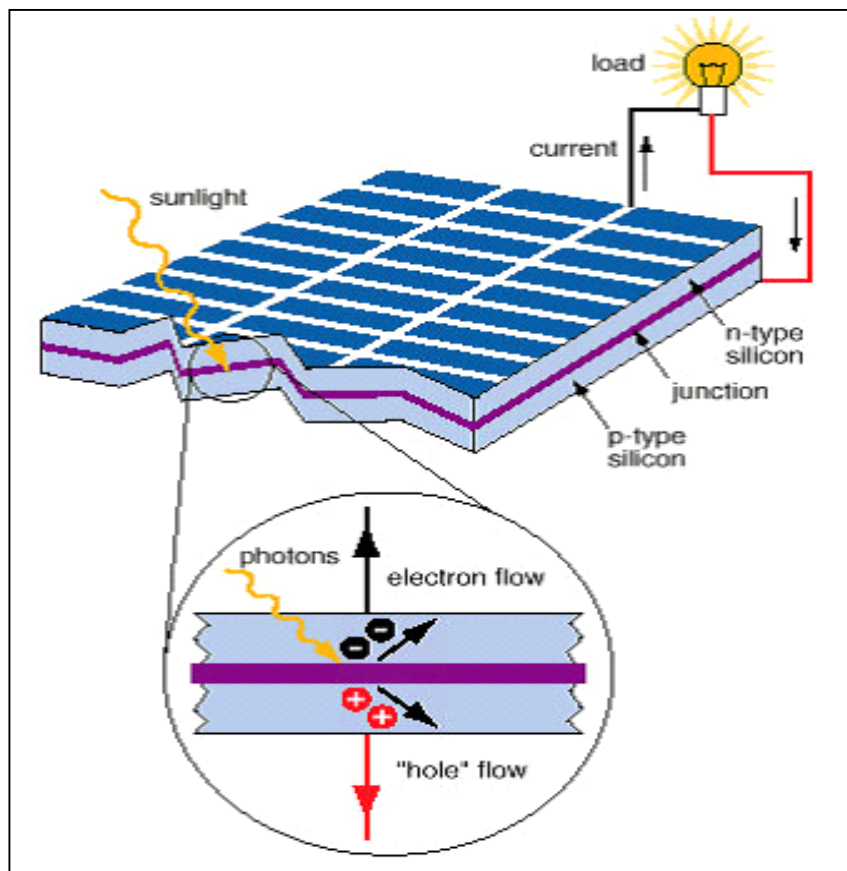
- **Ανοικτού κυκλώματος:** όπου έχουμε απευθείας θέρμανση του νερού χρήσης (το

θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε).

- **Κλειστού κυκλώματος:** όπου έχουμε έμμεση θέρμανση του νερού χρήσης (το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί σε ιδιαίτερο κύκλωμα, το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε χωρίς να γίνεται ανάμιξή τους, μέσω εναλλάκτη θερμότητας).[35,36]

### 1.5.3 Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Είναι πολύ ευέλικτα συστήματα και μπορεί να καλύπτουν τόσο μικρές (π.χ. ενέργεια για ένα φορητό υπολογιστή), όσο και μεγάλες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια (ένα ολόκληρο χωριό). Η λειτουργία τους δεν στηρίζεται μόνο στην ηλιακή ενέργεια αλλά επίσης στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών.



**Σχήμα 1.15:** Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε ένα ηλιακό στοιχείο.



Η ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαρτάται από την απόδοση του στοιχείου (είδος υλικού), την επιφάνειά του και την ηλιακή ακτινοβολία (ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και μήκος κύματός της).

Το σύνολο των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συνδέονται ηλεκτρονικά μεταξύ τους ονομάζεται φωτοβολταϊκή γεννήτρια και το σύνολο των φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδεδεμένων μεταξύ τους ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελεί το βασικότερο μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος και συνοδεύεται από κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα για έλεγχο και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και από σύστημα αποθήκευσης (μπαταρίες).

Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται με τον τρόπο αυτό μπορεί να καλύψει ανάγκες όπως λειτουργία επιστημονικών συσκευών (δορυφόρων), κίνηση ελαφρών αυτοκινήτων (ηλιακά αυτοκίνητα), λειτουργία φάρων, ή την κάλυψη έστω και μέρους των ενεργειακών αναγκών μικρών κατοικιών όπως φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη κτλ.

Στη σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση συστημάτων περιστροφής των πλαισίων τα οποία ακολουθούν την κίνηση του ήλιου, ωστόσο η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων είναι δυνατόν να αυξήσει σημαντικά το κόστος της επένδυσης.

Σήμερα το μέσο κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι σχετικά υψηλό. Εκτός από το πρόβλημα του κόστους, ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει (όπως και με άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας) είναι η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας και η χρησιμοποίησή της σε ώρες που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία. Πάντως είναι άμεσης προτεραιότητας η συνέχιση με εντατικότερους ρυθμούς της ερευνητικής προσπάθειας, που θα κάνει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συγκρίσιμο με το κόστος από τα συμβατικά καύσιμα.[37,38]

## 1.6 Αποθήκευση ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αναλύθηκε στη σχετική παράγραφο, συμβάλλουν σημαντικά στην προσπάθεια αντιμετώπισης της ενεργειακής κρίσης και των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Παρόλα αυτά, η ενέργεια που παράγεται από τα διάφορα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Συνεπώς παρουσιάζεται το φαινόμενο της χρονικής αναντιστοιχίας μεταξύ της παραγωγής (προσφοράς) και της κατανάλωσης (ζήτησης) ενέργειας. Δηλαδή η ενέργεια μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα. Έτσι δημιουργείται, η ανάγκη της ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ. Η ανάγκη της αποθήκευσης προϋπήρχε, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευέλικτες και κατά περιόδους η ενέργεια που παράγουν είναι μεγαλύτερη της ζήτησης. Η ανάγκη αυτή θα μεγαλώσει στο μέλλον σημαντικά, λόγω της μεγαλύτερης συμμετοχής των ΑΠΕ.

Η αποθήκευση της ενέργειας όχι μόνο μειώνει την αναντιστοιχία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, αλλά και βελτιώνει την απόδοση και την αξιοπιστία των ενεργειακών συστημάτων και παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ενέργειας. Οδηγεί σε εξοικονόμηση των βασικών καυσίμων και καθιστά το σύστημα πιο αποδοτικό με τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του κεφαλαίου. Για παράδειγμα, η αποθήκευση θα βελτιώνει την απόδοση ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την εξομάλυνση των φορτίων και η ψηλότερη αυτή αποδοτικότητα θα οδηγούσε σε εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος παραγωγής.

Στη σημερινή εποχή η αποθήκευση ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία οποιασδήποτε εγκατάστασης παραγωγής που προσπαθεί να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση. Για παράδειγμα στις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, η ανάγκη αποθήκευσης είναι επιτακτική, ειδικά όταν η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι στο κατώτατο σημείο, κυρίως τον χειμώνα. Μια σημαντική μορφή ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί είναι η θερμική ενέργεια.[39]

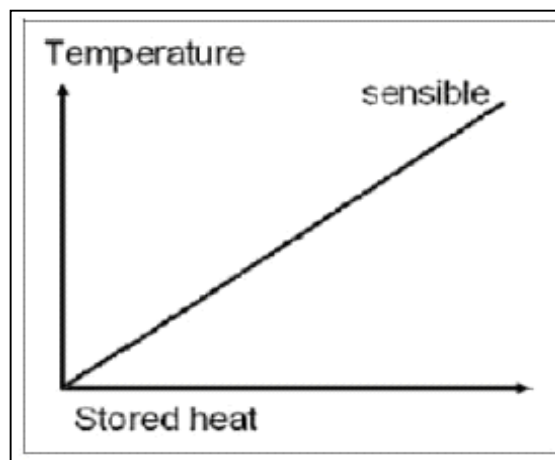
## 1.6.1 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως μια αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια ενός υλικού. Η τεχνολογία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην μείωση της εξάρτησης των κτιρίων από τα ορυκτά καύσιμα, να προσφέρει θερμική άνεση και να συμβάλει σε μια πιο αποτελεσματική χρήση της ενέργειας για το περιβάλλον. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης θερμικής αποθήκευσης είναι ότι μπορεί να συμβάλει στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας, όταν δεν συμπίπτουν χρονικά, ιδιαίτερα στον τομέα της θέρμανσης ή ψύξης χώρων. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες χημικές ή φυσικές διεργασίες που η καθεμιά έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Τα κύρια συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αισθητή αποθήκευση θερμότητας και η λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας.[40,41]

### 1.6.1.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας (Sensible Heat Storage-SHS), όπου η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία ενός στερεού ή υγρού υλικού. Η ονομασία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευτεί από ένα αισθητήρα (θερμόμετρο). Στο σχήμα που ακολουθεί, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού καθώς αποθηκεύεται θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.



**Σχήμα 1.16:** Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [40]

Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κυρίως με την αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών δομικών στοιχείων (τούβλο, πέτρα κα), καθώς επίσης και των υγρών (νερό). Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δε χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά των υλικών αυτών αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή υπό σταθερό όγκο καθώς και η αλλαγή της θερμοκρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της φόρτισης και της αποφόρτισης. Η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από τη ειδική θερμότητα του μέσου, τη μεταβολή της θερμοκρασίας και την ποσότητα της μάζας του υλικού αποθήκευσης:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT = m \cdot C_{ap} \cdot (T_f - T_i) \quad [1.1]$$

Είναι προφανές ότι τα υλικά για να είναι κατάλληλα για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής πρέπει να έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα και σχετικά χαμηλό κόστος. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' αυτά τα συστήματα. Τέτοια επιλεγμένα στερεά και υγρά υλικά φαίνονται στον πιο κάτω Πίνακα 1.1. Φαίνεται ότι το νερό ( $H_2O$ ) είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας καθώς έχει εξαιρετικά χαμηλή τιμή και σχετικά υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα. Παρόλα αυτά, πάνω από τους  $100\text{ }^\circ\text{C}$  χρησιμοποιούνται διάφορα έλαια, λιωμένα άλατα, υγρά μέταλλα, κ.λ.π. Για εφαρμογές θέρμανσης αέρα χρησιμοποιούνται υλικά αποθήκευσης τύπου rock bed.

Medium	Fluid Type	Temperature range ( $^\circ\text{C}$ )	Density( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg K}$ )
Rock		20	2560	879
Brick		20	1600	840
Concrete		20	1900-2300	880
Water		0-100	1000	4190
Caloria HT43	Oil	12-260	867	2200
Engline oil	Oil	Up to 160	888	1880
Ethanol	Organic Liquid	Up to 78	790	2400
Proponal	Organic Liquid	Up to 97	800	2500
Butanol	Organic Liquid	Up to 118	809	2400
Isotunaol	Organic Liquid	Up to 100	808	3000
Isopentanol	Organic Liquid	Up to 148	831	2200
Octane	Organic Liquid	Up to 126	704	2400

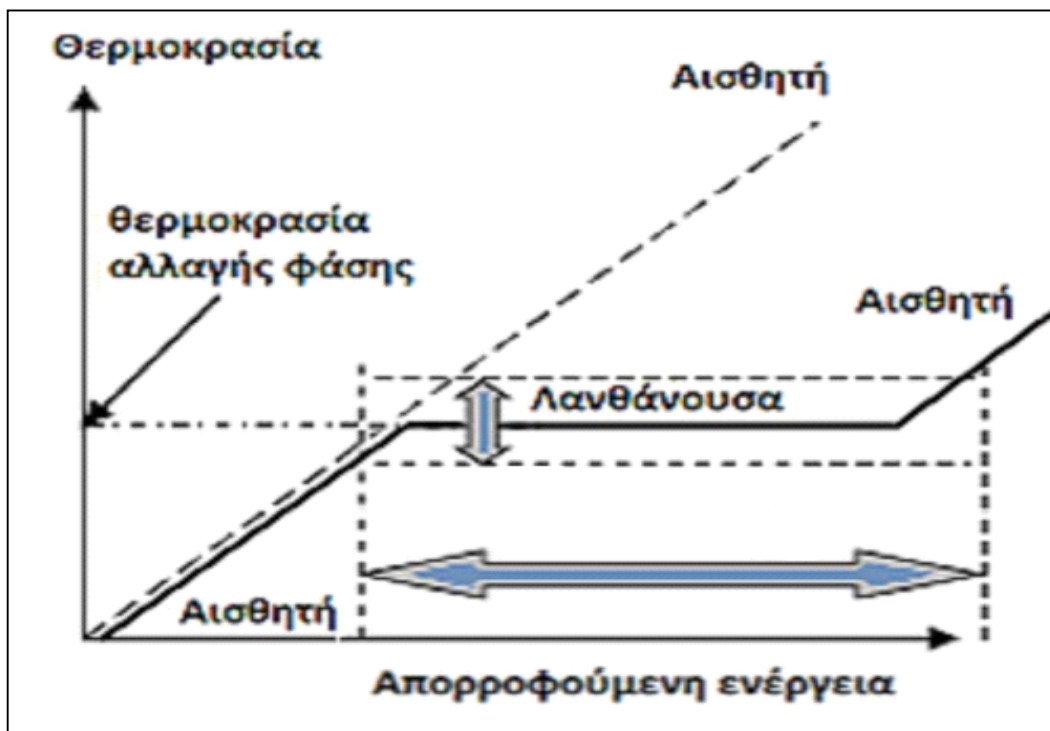
**Πίνακας 1.1:** Επιλεγμένα στερεά και υγρά υλικά για αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Στα σύγχρονα κτίρια το μεγάλο κόστος είναι ο κύριος παράγοντας που εμποδίζει την ανάπτυξη τεχνικών αποθήκευσης με τη μέθοδο αυτή, καθώς απαιτείται μεγάλη μάζα υλικού για την επίτευξη ικανοποιητικής χωρητικότητας αποθήκευσης.[39,40,41,42]

### 1.6.1.2 Αποθήκευση ως λανθάνουσα θερμότητα

Μια άλλη μέθοδος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας ενέργειας (Latent Heat Storage-LHS), η οποία βασίζεται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση θερμότητας όταν ένα υλικό αποθήκευσης υποβάλλεται σε αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο ή το αντίστροφο. Όσο και αν αυτό φαίνεται παράξενο, αυτή είναι μια πανάρχαια τεχνική αφού ένα από τα πρώτα μέσα αποθήκευσης θερμότητας (κρύου) υπήρξε ο πάγος.

Γενικά όταν σε μια ουσία προστίθεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, προκύπτει αύξηση της εσωτερικής ενέργειας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα 1.17. Η προσθήκη αυτής της θερμότητας συνεπάγεται αύξηση στη θερμοκρασία (αισθητή θέρμανση) ή αλλαγή της φάσης (λανθάνουσα θέρμανση).



**Σχήμα 1.17:** Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [43]

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία σ' όλη τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Επίσης έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας και ανά μονάδα όγκου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change materials-PCM). Η ικανότητα αποθήκευσης σε μορφή λανθάνουσας ενέργειας με ένα υλικό αλλαγής φάσης PCM δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT \quad [1.2]$$

$$Q = m [C_{sp} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp} (T_f - T_m)] \quad [1.3]$$

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ικανότητα αποθήκευσης του υλικού εξαρτάται εκτός από την ειδική θερμότητα και από την τιμή της λανθάνουσας θερμότητας. Ως εκ τούτου, είναι επιθυμητό για το μέσο αποθήκευσης να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα και λανθάνουσα θερμότητα.

Η αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τη διαδικασία αλλαγής φάσης σε στερεά-στερεά, στερεά-υγρή, στερεά-αέρια και υγρή αέρια. Γενικά για εφαρμογές κτιρίων η μετάβαση από στερεό ή υγρό σε αέριο δεν εφαρμόζεται λόγω των υψηλών πιέσεων (ή του μεγάλου όγκου) που απαιτούνται όταν το υλικό είναι στην αέρια φάση. Η μετάβαση από στερεό σε στερεό (όταν η αποθηκευμένη ενέργεια αλλάζει την κρυσταλλική δομή του υλικού) αφορά μικρή αλλαγή όγκου και παρέχει μεγαλύτερη ευχέρεια στους σχεδιαστές, ωστόσο αφορά συνήθως σε μικρές ποσότητες λανθάνουσας θερμότητας που την καθιστούν ασύμφορη. Η μετάβαση από στερεό σε υγρό αποθηκεύει συγκριτικά μικρότερα ποσά λανθάνουσας ενέργειας σε σχέση με τη μετάβαση από υγρό σε αέριο, ωστόσο οι μικρότερες μεταβολές όγκων που εμπλέκονται την καθιστούν οικονομικά πιο συμφέρουσα. Όλες οι παραπάνω αλλαγές φάσης πρέπει να είναι αντιστρέψιμες με σχεδόν ισοθερμική μετάβαση.

Τα υλικά αλλαγής φάσης από μόνα τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα μεταφοράς θερμότητας. Ένα ξεχωριστό μέσο μεταφοράς θερμότητας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί με έναν εναλλάκτη θερμότητας ενδιάμεσα, για να μεταφέρεται η ενέργεια από την πηγή στο PCM και από το PCM στο φορτίο. Ο εναλλάκτης θερμότητας



για να χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένος, ενόψει της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που έχουν γενικά τα PCM.

Οι μεταβολές του όγκου των PCM κατά τη τήξη απαιτούν δοχείο με ειδική σχεδίαση για το σύνολο των PCM, έτσι ώστε να είναι σε θέση να απορροφήσει αυτές τις μεταβολές του όγκου. Θα πρέπει επίσης το δοχείο αυτό να είναι συμβατό με το PCM που χρησιμοποιείται.

Επομένως οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας θα πρέπει να έχει τουλάχιστον τις ακόλουθες τρεις συνιστώσες:

- Ένα κατάλληλο PCM με σημείο τήξης στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος.
- Την κατάλληλη επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας.
- Το κατάλληλο δοχείο το οποίο να είναι συμβατό με το PCM.

Ως εκ τούτου για την ανάπτυξη των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας, πρέπει να κατανοηθούν τρία βασικά θέματα: τα υλικά αλλαγής φάσης, τα δοχεία όπου τοποθετούνται αυτά και οι εναλλάκτες θερμότητας.[39,40,44,45]



## **Βιβλιογραφία 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

1. Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota, SOLAR ENERGY : Renewable Energy and the Enviroment, United States of America : CRC Press 1 edition (August 18, 2009)
2. [http://el.wikipedia.org/wiki/Ηπιες\\_μορφές\\_ενέργειας](http://el.wikipedia.org/wiki/Ηπιες_μορφές_ενέργειας)
3. Κέντρο ανανεώσιμων πηγών και εξοικονόμησης ενέργειας, [http://www.cres.gr/energy-saving/technologies\\_technologies\\_ape.htm](http://www.cres.gr/energy-saving/technologies_technologies_ape.htm)
4. Boyle, G., “Renewable Energy: Power for a Sustainable Future”. 3rd edition, Oxford University Press, 2012
5. Sorensen, B. “Renewable Energy”. 2nd edition, Academic Press, 2000
6. Α. Ζερβός, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2007.
7. Κέντρο ανανεώσιμων πηγών και εξοικονόμησης ενέργειας, [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis.htm)
8. Αντωνόπουλος Κ.: «ΘΕΡΜΙΚΑ - ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ» Πολυτεχνειακές Εκδόσεις, Μέρος Πρώτο (2004).
9. <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>
10. [http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλιακή\\_ενέργεια](http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλιακή_ενέργεια)
11. [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_bioclimatic.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_bioclimatic.htm)
12. [http://users.sch.gr/kpara/ape2009\\_10/sun\\_energy2.html](http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/sun_energy2.html)
13. <http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-06-67.pdf>
14. Πέρδιος Σταμάτης Δ (2007), Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια-αθλητικά κέντρα-βιομηχανίες-μεταφορές, ΤΟΜΟΣ Α Εκδόσεις Τεκδοτική Αθήνα
15. [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_bioclimatic\\_passive.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_bioclimatic_passive.htm)
16. [http://www.euroblinds.com.cy/phocadownload/bioklimatiki\\_arxitektoniki.pdf](http://www.euroblinds.com.cy/phocadownload/bioklimatiki_arxitektoniki.pdf)
17. [http://www.4green.gr/data/news/preview\\_news/88888.asp#photo6](http://www.4green.gr/data/news/preview_news/88888.asp#photo6)
18. Τσίππρας Κώστας Στεφ., Το Οικολογικό Σπίτι, Εκδόσεις Λιβάνη, Αθήνα 1996
19. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/thermansi/pathitika\\_iliaka\\_systimata.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermansi/pathitika_iliaka_systimata.htm)
20. Markus T.A., Moris E.N., Buildings, Climate and Energy, E.N., Pitman, 1980
21. The Energy Research Group-School of Architecture-University College Dublin, Energy in Architecture- The European Passive Solar Handbook, Brussels 1996
22. [http://www.ecoarchitects.gr/menelaos\\_xenakis\\_03.htm](http://www.ecoarchitects.gr/menelaos_xenakis_03.htm)
23. <http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-06-67.pdf>
24. [http://www.energynius.gr/files4users/files/TOTEE\\_20701\\_6\\_Final\\_TEE.pdf](http://www.energynius.gr/files4users/files/TOTEE_20701_6_Final_TEE.pdf)
25. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/thermansi/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermansi/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos.htm)
26. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos\\_iliakoitoixoi.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos_iliakoitoixoi.htm)
27. [http://www.cres.gr/kape/education/bioclimatic\\_brochure.pdf](http://www.cres.gr/kape/education/bioclimatic_brochure.pdf)
28. [http://49lyk-athin.att.sch.gr/AJIOPOIHSH\\_ENERDEIAS.htm](http://49lyk-athin.att.sch.gr/AJIOPOIHSH_ENERDEIAS.htm)
29. [http://www.leonics.com/support/article2\\_15j/articles2\\_15j\\_en.php](http://www.leonics.com/support/article2_15j/articles2_15j_en.php)
30. [www.ecoarchitects.gr](http://www.ecoarchitects.gr)
31. T.O.TEE 20702-5/2010
32. [http://en.wikipedia.org/wiki/Passive\\_solar\\_building\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_solar_building_design)





33. [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos\\_systyma\\_kerdous.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos_systyma_kerdous.htm)
34. [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_bioclimatic\\_drosismos.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_bioclimatic_drosismos.htm)
35. [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_water\\_heating](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_water_heating)
36. [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_active\\_solar.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_active_solar.htm)
37. <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-1-4>
38. [http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic\\_array](http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_array)
39. Atul Sharma, V. V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 318-345, (2009).
40. H. Mehling, L.F. Cabeza, Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications, Springer, 2008.
41. N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santo, "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency", Energy and Buildings 59 82-103, (2013)
42. Belen Zalba , Jose M. Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications", Applied Thermal Engineering 23 251-283, (2003).
43. [http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)
44. A. Felix Regin, S.C.Solanki, J.S. Saini "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 2438-2451(2008).
45. Sharma S.D., Kazunobu Sagara "Latent heat storage material and systems : A review" International Journal of Green Energy, 2 1-56, (2005).
46. Atul Sharma, V. V. Tyagib, C.R. Chen , D.Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", Renewable & Sustainable Energy Reviews 13 318- 345, (2009).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή

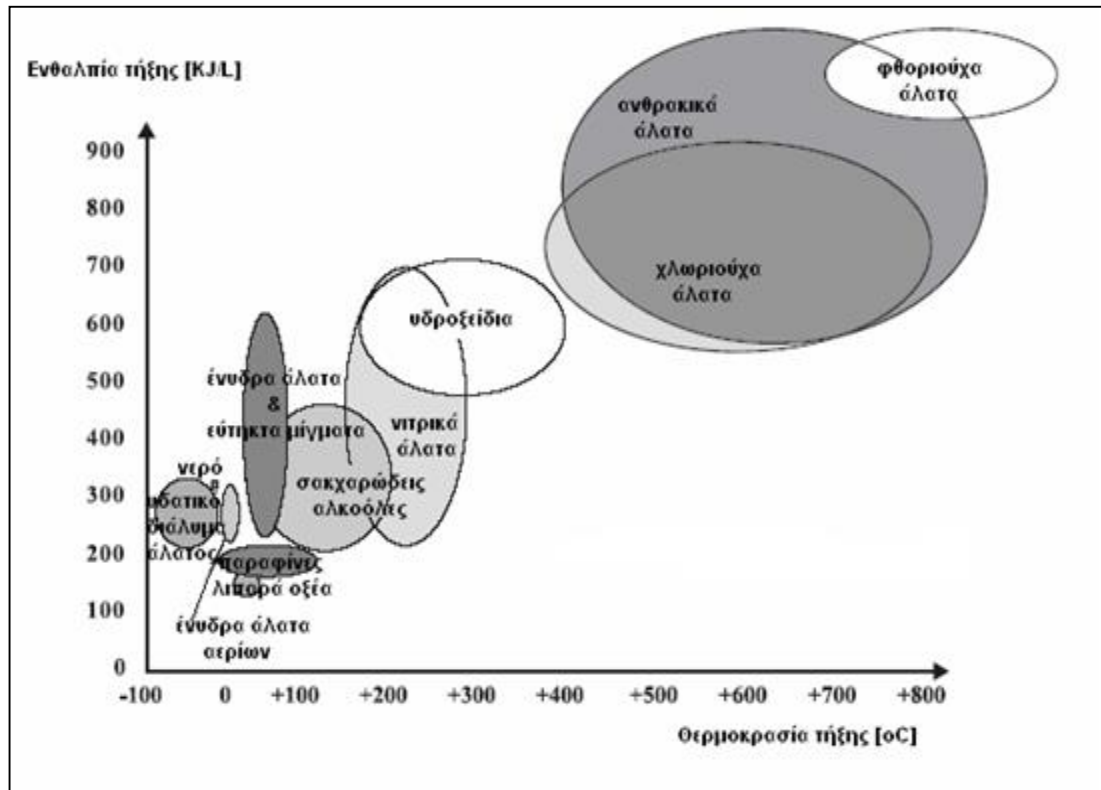
Υλικά PCM (Phase Change Materials – Υλικά Αλλαγής Φάσης) ονομάζονται τα υλικά, τα οποία χρησιμοποιώντας χημικούς δεσμούς μπορούν να απορροφήσουν, να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν σε μεγάλες ποσότητες ενέργεια με την μορφή θερμότητας. Τα PCM υφίστανται αλλαγές φάσης στερεού-στερεού, υγρού-αερίου και στερεού-υγρού. Από αυτά τα πιο κατάλληλα για αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι τα PCM στερεού-υγρού, καθώς έχουν πολλές δυνατότητες αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και καλή θερμική αγωγιμότητα.

Η αλλαγή φάσης ενός PCM από στερεό σε υγρό συμβαίνει, όταν κατά τη διάρκεια θέρμανσης, η θερμοκρασία φτάσει τη θερμοκρασία τήξης. Κατά τη διάρκεια της τήξης, το PCM απορροφά και αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Η θερμοκρασία του PCM παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας, σε αντίθεση με τα συμβατικά θερμοαποθηκευτικά υλικά, τα οποία απορροφούν αισθητή θερμότητα. Κατά την ψύξη του PCM, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας και λαμβάνει χώρα μία αντίστροφη αλλαγή φάσης από υγρό σε στερεό. Σε θερμοκρασίες μακριά από το σημείο τήξης, το PCM λειτουργεί όπως και τα συμβατικά υλικά συναλλάσσοντας θερμότητα με την μορφή αισθητής θερμότητας.

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των Υλικών Αλλαγής Φάσης παρουσιάζει διεθνώς έντονο ενδιαφέρον, ειδικά στον κτιριακό τομέα λόγω του πολλαπλάσιου θερμοαποθηκευτικού δυναμικού τους έναντι των άλλων υγρών ή στερεών υλικών. Με το σωστό σχεδιασμό και κάτω από ευνοϊκές συνθήκες και κατάλληλες θερμοκρασίες (μεταξύ περίπου 20 και 30 °C), τα Υλικά Αλλαγής Φάσης μπορούν να αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό και τα συμβατικά δομικά υλικά (τούβλα, πέτρες κλπ), ή να μειώσουν αντίστοιχα τον απαιτούμενο αποθηκευτικό χώρο.

Στο σχήμα 2.1 σημειώνονται το σημείο τήξης και η ενθαλπία αλλαγής φάσης των υφιστάμενων PCM. Από το σημείο τήξης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για την αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας στις οικοδομικές εφαρμογές, τα υποψήφια

PCM είναι η παραφίνη, τα λιπαρά οξέα, τα ένυδρα άλατα, και τα εύτηκτα μείγματα.[1,2,3,4]



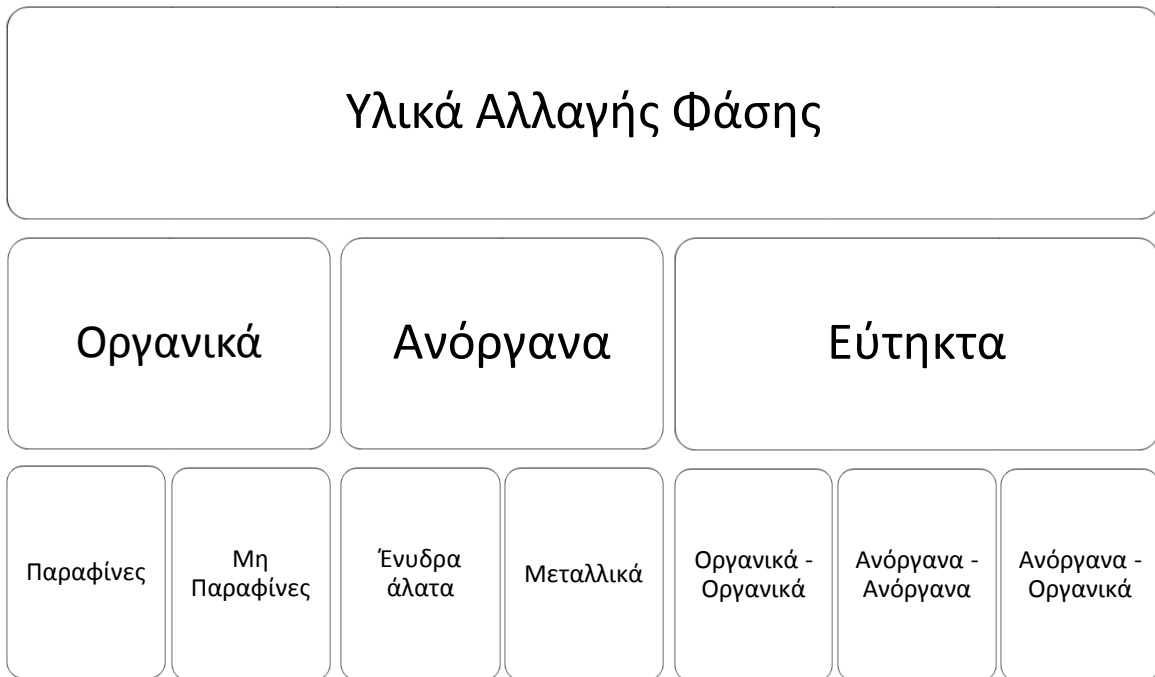
**Σχήμα 2.1:** Τύποι υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν PCM, ανάλογα με την ενθαλπία και θερμοκρασία τήξης τους[1]

## 2.2 Ταξινόμηση των PCM

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης και ειδικότερα αυτά που από στερεή κατάσταση μεταπίπτουν σε υγρή, ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες με βάση τη χημική τους σύνθεση. Αυτές είναι οι οργανικές ενώσεις, οι ανόργανες ενώσεις και τα εύτηκτα μείγματα. Η κατηγοριοποίησή τους δίνεται στο σχήμα 2.2.

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός οργανικών και ανόργανων χημικών υλικών, τα οποία μπορούν να αναγνωρισθούν ως PCM από το σημείο της θερμοκρασίας τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Ωστόσο, εκτός από το σημείο τήξης στην περιοχή λειτουργίας, η πλειοψηφία των Υλικών Αλλαγής Φάσης δεν πληροί τα κριτήρια που απαιτούνται για μια επαρκή θερμική αποθήκευση. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποιο

υλικό που να μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες, σε μια ιδανική θερμική αποθήκευση πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει όλα τα διαθέσιμα υλικά και να προσπαθήσει να αναπληρώσει με ένα κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος.



**Σχήμα 2.2:** Κατηγοριοποίηση των Υλικών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

Σε γενικές γραμμές τα ανόργανα υλικά έχουν σχεδόν διπλάσια ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ( $250-400\text{kg/dm}^3$ ) από ό,τι τα οργανικά υλικά ( $128-200\text{kg/dm}^3$ ). Λόγω των πολύ διαφορετικών θερμικών και χημικών συμπεριφορών τους, οι ιδιότητες κάθε κατηγορίας που επηρεάζει το σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με τη χρήση PCM, αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω.[2]

### 2.2.1 Οργανικά Υλικά Αλλαγής Φάσης:

Τα οργανικά PCMs χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις παραφίνες και τις μη παραφίνες. Αυτά τα υλικά καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ  $0^\circ\text{C}$  και περίπου  $200^\circ\text{C}$ . Λόγω των ομοιοπολικών δεσμών που υπάρχουν σε αυτά, τα περισσότερα δεν είναι σταθερά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα οργανικά PCM τήκονται και



στερεοποιούνται επανειλημμένα χωρίς διαχωρισμό φάσης και συνακόλουθη υποβάθμιση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Μπορούν επίσης να κρυσταλλωθούν με μικρή ή σχεδόν μηδενική υπερψύξη (supercooling) και συνήθως δεν είναι καθόλου διαβρωτικά. Δυστυχώς όμως εμφανίζουν χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας (περίπου 0,2 W/mK), πράγμα που περιορίζει τις εφαρμογές τους.

Ακόμη στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζουν πυκνότητα, μικρότερη από 1000 kg/m<sup>3</sup> και επομένως μικρότερη από την πυκνότητα των περισσότερων ανόργανων υλικών που θα εξετάσουμε πιο κάτω. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, με εξαίρεση τις σάκχαρο-αλκοόλες, τα οργανικά υλικά να έχουν συνήθως μικρότερες ενθαλπίες τήξης ανά όγκο σε σύγκριση με τα ανόργανα.

Τα σημαντικότερα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης είναι οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες, οι λιπαρές αλκοόλες, καθώς και μείγματα αυτών. Από τις παραπάνω οργανικές ενώσεις, την πρώτη θέση στις κτιριακές εφαρμογές έχουν οι παραφίνες. Έπονται τα λιπαρά οξέα και σε μικρότερο βαθμό εξετάζεται η χρήση των υπόλοιπων ενώσεων.[1,2,5]

### 2.2.1.1 Παραφίνες

Οι παραφίνες είναι ενώσεις που ανήκουν στη οικογένεια των κορεσμένων υδρογονανθράκων, με χημικό μοριακό τύπο C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>, όπου n ο αριθμός των ατόμων άνθρακα που περιέχονται στο μόριο κάθε ένωσης.

Οι κηρώδεις παραφίνες αποτελούνται από ένα μείγμα κυρίως ευθείας αλυσίδας n-αλκανίων CH<sub>3</sub>-(CH<sub>2</sub>)-CH<sub>3</sub>. Η κρυστάλλωση της αλυσίδας (CH<sub>2</sub>) ελευθερώνει μια μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Η θερμοκρασία τήξεως και η λανθάνουσα θερμότητα είναι ανάλογες της τιμής του n, δηλαδή όσο υψηλότερη είναι η τιμή του n τόσο υψηλότερη είναι και η θερμοκρασία τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα. Οι παραφίνες θεωρούνται υλικά αποθήκευσης θερμότητας σύντηξης, λόγω της διαθεσιμότητάς τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, και είναι εύκολα διαθέσιμες από πολλούς κατασκευαστές.

Παρ' όλα αυτά εξαιτίας του κόστους, μόνο οι τεχνητές παραφίνες μπορούν να



χρησιμοποιηθούν ως PCM σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, λιγότερο ακριβές από τα ένυδρα άλατα και δεν παρουσιάζουν πρόβλημα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Είναι χημικά αδρανείς και σταθερές κάτω από τους 500°C και παρουσιάζουν μικρές μεταβολές όγκου κατά την τήξη τους. Γι' αυτές τους τις ιδιότητες, τα συστήματα που χρησιμοποιούν παραφίνες, έχουν συνήθως πολύ μεγάλο κύκλο ψύξης-τήξης, δηλαδή παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμιά υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους.

Εκτός από ορισμένα θετικά χαρακτηριστικά των παραφινών, όπως η συμβατική τήξη και οι καλές ιδιότητες των πυρήνων, εμφανίζουν και κάποιες ανεπιθύμητες ιδιότητες, όπως: η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η μη-συμβατότητα με πλαστικά δοχεία αποθήκευσης και η μερική αναφλεξιμότητα. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες ενέργειες μπορούν εν μέρει να αντιμετωπισθούν με ελαφρά τροποποίηση του κεριού παραφίνης και της αποθηκευτικής μονάδας.

Στο παρακάτω πίνακα 2.1 δίνονται παραφίνες που έχουν μελετηθεί κατά καιρούς μαζί με το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξεως. Μπορεί να σημειωθεί ότι οι πιο μελετημένες μορφές παραφινών έχουν θερμοκρασία τήξης στην περιοχή από 45°C έως 60°C.

Παραφίνη	Σημείο πήξης/ εύρος (°C)	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Ομάδα
6106	42–44	189	I
P116	45–48	210	I
5838	48–50	189	I
6035	58–60	189	I
6403	62–64	189	I
6499	66–68	189	I

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη

**Πίνακας 2.1:** Φυσικές ιδιότητες κάποιων παραφινών[2]

Αριθμός ατόμων άνθρακα	Σημείο Τήξης°C	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Ομάδα
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28	244	I
19	32	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη

**Πίνακας 2.2:** Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Παραφίνες[2]

### 2.2.1.2 Μη-παραφίνες

Οι οργανικές μη-παραφίνες είναι τα πιο πολυάριθμα υλικά αλλαγής φάσης με εξαιρετικά ποικίλες ιδιότητες. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά έχει τις δικές του ιδιότητες σε αντίθεση με τις παραφίνες, οι οποίες έχουν πολύ παρόμοιες ιδιότητες. Αυτή είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υποψηφίων υλικών για αποθήκευση αλλαγής φάσης. Αυτά τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε περαιτέρω ομάδες των λιπαρών οξέων και άλλων οργανικών μη-παραφινών όπως οι εστέρες, οι αλκοόλες, οι γλυκόλες, κλπ. Αυτά τα υλικά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, φλόγες ή οξειδωτικούς παράγοντες. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών υλικών είναι τα ακόλουθα: η υψηλή

θερμότητα τήξης, η ευφλεκτότητα, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, τα χαμηλά σημεία ανάφλεξης, το διαφορετικό επίπεδο τοξικότητας, και η αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές τιμές θερμοκρασίας τήξης σε σύγκριση με αυτές των παραφινών. Τα λιπαρά οξέα επίσης ψύχονται χωρίς υπέρψυξη και γενικά θεωρούνται καλά PCM. Ο γενικός τύπος που περιγράφει όλα τα λιπαρά οξέα δίδεται από τον τύπο:  $CH_3(CH_2)_{2n} \cdot COOH$ . Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους ωστόσο είναι το κόστος τους, το οποίο είναι 2-2,5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο της τεχνικής παραφίνης. Επιπλέον είναι ήπια διαβρωτικά. Μερικά λιπαρά οξέα παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας και παρατίθενται στον πιο κάτω πίνακα 2.3.

Υλικό	Χημικός τύπος	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Ομάδα
Acetic acid	$CH_3COOH$	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	$H(OC_2H_2)_n \cdot OH$	20–25	146	I
Capric acid	$CH_3(CH_2)_8 \cdot COOH$	36	152	–
Eladic acid	$C_8H_7C_9H_{16} \cdot COOH$	47	218	I
Lauric acid	$CH_3(CH_2)_{10} \cdot COOH$	49	178	II
Pentadecanoic acid	$CH_3(CH_2)_{13} \cdot COOH$	52.5	178	–
Tristearin	$(C_{17}H_{35}COO)_3 C_3 H_5$	56	191	I
Myristic acid	$CH_3(CH_2)_{12} \cdot COOH$	58	199	I
Palmatic acid	$CH_3(CH_2)_{14} \cdot COOH$	55	163	I
Stearic acid	$CH_3(CH_2)_{16} \cdot COOH$	69.4	199	I
Acetamide	$CH_3CONH_2$	81	241	I
Methyl fumarate	$(CHCO_2NH_3)_2$	102	242	I

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη  
**Πίνακα 2.3:** Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Λιπαρά οξέα[2]





Στον παρακάτω πίνακα 2.4 δίνονται οι μη-παραφίνες που αναφέρθηκαν παραπάνω μαζί με το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξεως.

Υλικό	Σημείο τήξης (°C)	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Ομάδα
Formic acid	7.8	247	III
Caprylic acid	16.3	149	-
Glycerin	17.9	198.7	III
D-Lactic acid	26	184	I
Methyl palmitate	29	205	II
Camphenilone	39	205	II
Docasyl bromide	40	201	II
Caprylone	40	259	II
Phenol	41	120	III
Heptadecanone	41	201	II
1-Cyclohexyloctadecane	41	218	II
4-Heptadecanone	41	197	II
p-Joluidine	43.3	167	-
Cyanamide	44	209	II
Methyl eicosanate	45	230	II
3-Heptadecanone	48	218	II
2-Heptadecanone	48	218	II
Hydrocinnamic acid	48.0	118	-
Cetyl alcohol	49.3	141	-
a-Nepthylamine	50.0	93	-
Camphene	50	238	III
O-Nitroaniline	50.0	93	-
9-Heptadecanone	51	213	II



Thymol	51.5	115	-
Methyl behenate	52	234	-
Diphenyl amine	52.9	107	-
p-Dichlorobenzene	53.1	121	-
Oxolate	54.3	178	-
Hypophosphoric acid	55	213	II
O-Xylene dichloride	55	121	-
b-Chloroacetic acid	56	147	II
Chloroacetic acid	56	130	III
Nitro naphthalene	56.7	103	-
Trimyristin	31-57	201-213	I
Heptadecanoic acid	60.6	189	II
a-Chloroacetic acid	61.2	13	-
Bee wax	61.88	177	II
Bees wax	61.8	177	II
Glyolic acid	63.0	109	-
Glycolic acid	63	109	-
p-Bromophenol	63.5	86	-
Azobenzene	67.1	121	-
Acrylic acid	68.	115	-
Dinto toluent (2,4)	70.0	111	-
Phenylacetic acid	76.7	102	-
Thiosinamine	77.0	140	-
Bromcamphor	77	144	-
Durene	79.3	156	-
Benzylamine	78.0	174	-
Methyl brombrenzoate	81	126	-



Alpha naphthol	96	163	-
Glutaric acid	97.5	156	-
p-Xylene dichloride	100	138.7	-
Catechol	104.3	207	III
Quinone	115	171	II
Acetanilide	118.8	222	II
Succinic anhydride	119	204	II
Benzoic acid	121.7	142.8	III
Stibene	124	167	-
Benzamide	127.2	169.4	III

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη

**Πίνακας 2.4:** Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Μη παραφίνες[2]

## 2.2.2 Ανόργανα Υλικά Αλλαγής Φάσης

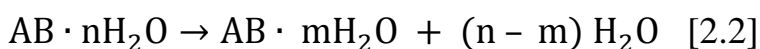
Στα ανόργανα υλικά κατατάσσονται τα ένυδρα άλατα και τα μεταλλικά PCM. Αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης δεν υπερψύχονται αισθητά και η θερμότητα τήξης τους δε φθίνει κατά την διάρκεια της κυκλικής αλλαγής φάσης τους.

### 2.2.2.1 Ένυδρα Άλατα

Ένυδρα άλατα είναι τα άλατα, τα οποία συγκρατούν ορισμένο αριθμό μορίων νερού (κρυσταλλικό νερό) για το σχηματισμό του κρυσταλλικού τους πλέγματος με γενικό τύπο:

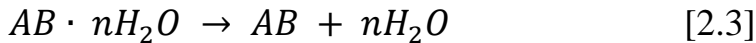


Η μετατροπή φάσης στερεού-υγρού στα ένυδρα άλατα είναι στην πραγματικότητα η απομάκρυνση των μορίων νερού του άλατος. Αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με τήξη ή ψύξη. Κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης ένα ένυδρο άλας τήκεται συνήθως σε ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού, δηλαδή:



Εκτός όμως από την πιο πάνω μορφή, το άλας μπορεί να αφυδατωθεί (άνυδρο άλας)

εντελώς και να έχουμε την πιο κάτω αντίδραση :



Παρατηρούμε δηλαδή ότι στο σημείο τήξεως οι κρύσταλλοι ένυδρου άλατος διαχωρίζονται σε ένα λιγότερο ένυδρο άλας και νερό ή σε ένα άνυδρο άλας και νερό. Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι εκείνο της ανομοιόμορφης τήξης, που προκαλείται από το γεγονός ότι το νερό που απελευθερώνεται κατά την κρυστάλλωση δεν είναι αρκετό για την διάλυση όλου του στερεού υπολείμματος. Εξαιτίας της διαφοράς στην πυκνότητα που προκύπτει κατά την τήξη, το λιγότερο ένυδρο άλας (ή το άνυδρο άλας) παραμένει στο κάτω μέρος του δοχείου σχηματίζοντας ίζημα.

Τα ένυδρα άλατα αποτελούν την πιο σημαντική κατηγορία PCM, η οποία έχει μελετηθεί εκτεταμένα για τη χρήση της σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας, λόγω του χαμηλού τους κόστους και της ευρείας διαθεσιμότητάς τους. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι: (α) υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης ανά μονάδα όγκου, (β) η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από αυτή των παραφινών) και (γ) οι μικρές μεταβολές του όγκου κατά την διάρκεια της τήξης. Δεν είναι πολύ διαβρωτικά, είναι ελαφρά τοξικά, ενώ είναι συμβατά με τα πλαστικά. Αρκετά ένυδρα άλατα είναι αρκετά φθηνά για χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας.

Κατά την τήξη των αλάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε τρεις συμπεριφορές:

- (i) **Η ομοιόμορφη τήξη:** Συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυτό στο νερό στην θερμοκρασία τήξης.
- (ii) **Η ανομοιόμορφη τήξη:** Συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας δεν είναι εντελώς διαλυτό στο νερό στην θερμοκρασία τήξης.
- (iii) **Η σχετικά ομοιόμορφη τήξη:** Συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυτό στο νερό στην θερμοκρασία τήξης και συνεπώς δεν εμφανίζεται διαχωρισμός φάσεων.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην χρήση ένυδρων αλάτων ως PCM, τα οποία κρίνονται κατάλληλα για χρήση σε θερμική αποθήκευση, είναι ότι τήκονται ανομοιόμορφα. Καθώς τα  $n$  μόρια του νερού ενυδάτωσης δεν επαρκούν για να διαλύσουν ένα μόριο άλατος, το προκύπτον διάλειμμα είναι υπερκορεσμένο στην θερμοκρασία τήξεως. Το στερεό άλας έχοντας μεγαλύτερη πυκνότητα κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης και δεν μπορεί να αναμιχθεί με το νερό κατά τη διάρκεια της αντίστροφης διαδικασίας της ψύξης. Αυτό οδηγεί σε μια μη αναστρέψιμη διαδικασία τήξης-ψύξης των ένυδρων αλάτων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση με κάθε κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης.

Ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι η υπέρψυξη (supercooling). Στη θερμοκρασία τήξης το ποσοστό σχηματισμού πυρήνων είναι γενικά πολύ χαμηλό. Για να επιτευχθεί ένα λογικό ποσοστό σχηματισμού πυρήνων το διάλυμα πρέπει να υπερψύχεται και συνεπώς η ενέργεια αντί να αποβάλλεται στη θερμοκρασία τήξης, αποβάλλεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ακόμη ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ένυδρα άλατα είναι το χαρακτηριστικό τους να έχουν μικρότερο αριθμό μόρια νερού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης. Προσθέτοντας χημικές ουσίες μπορούμε να αποτρέψουμε την πυρήνωση των κατώτερων ένυδρων αλάτων, η οποία κατά προτίμηση αυξάνει τη διαλυτότητα των κατώτερων ένυδρων αλάτων περισσότερο από τα αρχικά ένυδρα άλατα με μεγαλύτερο αριθμό μορίων νερού.

Το πρόβλημα της ανομοιόμορφης τήξης μπορεί να αντιμετωπιστεί με ένα από τους ακόλουθους τρόπους :

- Μηχανική ανάδευση
- Συσκευάζοντας τα PCM (encapsulating) ώστε να μειωθεί το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων
- Προσθήκη πτητικών ουσιών, οι οποίες κρατούν σε αναστολή τα στερεά άλατα.
- Χρήση πρόσθετου νερού, έτσι ώστε οι τηκόμενοι κρύσταλλοι να μην παράγουν υπερκορεσμένο διάλυμα
- Τροποποιώντας τη χημική σύνθεση του συστήματος και κάνοντας το ανομοιόμορφο μείγμα ομοιόμορφο.

Ο παρακάτω πίνακας 2.5 παρέχει μια λίστα των ένυδρων αλάτων που έχουν μελετηθεί, μαζί με το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης.[2,6]

Υλικό	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Ομάδα*
$K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$	14.0	109	II
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	21.0	105	II
$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25.5	148	II
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	27.0	105	II
$CaCl_2 \cdot 12H_2O$	29.8	174	I
$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	30.0	296	I
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	30	189	I
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32.0	267	II
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32.4	241	II
$KFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	33	173	I
$CaBr_2 \cdot 6H_2O$	34	138	II
$LiBr_2 \cdot 2H_2O$	34	124	I
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	36.1	134	III
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	37.0	223	I
$Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	37.1	115	II
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	40.0	279	II
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	40.7	170	I
$KF \cdot 2H_2O$	42	162	III
$MgI_2 \cdot 8H_2O$	42	133	III
$CaI_2 \cdot 6H_2O$	42	162	III
$K_2HPO_4 \cdot 7H_2O$	45.0	145	II
$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	45	110	III
$Mg(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	47.0	142	II
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	47.0	153	I
$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	47	155	I
$Na_2SiO_3 \cdot 4H_2O$	48	168	II
$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	48	99	II
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48.5	210	II

$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	48.5	202	II
$Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	51	104	I
$Zn(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	55	68	III
$FeCl_3 \cdot 2H_2O$	56	90	I
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	57.0	169	II
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	58.0	151	II
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	58.0	178	II
$CH_3COONa \cdot 3H_2O$	58.0	265	II
$Fe(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	60.5	126	–
$NaAl(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$	61.0	181	I
$NaOH \cdot H_2O$	64.3	273	I
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	65.0	190	–
$LiCH_3COO \cdot 2H_2O$	70	150	II
$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	72	155	I
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	265	II
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	89.9	167	II
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	91	184	II
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	117	167	I

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη

**Πίνακας 2.5:** Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα των ένυδρων αλάτων[2]

### 2.2.2.2 Μεταλλικά PCM

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα χαμηλής θερμοκρασίας τήξης μέταλλα και τα εύτηκτα μέταλλα. Τα υλικά αυτά δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς σαν κατηγορία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας λόγω του υψηλού ειδικού βάρους που εμφανίζουν. Ωστόσο, όταν απαιτούνται υλικά με μεγάλη συγκέντρωση όγκου, τότε θα επιλεγθούν ως τα καταλληλότερα εξαιτίας της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας τήξης ανά μονάδα όγκου.

Η βασική τους διαφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα PCM είναι ότι λόγω της υψηλής θερμικής τους αγωγιμότητας δε χρειάζονται πρόσθετες κατασκευές για βελτίωσή της οπότε θα αυξανόταν και το βάρος της κατασκευής.

Τα γενικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά είναι:

- Χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους.
- Υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκο.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα.
- Χαμηλή ειδική θερμότητα.
- Σχετικά χαμηλή πίεση ατμών.[2]

Υλικό	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	Ομάδα
Gallium–gallium antimonv eutectic	29.8	–	–
Gallium	30.0	80.3	I
Cerrolow eutectic	58	90.9	–
Bi–Cd–In eutectic	61	25	–
Cerrobend eutectic	70	32.6	I
Bi–Pb–In eutectic	70	29	–
Bi–In eutectic	72	25	–
Bi–Pb–tin eutectic	96	–	–
Bi–Pb eutectic	125	–	–

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη  
**Πίνακας 2.6:** Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα μεταλλικών ενώσεων [2]

### 2.2.3 Εύτηκτα μείγματα

Τα εύτηκτα μείγματα υλικών αλλαγής φάσης αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων συστατικών οργανικών, ανόργανων ή και των δύο, καθένα από τα οποία τήκεται και στερεοποιείται ομοιόμορφα. Τέτοιου είδους μείγματα σχεδόν πάντα τήκονται και στερεοποιούνται χωρίς διαχωρισμό φάσεων, δεδομένου ότι στερεοποιούνται σε ένα ιδιαίτερο μείγμα κρυστάλλων, αφήνοντας ελάχιστη δυνατότητα στα συστατικά να διαχωριστούν.

Το σημείο τήξης ενός σημαντικού αριθμού εύτηκτων μπορεί να προσαρμοστεί σε σχεδόν οποιαδήποτε επιθυμητή θερμοκρασία σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Θεωρείται δε ότι συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα.



Εύτηκτα μείγματα δίνονται στον πίνακα 2.7:

Υλικό	Σύνθεση (κ.β.%)	Σημείο τήξης °C	Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/Kg)	Ομάδα*
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	45 + 55	14.7	140	–
Triethylolthane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160	I
$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2 + \text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	34 + 66	24	147.7	–
$\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50 + 50	25	95	II
$\text{CH}_3\text{CONH}_2 + \text{NH}_2\text{CONH}_2$	50 + 50	27	163	II
Triethylolthane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218	I
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	47 + 53	30	136	–
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_2\text{CONH}_2$	40 + 60	30	200.5	I
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	53 + 47	46	95	II
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3$	61.5 + 38.5	52	125.5	I
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58.7 + 41.3	59	132.2	I
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50 + 50	59.1	144	–
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	53 + 47	61	148	–
$\text{CH}_3\text{CONH}_2 + \text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$	50 + 50	65	218	–
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	59 + 41	66	168	I
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4	–
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{Br}$	66.6 + 33.4	76	151	II
$\text{LiNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NaNO}_3$	25 + 65 + 10	80.5	113	–
$\text{LiNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{KNO}_3$	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116	–
$\text{LiNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$	27 + 68 + 5	81.6	108	–

\*Ομάδα I: Πολλά υποσχόμενη, Ομάδα II: Υποσχόμενη, Ομάδα III: Αδιάφορη

**Πίνακας 2.7:** Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα τήξης: Εύτηκτα[2]

Τα εύτηκτα μείγματα παρουσιάζουν συνήθως τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ δεν συγκεντρώνουν παράλληλα και τα μειονεκτήματά τους. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν υψηλό σημείο τήξης παρόμοιο με των καθαρών υλικών και η ογκομετρική πυκνότητα θερμικής αποθήκευσης είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή των οργανικών ενώσεων.

Βασικό μειονέκτημα είναι η έλλειψη υφιστάμενων διαθέσιμων δεδομένων δοκιμών για τις θερμο-φυσικές τους ιδιότητες καθώς η χρήση των υλικών αυτών στις εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης είναι πολύ πρόσφατη. Οι πληροφορίες αυτές θεωρούνται απαραίτητες για την πιστοποίηση των μιγμάτων για τη μακροπρόθεσμη απόδοση των συστημάτων θερμικής ενέργειας. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγεται και το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι περίπου δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερο από τα οργανικά και τα ανόργανα PCM.[2,7]

## 2.3 Σύγκριση των διαφορετικών κατηγοριών PCM

Ενώ τα PCM παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, υπάρχει μια σειρά από προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν.

Κατηγορία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οργανικά PCM	<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά</li><li>◆ Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού</li><li>◆ Μικρή ή και καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling</li><li>◆ Χημική και θερμική σταθερότητα</li><li>◆ Χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες των PCM</li><li>◆ Παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα μη οργανικά</li><li>◆ Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερος από τα μη οργανικά</li><li>◆ Αναφλεξιμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (~200°C)</li><li>◆ Πυκνότητα χαμηλότερη από τα μη οργανικά</li></ul>
Ανόργανα PCM	<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης σε σύγκριση με τα οργανικά υλικά</li><li>◆ Μη αναφλέξιμα</li><li>◆ Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά PCM</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Διαβρωτικά, απαραίτητη η αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία</li><li>◆ Εμφάνιση του φαινομένου supercooling</li><li>◆ Διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή η δημιουργία ιζήματος</li><li>◆ Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση</li><li>◆ Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά υλικά</li><li>◆ Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία</li></ul>
Εύτηκτα	<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Υψηλό σημείο τήξης</li><li>◆ Υψηλή ογκομετρική πυκνότητα θερμικής αποθήκευσης</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Έλλειψη υφιστάμενων διαθέσιμων δεδομένων δοκιμών για τις θερμοφυσικές ιδιότητες</li></ul>

**Πίνακας 2.8:** Σύγκριση των διαφορετικών κατηγοριών PCM

Στον παραπάνω πίνακα 2.8 συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των PCM που αναφέρθηκαν παραπάνω.[2,8]

## 2.4 Κριτήρια επιλογής των Υλικών Αλλαγής Φάσης

Είναι προφανές ότι προκειμένου ένα PCM να χρησιμοποιηθεί εμπορικά για κάποια εφαρμογή, θα πρέπει να ικανοποιεί κάποια κριτήρια και να επιδεικνύει συγκεκριμένες θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες. Επιπλέον οικονομικά κριτήρια, όπως το κόστος και διαθεσιμότητα του υλικού θα πρέπει να εξεταστούν. Οι κύριες ιδιότητες που θα πρέπει να ικανοποιούνται με έμφαση στην χρήση των PCM στα κτίρια είναι οι παρακάτω:

### Θερμοδυναμικές ιδιότητες

- Θερμοκρασία τήξης στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου έτσι ώστε ο απαιτούμενος όγκος του δοχείου, που αποθηκεύει μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, να είναι ελάχιστος.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για την παροχή πρόσθετης, σημαντικής αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για στερεές και υγρές φάσεις προκειμένου να επιτευχθεί φόρτιση/ αποφόρτιση της ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης.
- Μικρές μεταβολές του όγκου κατά την αλλαγή φάσης και μικρή τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας προκειμένου να περιοριστεί το πρόβλημα αποθήκευσης.
- Σταθερή συμπεριφορά του PCM για δεδομένη αποθηκευτική ικανότητα με κάθε κύκλο τήξης/στερεοποίησης.

### Κινητικές ιδιότητες

- Υψηλή εμπύρνη αναλογία προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.
- Υψηλό ποσοστό ανάπτυξης κρυστάλλων, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ανάκτησης θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης.

### Χημικές ιδιότητες

- Χημική σταθερότητα.
- Πλήρης αναστρέψιμος κύκλος τήξης/στερεοποίησης.
- Καμία υποβάθμιση μετά από πολλούς κύκλους τήξης/στερεοποίησης.
- Καμία διαβρωτικότητα στα κατασκευαστικά υλικά.
- Αποφυγή χρήσης τοξικών, εύφλεκτων και εκρηκτικών υλικών για ασφάλεια.
- Χρήση κυρίως ανακυκλώσιμων υλικών για περιβαλλοντικούς λόγους

### Οικονομικές ιδιότητες

- Χαμηλή τιμή πώλησης, για λόγους ανταγωνιστικότητας σε σχέση με άλλα υλικά που προσφέρουν δυνατότητες αποθήκευσης θερμότητας για ψύξη και θέρμανση.
- Διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος κλίμακας.[2]

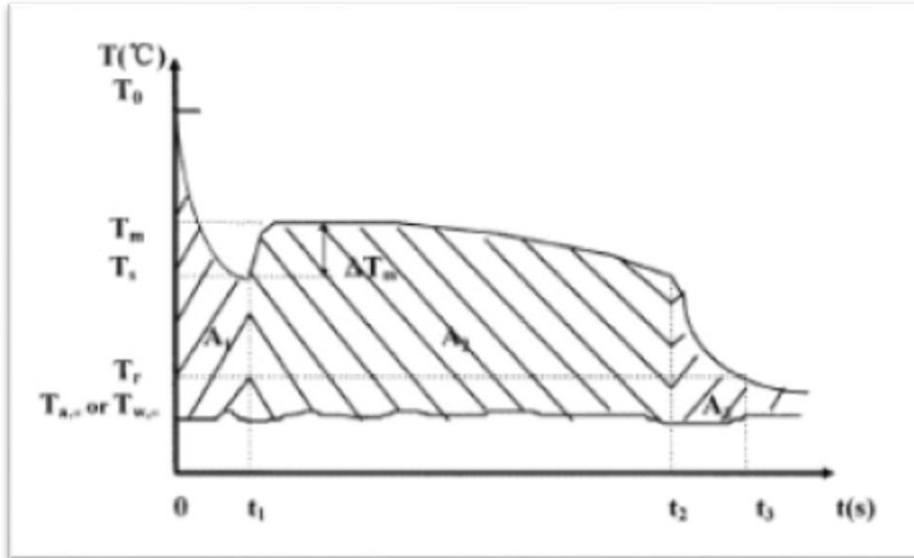
## **2.5 Προβλήματα των Υλικών Αλλαγής Φάσης**

### **2.5.1 Το φαινόμενο του supercooling**

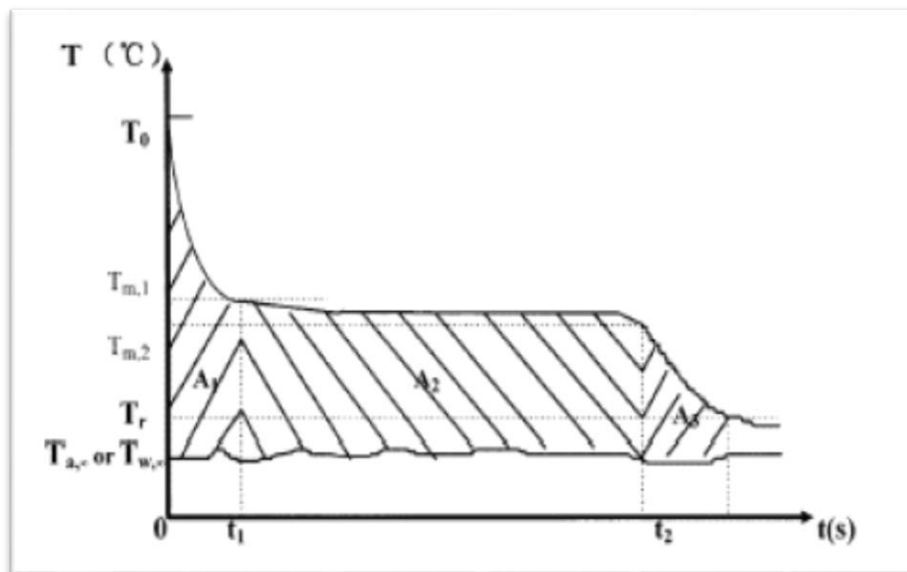
Ένα σοβαρό πρόβλημα που αφορά το σύνολο των ανόργανων PCM αλλά και μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling. Το φαινόμενο του supercooling όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου, κατά τη ψύξη ενός δείγματος PCM, όπου παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Κατά τη συνέχιση της ψύξης η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης, καθώς ακολουθεί πτώση της μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης.

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης του δείγματος τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός του supercooling. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι

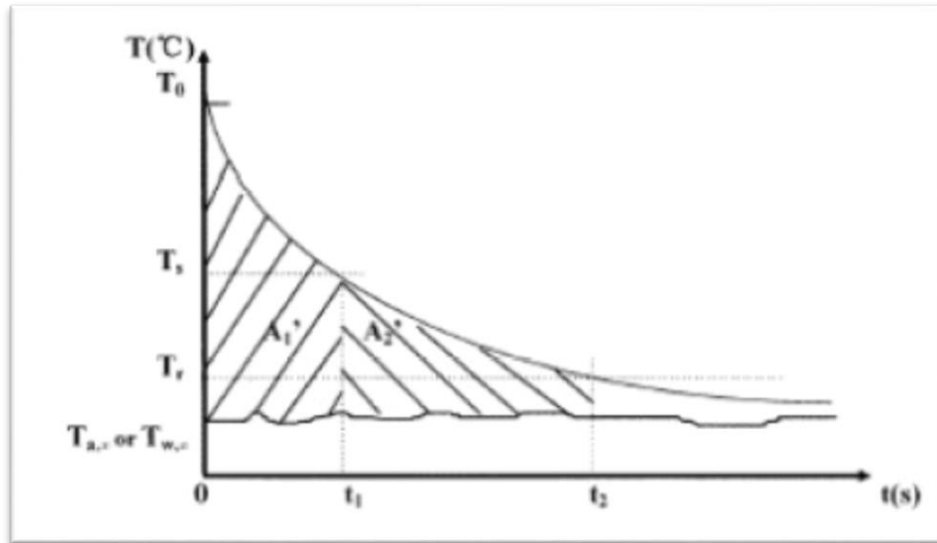
φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους όπως ο όγκος του δείγματος, η “καθαρότητα” του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης. Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα καμπυλών ψύξης με και χωρίς supercooling.



**Σχήμα 2.3:** Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού με supercooling



**Σχήμα 2.4:** Τυπική καμπύλη ψύξης υλικού χωρίς supercooling



**Σχήμα 2.5:** Καμπύλη ψύξης νερού

Το φαινόμενο μπορεί να περιοριστεί με μία από τις παρακάτω διαδικασίες, οι οποίες επιτυγχάνουν την διαδικασία δημιουργίας πυρήνων:

- Με προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης
- Με μηχανικά μέσα, όπως η χρήση δοχείου με ανώμαλη επιφάνεια τοιχωμάτων ή εναλλάκτη θερμότητας με τραχεία επιφάνεια.
- Με διατήρηση μέσα στο PCM μιας περιοχής σε χαμηλή θερμοκρασία όταν το υπόλοιπο υλικό τήκεται με θέρμανση.[2]

## 2.5.2 Το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ένυδρων αλάτων είναι ότι κατά την διάρκεια της κυκλικής φόρτισης επιτρέπεται ο σχηματισμός ενός διαφορετικού ένυδρου άλατος (είτε με λιγότερα μόρια νερού είτε τελείως αφυδατωμένο). Αυτό συντελεί στη μείωση της μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών.

Κύρια αιτία του εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ιζήματος. Το φαινόμενο συμβαίνει, λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μείγματος, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

Το πρόβλημα του διαχωρισμού των φάσεων μειώνεται κατά ένα βαθμό με κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

- Χρήση πρόσθετων που προκαλούν πύκνωση και παρεμποδίζουν την καθίζηση άνυδρου άλατος ή ένυδρου με λιγότερα μόρια νερού, διατηρώντας τα σε αιώρηση.
- Με μηχανικά μέσα όπως ανάδευση.
- Με προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, έτσι ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης και να μην δημιουργείται υπερκορεσμός.
- Με τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες για να μειωθεί ο διαχωρισμός.
- Με μετατροπή της χημικής σύστασης του συστήματος μετατρέποντάς το incongruent υλικό σε congruent.[2]

### 2.5.3 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των PCM σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών (χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων), ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο.

Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους :

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να συμβεί μεταξύ του PCM και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών, που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν τη διατήρηση των ιδιοτήτων των PCM κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα, αφορά στα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους, έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση, όταν έρχονται σε επαφή, με τα περισσότερα υλικά (μέταλλα αλλά και δομικά υλικά). Αντιθέτως τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν

διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερο διαδεδομένα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος κλπ).[2]

## 2.6 Ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στα δομικά υλικά

Ο Hawes και οι συνεργάτες του ανέφεραν ότι οι τρεις περισσότερο υποσχόμενες μέθοδοι για την ενσωμάτωση των PCM στα συμβατικά οικοδομικά υλικά ήταν η άμεση ενσωμάτωση, η εμφάνιση, και η ενθυλάκωση. Επίσης διαπίστωσαν ότι τα σημεία τήξης και κατάψυξης των PCM διέφεραν κατά ένα μικρό βαθμό όταν ενσωματώνονταν στα οικοδομικά υλικά.[9]

### 2.6.1 Άμεση Ενσωμάτωση

Η άμεση ενσωμάτωση αποτελεί ίσως την πιο απλή και οικονομική μέθοδο, καθώς δεν απαιτείται κάποιος πρόσθετος εξοπλισμός. Τα PCM, σε υγρή μορφή ή σε σκόνη, προστίθενται απευθείας σε συμβατικά δομικά υλικά όπως ο γύψος, το σκυρόδεμα και άλλα πορώδη υλικά, κατά την παραγωγή τους και έτσι σχηματίζουν σύνθετα υλικά αλλαγής φάσης με αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα θερμικής ενέργειας. Ο όγκος, ο οποίος καταλαμβάνεται από το PCM στους θύλακες του σύνθετου υλικού, είναι αρκετά μικρός για να αποτρέψει την απομόνωση του στερεού φλοιού του PCM. Η θερμότητα μεταφέρεται από το υλικό στις περιοχές του υλικού που είναι έγκλειστο το PCM, και ακολούθως στο PCM.

Οι διαρροές και η αλληλεπίδραση μεταξύ του PCM και του δομικού υλικού που έχουν παρατηρηθεί σε διάφορες εφαρμογές και διάφορες μελέτες είναι τα μεγαλύτερα προβλήματα. Αυτή η αλληλεπίδραση αν δεν προσεχτεί μπορεί να καταστρέψει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Ένα παράδειγμα της μεθόδου αυτής είναι μία πειραματική γυψοσανίδα κατασκευασμένη με άμεση ενσωμάτωση 21-22% εμπορικού grade butyl stearate (BS) κατά το στάδιο ανάμιξης στην παραγωγή παραδοσιακού γύψου.[10,11]



## 2.6.2 Εμβάπτιση

Η εμβάπτιση ή απορρόφηση, αποτελεί μία τεχνολογία, όπου τα συμβατικά οικοδομικά υλικά του κτιρίου, όπως ο γύψος, τα τούβλα ή το σκυρόδεμα, βυθίζονται σε ζεστό και τετηγμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους εσωτερικούς πόρους τους με τη βοήθεια της τριχοειδούς δράσης. Ακολούθως το πορώδες υλικό απομακρύνεται από το υγρό PCM, αφήνεται να κρυώσει και το PCM παραμένει στους πόρους του δομικού υλικού.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι καθιστά εύκολη την μετατροπή ενός απλού πάνελ σε πάνελ με PCM, καθώς η εμβάπτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί πρακτικά οποιαδήποτε ώρα και σε οποιοδήποτε σημείο. Οι Hawes και Feldman, εξέτασαν τους μηχανισμούς απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσο ανάπτυξης, και χρησιμοποιώντας σταθεροποιητές απορρόφησης του PCM στο τσιμέντο, πέτυχαν την διάχυση της επιθυμητής ποσότητας PCM. Ωστόσο, ο Schossig και οι συνεργάτες του έχουν παρατηρήσει ότι αυτή η μέθοδος ενδεχομένως να παρουσιάζει πρόβλημα διαρροής, και συνεπώς δεν είναι καλή για μακροχρόνια χρήση. Στις περιπτώσεις αυτές επομένως σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση ενός υλικού αλλαγής φάσης στο πορώδες άλλου υλικού είναι η μη αλληλεπίδραση του PCM με το υλικό και η περιορισμένη έως μηδενική μετανάστευση του από το πορώδες όταν βρίσκεται στην υγρή φάση.[10]

## 2.6.3 Συσκευασία PCM

Η χρήση των PCM απαιτεί τη χρησιμοποίηση κάποιου είδους συσκευασίας. Αυτό γίνεται με σκοπό την επίτευξη συγκράτησης της υγρής φάσης του PCM και της αποφυγής επαφής του με το περιβάλλον, καθώς κάτι τέτοιο θα μπορούσε είτε να βλάψει το περιβάλλον είτε να μεταβάλει τη σύσταση του PCM. Επιπλέον η συσκευασία χρειάζεται για να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας, αφού η επιφάνεια της εκάστοτε συσκευασίας δρα ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις προσφέρει μηχανική σταθερότητα.

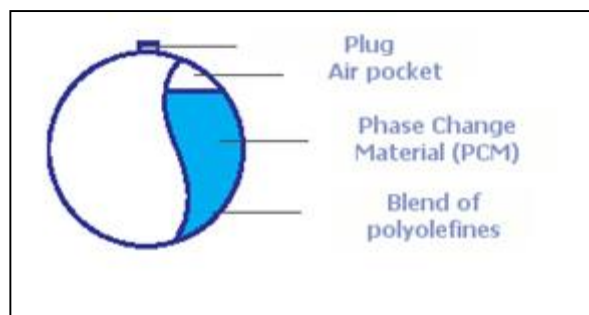
Η συσκευασία των PCM θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Να πληροί τις απαιτήσεις σε δύναμη, ευελιξία και αντοχή στη διάβρωση και στη θερμική σταθερότητα.
- Να ενεργεί ως εμπόδιο για την προστασία του PCM από τυχόν επιβλαβή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.
- Να παρέχει επαρκή επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας.
- Να παρέχει δομική σταθερότητα και εύκολο χειρισμό.

Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη συσκευασίας: η ενσωμάτωση σε κάψουλες, η οποία ανάλογα με το μέγεθος των καψουλών διακρίνεται σε μακροενσωμάτωση (macroencapsulation), μικροενσωμάτωση (microencapsulation) και νανοενσωμάτωση (nanoencapsulation) καθώς και η μαζική αποθήκευση σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας.[12,13]

### 2.6.3.1 Μακροενσωμάτωση

Η τεχνολογία όπου τα υλικά αλλαγής φάσης ενσωματώνονται σε σωλήνες, σακούλες, σφαίρες (σχήμα), πλαίσια ή άλλα δοχεία με διάμετρο μεγαλύτερη από 1cm, αποκαλείται μακροενσωμάτωση. Το κλειδί για τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι να σχεδιαστεί η μακροκάψουλα σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Οι ποσότητες που συσκευάζονται ξεκινούν από αρκετά ml και φτάνουν μέχρι και αρκετά λίτρα.



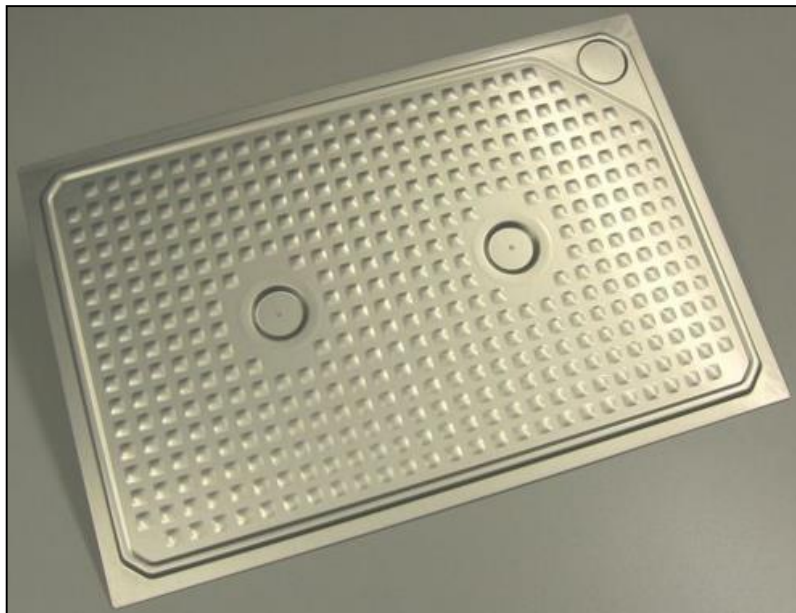
**Σχήμα 2.6:** Σφαιρικό οζίδιο γεμάτο από PCM που αναπτύχθηκε από την Cristopia[14]

Οι μακροκάψουλες είναι πολύ διαδεδομένες, επειδή τέτοιου είδους δοχεία και σάκοι είναι διαθέσιμα σε μεγάλη ποικιλία ήδη από άλλες εφαρμογές, οπότε η ενσωμάτωση των καψουλών PCM είναι σχετικά απλή, ενώ στο ίδιο δοχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί

PCM με διαφορετικό σημείο τήξης. Οι μακροκάψουλες χρησιμοποιούνται για να συγκρατήσουν την υγρή φάση του PCM από κάποια διαρροή και για να αποφύγουν αλλαγή στη σύνθεση του PCM εξαιτίας της επαφής του με το περιβάλλον.

Εάν το δοχείο είναι αρκετά άκαμπτο, οι μακροκάψουλες μπορούν να προσθέσουν μηχανική σταθερότητα στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικά δοχεία μαλακού χάλυβα, τότε αν τα εσωτερικά και τα εξωτερικά τελειώματα λάκας δεν έχουν εφαρμοστεί σωστά, η διάβρωση που μπορεί να συμβεί είναι σοβαρή και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες.

Οι μικροκάψουλες μπορούν να ενσωματωθούν στα δομικά υλικά. Η εταιρεία RUBITHERM® παράγει ένα είδος πλαισίων PCM τα οποία ονομάζονται CSM (σχήμα 2.7), κατασκευάζονται από αλουμίνιο και φέρουν μία αποτελεσματική αντιδιαβρωτική επίδραση. Σε αυτά μπορούν να προσαρμοστούν πολλά εμπορικά PCM. Με τα μακροεσωματωμένα PCM, το πρόβλημα διαρροής μπορεί να αποφευχθεί και η λειτουργία της δομής της οικοδομής μπορεί να επηρεαστεί λιγότερο.[15,16,17,18,19]

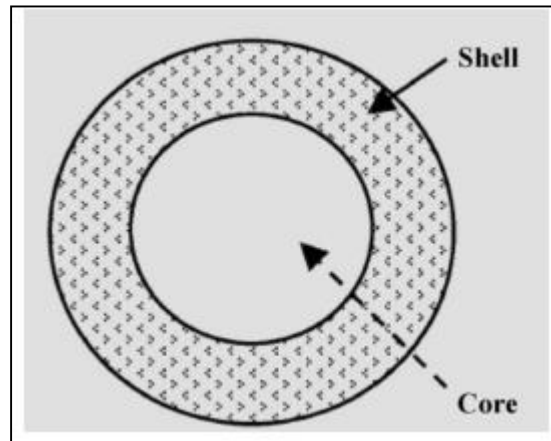


**Σχήμα 2.7:** Πλαίσιο CSM που περιέχει PCM, σχεδιασμένο από την Rubitherm[15]

### 2.6.3.2 Μικροενσωμάτωση

Η μικροενσωμάτωση αποτελεί μια τεχνολογία στην οποία μεμονωμένα σωματίδια ή σταγονίδια του στερεού ή του υγρού υλικού του PCM (πυρήνας) ενθυλακώνονται σε μια

λεπτή, σφραγισμένη και υψηλού μοριακού βάρους μεμβράνη πολυμερούς υλικού (το περίβλημα), η οποία διατηρεί το σχήμα της και αποτρέπει τη διαρροή του PCM κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Έτσι, δημιουργούνται κάψουλες διαμέτρου μικρότερης του 1cm (σχήμα 2.8) που είναι γνωστές ως μικροκάψουλες. Το σχήμα των μικροκάψουλων αυτών ποικίλει από σφαιρικό έως μεταβλητό.

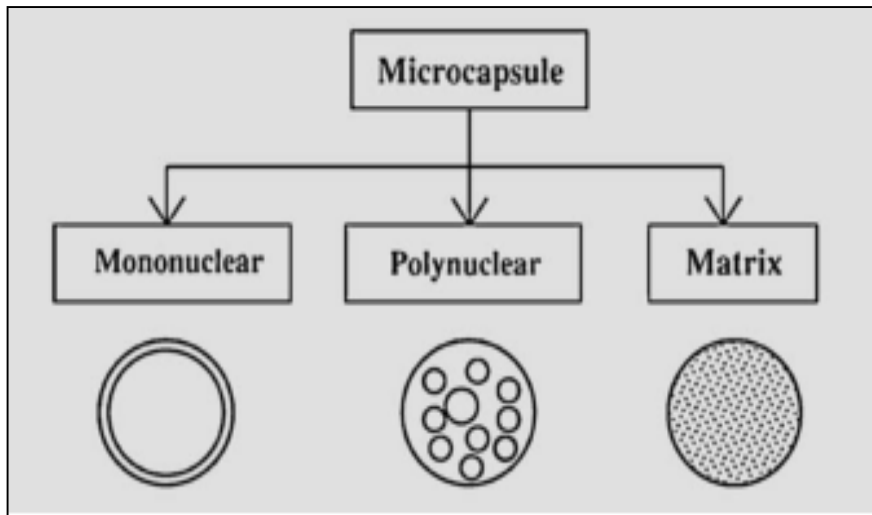


**Σχήμα 2.8:** Περιγραφή μικροκάψουλας

Και οι τρεις καταστάσεις της ύλης, δηλαδή στερεή, υγρή και αέρια, μπορούν να γίνουν μικροκάψουλες. Αυτό επιτρέπει στις μικροκάψουλες να διαχειρίζονται ακόμα και τα υγρά υλικά ως στερεά. Επίσης, οι μικροκάψουλες ανέχονται αλλαγές φάσης, συμπεριλαμβανομένων και των ογκομετρικών αλλαγών στον πυρήνα τους. Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης μεταξύ  $-10^{\circ}\text{C}$  και  $80^{\circ}\text{C}$ , είναι αυτές οι οποίες ταιριάζουν περισσότερο με τις μικροκάψουλες.

Οι κάψουλες ανάλογα με το υλικό του πυρήνα και από τη διαδικασία εναπόθεσης του κελύφους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (σχήμα 2.9):

- Μονοπύρηνες κάψουλες: έχουν το περίβλημα γύρω από τον πυρήνα.
- Πολυπύρηνες κάψουλες: περικλείουν πολλούς πυρήνες μέσα σε ένα κέλυφος.
- Πλεγματική ενθυλάκωση. Το υλικό του πυρήνα διανέμεται ομοιόμορφα μέσα στο υλικό του κελύφους.



**Σχήμα 2.9:** Τύποι των μικροκάψουλων

Οι μικροκάψουλες μπορεί να έχουν σφαιρικό σχήμα, αλλά μπορεί να πάρουν και διάφορα σχήματα ανάλογα με την περίσταση. Υπάρχουν φυσικοί και χημικοί τρόποι (πολυμερισμός) δημιουργίας για τις μικροκάψουλες. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μικροενσωμάτωσης είναι:

Οι φυσικές μέθοδοι:

- επίπεδη επίστρωση
- επίστρωση με παροχή πεπιεσμένου αέρα
- φυγόκεντρος εξώθηση
- δονητική μέθοδος μέσω ακροφυσίου
- ξήρανση με ψεκασμό

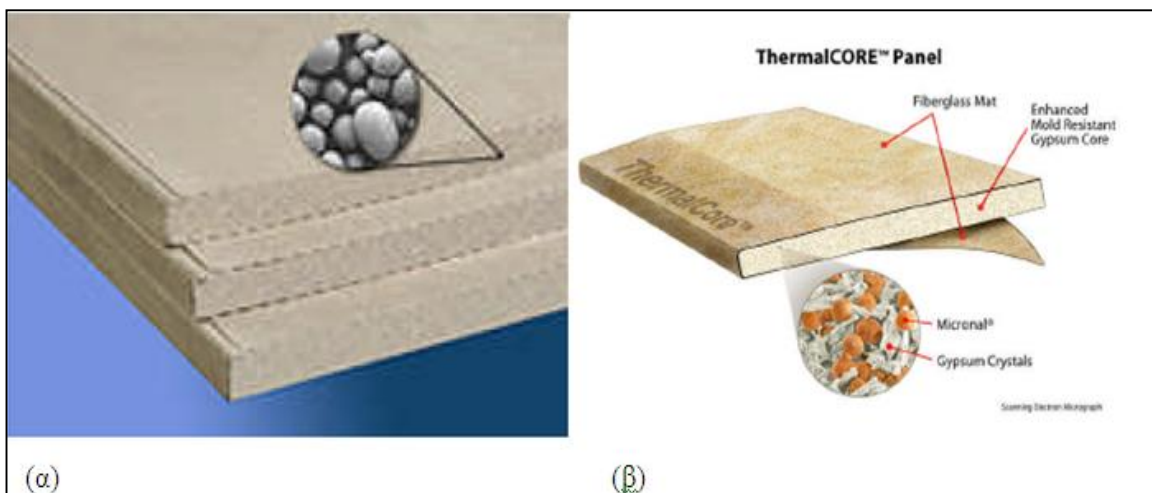
Οι χημικές μέθοδοι:

- διεπιφανειακός πολυμερισμός
- επιτόπιος πολυμερισμός
- πλεγματικός πολυμερισμός

Ο Hawlader και οι συνεργάτες του εξέτασαν την επίδραση διαφόρων παραγόντων στα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις ενός μικροενσωματωμένου PCM, όπως είναι για παράδειγμα η αποδοτικότητα της συσκευασίας, η αποθήκευση και απελευθέρωση της ενέργειας. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους απέδειξαν ότι οι μικροκάψουλες της

παραφίνης, που μελετήθηκε, παρουσιάζουν πολύ καλές προοπτικές χρήσης σε ηλιακές εφαρμογές, λόγω της μετρούμενης θερμοχωρητικότητάς τους (145-240 kJ/kg). Μερικοί ερευνητές πιστεύουν ότι οι μικροκάψουλες PCM, όταν ενσωματωθούν, ενδεχομένως να επηρεάζουν τη μηχανική αντοχή της κατασκευής. Η Cabeza και οι συνεργάτες της σχεδίασαν δύο θαλάμους από σκυρόδεμα με το ίδιο σχήμα και μέγεθος, το ένα με μικροκάψουλες PCM, το οποίο ονομάστηκε σκυρόδεμα Morcon, και το άλλο με συμβατικό σκυρόδεμα, ώστε να διαπιστωθεί η πιθανότητα χρήσης μικροκάψουλων PCM σε οικοδομικά υλικά για την επίτευξη σημαντικής διατήρησης ενέργειας, χωρίς ταυτόχρονα σημαντική μείωση της μηχανικής αντοχής των κατασκευών από σκυρόδεμα. Διαπίστωσαν ότι η αντοχή του σκυροδέματος Morcon σε θλίψη είναι πάνω από 25 MPa και σε εφελκυσμό πάνω από 6 MPa, χωρίς να διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα για το PCM μετά από έξι μήνες λειτουργίας, τα οποία ήδη είχαν ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για γενικούς κατασκευαστικούς σκοπούς.

Ωστόσο, οι εφαρμογές των μικροκάψουλων PCM εξακολουθούν να χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση όσο αφορά στην ασφάλεια, π.χ. στην ικανότητα επιβράδυνσης της φωτιάς, κ.α. Πρόσφατα, η National Gypsum παρήγαγε ένα είδος γυψοσανίδων τοίχου με Micronal® PCM που παράγεται από τη εταιρεία BASF. Αυτού του είδους οι γυψοσανίδες αποκαλούνται γυψοσανίδες National Gypsum ThermalCORE, (σχήμα 2.10). Το σημείο τήξης και η δυνατότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι 23°C και 22 BTU/ft<sup>2</sup> αντίστοιχα.[20,21,22,23]



**Σχήμα 2.10:** (α) Γυψοσανίδα με Micronal® PCM (από την BASF) (β) Γυψοσανίδα αλλαγής φάσης ThermalCORE (από την National Gypsum)

### 2.6.3.3 Νανοενσωμάτωση (nanoencapsulation)

Ο Fang και οι συνεργάτες του μελέτησαν την ενσωμάτωση PCM σε νανοκάψουλες και συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν το n-τετραδεκάνιο ως υλικό αλλαγής φάσης, για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Εφάρμοσαν τη μέθοδο του πολυμερισμού για την ετοιμασία των νανοκαψουλών ως υλικό αλλαγής φάσης, χρησιμοποιώντας το n-τετραδεκάνιο ως πυρήνα, ενώ η ουρία και η φορμαλδεΰδη χρησιμοποιήθηκαν για τον σχηματισμό του κελύφους. Η μορφολογία τους παρατηρήθηκε από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM- scanning electronic microscope). Οι θερμικές ιδιότητες διερευνήθηκαν με τη μέθοδο διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (DSC) και με θερμοσταθμική ανάλυση (TGA-Thermogravimetry analysis). Η ανάλυση SEM, έδειξε ότι οι νανοκάψουλες είχαν γενικά μέγεθος 100nm περίπου και το υλικό του πυρήνα ήταν καλά έγκλειστο. Η ανάλυση DSC έδειξε ότι η περιεκτικότητα της μάζας του n-τετραδεκανίου ήταν μέχρι 60% η οποία οδήγησε σε μια υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης 134,16 kJ/kg. Η θερμοσταθμική ανάλυση (TGA ) έδειξε ότι η θερμική σταθερότητα των νανοκαψουλών θα μπορούσε να βελτιωθεί με τη χρήση πρόσθετων όπως NaCl στην διαδικασία του πολυμερισμού. Οι νανοκάψουλες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και να συνεισφέρουν στην ενίσχυση του ρυθμού της μεταφοράς θερμότητας, γι' αυτό και σήμερα συγκεντρώνουν μεγάλο ενδιαφέρον.[22]

### 2.6.3.4 Μαζική αποθήκευση (Bulk systems)

Τα συστήματα μαζικής αποθήκευσης αναφέρονται στην ενσωμάτωση PCM σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας, οι οποίες είναι παρόμοιες σε σχεδιασμό με τις υπάρχουσες δεξαμενές που ήδη χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας, αλλά με κάποιες σημαντικές διαφορές. Το πιο βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων μαζικής αποθήκευσης PCM είναι η ανάγκη για μία πιο εκτεταμένη μετάδοση θερμότητας από αυτή που υπάρχει στις κοινές δεξαμενές χωρίς PCM. Ο λόγος γι αυτή την ανάγκη είναι ότι η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας στο PCM, είναι υψηλότερη σε σύγκριση με άλλα μέσα αποθήκευσης. Η περιοχή μετάδοσης θερμότητας σε σχέση με τις άλλες μεθόδους είναι μικρότερη, αλλά εξακολουθεί να απαιτεί ένα υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας. Οι διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται

ευρέως είναι η εισαγωγή περυγίων ή η χρήση υψηλής αγωγιμότητας σωματιδίων μεταλλικών κατασκευών, ινών, στην πλευρά του PCM, εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής ή χρήση της μεθόδου του κυλιόμενου κυλίνδρου.

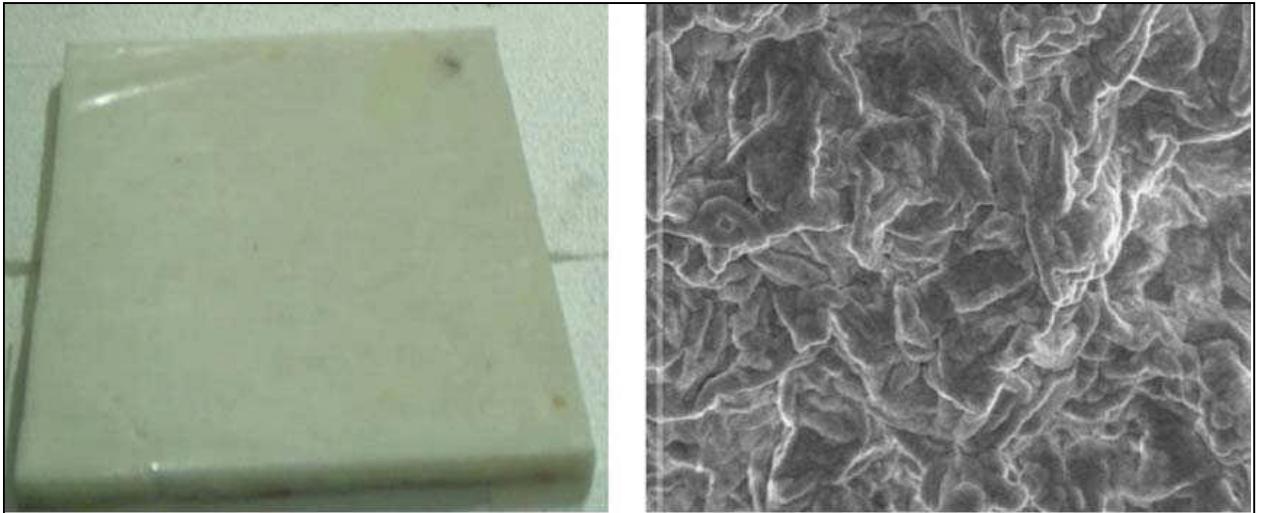
Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο στο οποίο πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σχετικά με τη μαζική αποθήκευση, είναι η πίεση του αέρα στη δεξαμενή, χωρίς την οποία το ένυδρο άλας θα απορροφούσε το περιεχόμενο νερό, καταλήγοντας έτσι σε μη ολοκληρωμένη απελευθέρωση θερμότητας με την αποκρυστάλλωση. Από την άλλη μεριά όμως είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το κόστος του συστήματος κατά τη μαζική αποθήκευση είναι αρκετά πιο χαμηλό, μιας και η δυσκολία συσκευασίας του PCM είναι πολύ πιο μικρή.[24,25]

#### **2.6.4 PCM σταθεροποιημένου σχήματος**

Τα PCM σταθεροποιημένου σχήματος- SSPCM (Shape-Stabilized PCM), όπου το PCM (όπως είναι η παραφίνη) διασπείρεται σε ένα άλλο υλικό φάσης υποστήριξης (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας-HDPE, κ.α.) για το σχηματισμό ενός σταθερού σύνθετου υλικού, προσελκύουν όλο και περισσότερο την προσοχή, εξαιτίας της μεγάλης εμφανούς θερμοχωρητικότητας, της κατάλληλης θερμικής αγωγιμότητας, της ικανότητας διατήρησης σταθερού του σχήματος του PCM κατά τη διεργασία αλλαγής φάσης, όπως και εξαιτίας της καλής απόδοσης πολλαπλών θερμικών κύκλων για μία μεγάλη περίοδο. Επειδή η σύσταση του διεσπαρμένου υλικού (παραφίνης) αγγίζει μέχρι και το 80%, η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται στο SSPCM είναι συγκρίσιμη με αυτή που αποθηκεύεται στα παραδοσιακά PCM.

Ο Zhang και οι συνεργάτες του [26] εξέτασαν το PCM σταθεροποιημένου σχήματος, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα και διαπίστωσαν ότι μπορεί να απλουστεύσει το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, καθώς δεν απαιτεί ειδικές συσκευές ή δοχεία για την ενθυλάκωση του PCM. Βάσει των παραπάνω πλεονεκτημάτων αυτού του PCM σταθεροποιημένου σχήματος, πρότειναν επίσης την ενδεχόμενη εφαρμογή του σε αποδοτικά κτίρια, για χρήση ως εσωτερική επένδυση, όπως εσωτερικός τοίχος, οροφή και δάπεδο.





**Σχήμα 2.11:** Πλάκες Υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος –SSPCM [26]

Ο Zhou και οι συνεργάτες του [27] προσομοίωσαν τη θερμική απόδοση ενός μεσαίου δωματίου άμεσου ενεργειακού κέρδους με τις πλάκες PCM ως εσωτερικές επενδύσεις και εξέτασαν διάφορους παράγοντες, που επηρεάζουν τη θερμική απόδοση, όπως το σημείο τήξης, τη θερμότητα τήξης, τη θέση και το πάχος της σανίδας του PCM σταθεροποιημένου σχήματος. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι οι πλάκες PCM είχαν πλεονεκτήματα σε παθητικά σπίτια με άμεσο ενεργειακό κέρδος από τον ήλιο.

## Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Mehling Harald, Cabeza Luisa F., «Heat and cold storage with PCM», Springer-Verlag Berlin Heidelberg,(2008).
2. Atul Sharma, V. V. Tyagib, C.R. Chen , D.Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications" ,Renewable & Sustainable Energy Reviews 13 318- 345, (2009).
3. <http://www.ktiriatriki.gr/el/news/130-toixoi-apo-protoporiaka-ylika-pcm.html>
4. [http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)
5. <http://ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-03-79.pdf>
6. [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_material](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material)
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_material#Eutectics](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material#Eutectics)
8. Χ. Τζιβανίδης, "Σημειώσεις μαθήματος: Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων". Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Μάιος 2006.
9. Hawes DW, Feldman D, Banu D. "Latent heat storage in building materials", Energy and Buildings 20 77-86 (1993).
10. Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, "Application of latent heat thermal energy storage in buildings:State-of-the-art and outlook", Building and Environment 42 2197-2209 (2007).
11. Frédéric Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux, " A review on phase change materials integrated in building walls", Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 379-391 (2011).
12. A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, " Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review", Renewable and Sustainable Energy reviews 12 2438-2458, (2008).
13. A. Barba, M. Spiga, " Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks", Solar Energy 74 141-148, (2003).
14. <http://wentylacja.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/System-akumulacji-ch%C5%82odu-STL-Podstawy-obliczeniowe-i-wymiarowanie-systemu-32647.html>
15. <http://www.rubitherm.de/english/index.htm>
16. M. Zhang, A.M. Mario, B.K. Jennifer, “Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings”, International Journal of Energy Research 29 795-809 (2005).
17. J. Wei, Y. Kawaguchi, S. Hirano, H. Takeuchi “Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply”, Applied Thermal Engineering 25 2903-2920 (2005).
18. Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Chapter 2: Solid – liquid phase change materials
19. P. Schossig, H. M. Henning, S. Gschwander, T. ussmann,“Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials”, Solar Energy Materials and Solar Cells 89 297-306 (2005).
20. M.N.A Hawlader, M.S Uddin, M.M Khin, “Microencapsulated PCM thermalenergy storage system”, Applied Energy; 74 195–202 (2003).
21. L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, “Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings ”,



- Energy and Buildings 39 (2) 113–119 (2007).
22. V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, " Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review", Renewable and Sustainable Energy reviews 15 1373-1391, (2011)
  23. A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, " Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review", Renewable and Sustainable Energy reviews 12 2438-2458, (2008)
  24. Justin Ning-Wei Chiu, Dr. Viktoria Martin, and Prof. Fredrik Setterwall A review of thermal energy storage systems with salt hydrate phase change materials for comfort cooling  
[:http://talon.stockton.edu/eyos/energy\\_studies/content/docs/effstock09/Session\\_8\\_1%20Sustainable\\_Comfort\\_Cooling/61.pdf](http://talon.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_8_1%20Sustainable_Comfort_Cooling/61.pdf)
  25. Regin A.F., Solanki S.C. and Saini J.S. "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 12(9) 2438-2458 (2008).
  26. Zhang YP, Lin KP, Yang R, Di HF, Jiang Y. "Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings ", Energy and Buildings 38 1262-1269 (2006).
  27. Zhou GB, Zhang YP, Lin KP, Xiao W. "Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates", Renewable Energy 33 1228-1236 (2008).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ PCM

### 3.1 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες προσπάθειες για τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε κτιριακές εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης άρχισαν κατά το έτος 1920, ενώ κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών, για πειράματα μεγάλης κλίμακας, παρατηρήθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και της δεκαετίας του 1970. Παρά το γεγονός ότι τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν θεωρήθηκαν επιτυχή, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, εξαιτίας της έλλειψης εμπιστοσύνης στην επιτυχία του όλου εγχειρήματος.

Η δεκαετία του 1970 υπήρξε περίοδος ταχείας ανάπτυξης ηλιακών κτιριακών εφαρμογών με χρήση υλικών αλλαγής φάσης, καθώς η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και εναλλακτικές ενεργειακές πηγές κατέστη προφανής, ύστερα από τον αραβοϊσραηλινό πόλεμο και την πετρελαϊκή κρίση που ακολούθησε. Κατά τη δεκαετία του 1980 η έρευνα των υλικών αλλαγής φάσης και των σχετικών κτιριακών εφαρμογών συνεχίστηκε διεθνώς με αυξανόμενο ρυθμό.

Οι πιο πρόσφατες μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση των υλικών αλλαγής φάσης στα οικοδομικά στοιχεία βελτιώνει σημαντικά την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων, επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας, μειώνει τις ενεργειακές αιχμές και παρέχει χρονική εξομάλυνση των θερμικών φορτίων.

Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση των σημαντικότερων ερευνητικών δραστηριοτήτων που έγιναν πάνω στις εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στον κτιριακό τομέα.[1,2]

#### 3.1.1 Πρώτες προσπάθειες

##### 3.1.1.1 Dr. Maria Telkes

Η πρώτη ερευνήτρια που αποφάσισε να ασχοληθεί με την εφαρμογή των PCM σε κτίρια, ως μια μορφή παθητικής θέρμανσης ήταν η «Βασίλισσα του Ήλιου», Dr. Maria Telkes. Η ουγγρικής καταγωγής Αμερικανίδα επιστήμονας είχε ασχοληθεί με τις

δυνατότητες της ηλιακής θέρμανσης από το 1920. Το 1946 πρότεινε και συμμετείχε στην κατασκευή του πιλοτικού κτιρίου "The Dover House" με σύστημα θέρμανσης, βασισμένο στα υλικά αλλαγής φάσης στην περιοχή Dover Mass, 5 μίλια μακριά από την Βοστώνη των ΗΠΑ. Το κτίριο είχε ως στόχο να αναδείξει τη δύναμη της ηλιακής ενέργειας και χρηματοδοτήθηκε από την Amelia Peabody και σχεδιάστηκε από την αρχιτέκτονα Eleanor Raymond. Η περιοχή επελέγη από την Telkes για τα ετήσια επίπεδα ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, πράγμα που εξασφάλιζε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος.

Το σπίτι ήταν ένας όροφος, πέντε δωματίων με εμβαδόν δαπέδου  $135\text{m}^2$  από τα οποία τα δύο ήταν υπνοδωμάτια, μήκους 23m και βάθους ενός δωματίου. Η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας γινόταν με τη βοήθεια 18 ηλιακών συλλεκτών, κατασκευασμένων από γαλβανισμένες απορροφητικές πλάκες λεπτού πάχους, βαμμένες μαύρες και καλυμμένες με διπλά γυάλινα πλαίσια διαστάσεων 1,2 x 3 m. Η θερμότητα που παραγόταν από αυτά τα πάνελ περνούσε κατά μήκος ενός αγωγού μέσω ενός ανεμιστήρα σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας, που είχαν τοποθετηθεί στις πλευρές των δωματίων.

Τα δοχεία αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιούσαν σαν υλικό αλλαγής φάσης το άλας του Glauber. Έχοντας στο σύνολο 21 τόνους από το υλικό αλλαγής φάσης, το σύστημα είχε τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας 4,7 εκατομμυρίων BTU (11MJ). Τα άλατα του Glauber έχοντας την ικανότητα να αποθηκεύουν φορτίο 12 ημερών θα παρείχαν μια αποθήκευση αισθητής θερμότητας μεταξύ της θερμοκρασίας δωματίου και του σημείου τήξης ( $32^\circ\text{C}$ ).

Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1948 αλλά σύμφωνα με τα οικονομικά δεδομένα της εποχής ήταν μία ακριβή κατασκευή, αφού το συνολικό της κόστος ανερχόταν στα 20.000 δολάρια εκ των οποίων τα 3.000 δολάρια αποτελούσαν το κόστος του θερμαντικού συστήματος (συνολικό ποσοστό κόστους 15%).

Το σύστημα θέρμανσης τα δύο πρώτα έτη λειτούργησε άριστα και αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο εσωτερικό περιβάλλον γύρω στους  $21^\circ\text{C}$ , χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης.

Όμως κατά το τρίτο έτος άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα λόγω υποβάθμισης του θερμοαποθηκευτικού δυναμικού του υλικού αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε (άλας Glauber,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), ύστερα από τους επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους λειτουργίας. Συγκεκριμένα είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος. Δυστυχώς, αυτό σήμαινε ότι η συμβατική θέρμανση ήταν πλέον απαραίτητο να εγκατασταθεί.[1,3]

### 3.1.1.2 Dr. Lawrence Gardshire

Το 1953 ο Dr. Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με PCM στο Νέο Μεξικό χρησιμοποιώντας παρόμοιες αρχές με τον σχεδιασμό της Dr. Maria Telkes. Το κτίριο ήταν διώροφο και κάθε όροφος είχε εμβαδόν δαπέδου  $102\text{m}^2$ . Οι ηλιακοί συλλέκτες ήταν τοποθετημένοι στην οροφή. Ο Gardshire, όπως και η Telkes χρησιμοποίησε δοχεία αποθήκευσης με PCM χωρητικότητας  $1,9\text{m}^3$ . Σε αντίθεση όμως με την Telkes, η οποία είχε τοποθετήσει τα δοχεία των PCM ανάμεσα στα δωμάτια, ο Gardshire τα εγκατέστησε δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες στην οροφή.

Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο Borex στο άλας του Glauber σαν πηκτικό παράγοντα, ώστε να βοηθά στην στερεοποίηση του άλατος και να αποφύγει όσο ήταν δυνατό τον διαχωρισμό. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes. Αυτό συνέβη με μεγαλύτερη καθυστέρηση, λόγω αύξησης του χρόνου ζωής του PCM, που προήλθε από την προσθήκη του διφθορικού νατρίου.[1,3]

### 3.1.1.3 Dr J. W. Hodgins και Dr T. W. Hoffman

Την επόμενη προσπάθεια για ένα ηλιακό σπίτι με PCM την έκαναν οι J.Hodgins και T.Hoffman το 1959 στη Βασιλική Στρατιωτική Ακαδημία του Καναδά. Το κτίριο ήταν δύο ορόφων και είχε συνολική επιφάνεια  $111\text{m}^2$ . Η Dr. Maria Telkes ανέλαβε να σχεδιάσει τα δοχεία θερμικής αποθήκευσης με PCM λόγω της προηγούμενης εμπειρίας

της στον τομέα αυτό. Και σε αυτή τη περίπτωση η Telkes χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης το άλας του Glauber (ένυδρο άλας,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  με σημείο τήξης τους  $32^\circ\text{C}$  ). Οι 12 τόνοι PCM ήταν ενσωματωμένοι σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0,1m και ύψους 0,6m, τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους. Για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το μείγμα ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που εμποδίζει τη διάβρωση. Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δε συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων.[1,3]

### 3.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα

Η αναγνώριση της ανάγκης για ένα δομημένο πρόγραμμα έρευνας, από το πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνιας, στο τομέα της θερμικής αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης για να ξεπεραστούν πολλά προβλήματα που προέκυψαν παλαιότερα, οδήγησε το 1971 στην ανάπτυξη του πρώτου ερευνητικού προγράμματος. Αυτό εκτελέστηκε από τους κορυφαίους επιστήμονες στον τομέα λανθάνουσας θερμότητας S. Freedman, M.Telkes και M. Altman και χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστήμης των ΗΠΑ.

Ο στόχος της συγκεκριμένης έρευνας ήταν να ανακαλυφθεί ένας αριθμός οργανικών και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης κατάλληλα για τις εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, σε συνδυασμό με λεπτομερή ανάλυση του κόστους αυτών των υλικών, την οικονομική ανάλυση και την ικανότητα αποθήκευσης.

Η μελέτη εστίασε στις ακόλουθες ομάδες υλικών:

- Ένυδρα άλατα
- Οργανικά PCM
- Ανόργανα PCM
- Εύτηκτα μείγματα οργανικών και ανόργανων ενώσεων

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (ανόργανο PCM) και ορισμένα μείγματα παραφίνης (οργανικό PCM), ήταν κατάλληλα για τις εφαρμογές κλιματισμού. Τα δύο πιο υποσχόμενα PCM για τη θέρμανση χώρου ήταν τα ανόργανα PCM  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .



Το έτος 1973 ήταν ένα σημαντικό ορόσημο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας λανθάνουσας θερμότητας με PCM και της έρευνας εξαιτίας του Αραβο-ισραηλινού πολέμου και του επακόλουθου αραβικού πετρελαϊκού εμπάργκο, που κατέστησε πολύ σαφές ότι η μελλοντική παροχή καυσίμου μπορεί εύκολα να διαταραχθεί λόγω πολιτικών γεγονότων και εξάντλησης μιας σημαντικής πηγής καυσίμου. Αυτό ώθησε πολλές κυβερνήσεις διαφόρων χωρών στην έρευνα εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση στον τομέα της ηλιακής ενέργειας και της αποδοτικής αποθήκευσης ενέργειας.

Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCM σε χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, οι ΗΠΑ, η Γερμανία και η Γαλλία, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, που σε μεγάλο βαθμό επικεντρώθηκαν στην ηλιακή ενέργεια, λόγω της έλλειψης προόδου στον τομέα ως σύνολο.[1]

### 3.1.2.1 ΗΠΑ

Σαν αποτέλεσμα της ανάγκης για έρευνα, και ιδιαίτερα σε συστήματα θερμικής αποθήκευσης, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής πρωτοστάτησαν στο πρώτο μεγάλης κλίμακας ερευνητικό πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστήμης. Η Dow Chemical, επιστημονική ομάδα που ηγείτο στον τομέα PCM εκείνη την περίοδο, βραβεύτηκε για την εκτέλεση έρευνας, που αποτελείτο από περίπου 20.000 δοκιμές πιθανών PCM. Λόγω του μεγέθους του ερευνητικού έργου συμμετείχαν στη διαδικασία επιπλέον σύμβουλοι και επιστήμονες από τον Καναδά. Η έρευνα χρησιμοποίησε τα προηγούμενα αποτελέσματα του Πανεπιστημίου της Πενσυλβάνιας για να δημιουργήσει μια βάση δεδομένων όλων των προηγούμενων πηγών λανθάνουσας θερμότητας PCM. Από τα 20.000 PCM που δοκιμάστηκαν, μόνο το 1% επιλέχθηκε για περαιτέρω έρευνα και θεωρήθηκαν ως εν δυνάμει υποψήφια. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ήταν μια σειρά ένυδρων αλάτων ομοιόμορφης τήξης και κοινά οργανικά υλικά.

Κατά τη διάρκεια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της Dow Chemical, η Dr Maria Telkes στο Πανεπιστήμιο του Delaware συνέχισε την έρευνα για τους τρόπους βελτίωσης της μακροβιότητας του άλατος Glauber. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διαφόρων πηκτικών μέσων για την πάχυνση του άλατος Glauber αύξησαν





σημαντικά τη διάρκεια ζωής των υλικών αν και μείωση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας εξακολουθούσε να υπάρχει μετά από περίπου 1000 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Περαιτέρω έρευνα πραγματοποιήθηκε από τον Dr S.B Marks από το Πανεπιστήμιο του Delaware, που προσπάθησε με ανάμειξη του άλατος Glauber με ένα είδος πηλού να ενεργεί ως πηκτικό μέσο. Αυτό τελικά οδήγησε σε αυξημένους κύκλους αποθήκευσης θερμότητας αλλά με μείωση της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Ο Dr S. B. Marks συνέχισε την έρευνά του χρησιμοποιώντας μια σειρά από άλλες μορφές πηκτικών μέσων όπως πολυμερές πολυκαρβοξυλικό οξύ, το οποίο αύξησε την μακροβιότητα της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας.

Ο Dr P. G. Rueffel, ενδιαφέρθηκε επίσης για τη χρήση του άλατος Glauber ως PCM και πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών χρησιμοποιώντας μια μήτρα τύρφης για να απορροφήσει το PCM. Τα αποτελέσματα βρήκαν ότι η τύρφη σχηματίζοντας ένα ινώδες δίκτυο, που απορροφά το PCM, δημιουργεί ένα ιδανικό πηκτικό μέσο με αποτέλεσμα τη μακροβιότητα της θερμικής αποθήκευσης. Άλλες εναλλακτικές λύσεις με βάση την παραπάνω, έχουν ερευνηθεί από το Boardman Energy Systems, ΗΠΑ, όπου μείγμα PCM δημιουργείται από άλας Glauber με κοινό τσιμέντο Portland παρέχοντας μια αναστολή των δύο υλικών κατά την έκχυση και σκλήρυνση. Τα αποτελέσματα δοκιμής έδειξαν ότι πάνω από 2000 κύκλοι δεν οδήγησαν σε καμιά μείωση της θερμικής αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό είναι χημικά σταθερό (ασφαλές) και παρέχει μεγάλες δυνατότητες ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης με PCM για κτιριακές εφαρμογές. Περαιτέρω ανάλυση των φτηνών ένυδρων αλάτων συνεχίστηκε από το Πανεπιστήμιο του Delaware, ΗΠΑ όπου ένα πειραματικό σπίτι πλήρους μεγέθους κατασκευάστηκε, και στο οποίο το 1976 η ερευνητική ομάδα Dow Chemical με πρόσθετη χρηματοδότηση συνέχισε την έρευνα.

Κατά τη διάρκεια της αρχικής μελέτης της Dow Chemical για τον προσδιορισμό πιθανών PCM, το κερί παραφίνης που είναι μια οργανική ουσία, σχετικά φθηνή και ευρέως διαθέσιμη, βρέθηκε να είναι ένα πιθανό υλικό αποθήκευσης για την οικοδομική βιομηχανία. Ο Dr John Bailey και οι συνεργάτες του αποφάσισαν να ερευνήσουν αυτήν την περιοχή περαιτέρω, επικεντρώνοντας σε θερμοσυσσωρευτές αλουμινίου κυψελωτού πλέγματος με ενσωματωμένη παραφίνη (n-eicosane), που έχει σημείο τήξης 36°C. Το 1974, περαιτέρω μελέτες πραγματοποιήθηκαν από τον Dr T. R. Galloway. Οι μελέτες βασίστηκαν γύρω από τη χρησιμοποίηση κεριού παραφίνης PCM σε τρεις διαφορετικές

εφαρμογές θέρμανσης: δεξαμενή PCM με πλαστικό πηνίο ανταλλαγής θερμότητας, σε δοχεία από χάλυβα γεμάτα με PCM που περιβάλλονται από νερό μέσα σε μια δεξαμενή, και σε μεγάλους δίσκους με κερί ενσωματωμένο σε κάψουλες που περιβάλλονταν από νερό σε μια δεξαμενή. Τα ερευνητικά ιδρύματα των ΗΠΑ έχουν κυρίως επικεντρωθεί σε οργανικά PCM, ενώ η έρευνα σε μη οργανικά PCM είναι πιο διευρυμένη στο εσωτερικό της Ευρώπης.[1]

### 3.1.2.2 Ευρώπη

Οι επιστήμονες στη Γερμανία ερευνώντας τη τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM, παρείχαν λεπτομερείς χάρτες και πίνακες των PCM με φυσικές και θερμικές ιδιότητες υλικών για κατασκευές και ιδιοτήτων μόνωσης. Η κύρια έρευνα είχε επικεντρωθεί γύρω από τα ένυδρα άλατα, παραφίνες και κάποια εύτηκτα μείγματα για εφαρμογές κάτω των 100°C. Ερευνητικές ομάδες στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης έχουν πραγματοποιήσει σημαντικές έρευνες διαφόρων οργανικών και υποψηφίων ένυδρων αλάτων σε δοχεία σωλήνων με πτερύγια, που περιέχουν εναλλάκτες θερμότητας σε συνδυασμό με σωλήνες θερμότητας. Μια ιδιωτική εταιρεία στη Δυτική Γερμανία διεξήγαγε έρευνα για να εξετάσει τις διαφορετικές επιδόσεις διαφόρων PCM στο BBC Solar House, που θερμαίνεται με μια αντλία θερμότητας χρησιμοποιώντας νερό αρχικά ως μέσο αποθήκευσης. Οι ερευνητές αποφάσισαν να αλλάξουν το μέσο αποθήκευσης στη συνέχεια με πάγο και μετά με παραφίνη (σημείο τήξεως 18 έως 25°C), απ' όπου προέκυψε ότι η παραφίνη παρείχε τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και επίσης αύξησε το COP της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3 καθώς επίσης απαιτούσε το μισό του απαιτούμενου όγκου του νερού παρέχοντας έτσι και μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα.

Ακόμα στη Σουηδία παρατηρείται σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας αποθήκευσης με PCM, που λαμβάνει χώρα στην Energiteknik Studsvik AB με επικεφαλής τον Prof. H. Hedman. Η έρευνα συγκεντρώνεται γύρω από την εφαρμογή των ένυδρων αλάτων, χρησιμοποιώντας αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Τα συστήματα ενσωματωμένων PCM σε μεταλλικές κάψουλες αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα για παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης σε σπίτια στη Δανία. Ένα κοινό έργο κατασκευής τριών

διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης, που περιλαμβάνει τρεις μεγάλες μορφές σουηδικής κατασκευής, πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης PCM εντός των υπηρεσιών του κτιρίου. Το πρώτο με ένα τυπικό περιφερειακό σύστημα θέρμανσης ζεστού νερού, το δεύτερο χρησιμοποιώντας εξαναγκασμένη θέρμανση ζεστού αέρα και εκτός αιχμής ισχύ άλλαξε για να αποθηκεύσει ένα ενσωματωμένο PCM σε κάψουλες, σε σφραγισμένους γραμμικούς σωλήνες πολυαιθυλενίου. Και το τρίτο, ένα παρόμοιο σύστημα με το δεύτερο, αλλά με ηλιακούς συλλέκτες ψύξης αέρα ως κύρια πηγή θερμότητας.

Για πολλά χρόνια, η Γαλλία επίσης έχει δείξει ενδιαφέρον σχετικά με την τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM και μέσω της έρευνας στο CNRS, στη Νίκαια, έχει κατασκευάσει πολλά κτίρια, που χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνολογία. Το CNRS αναπτύσσει επίσης έρευνα σχετικά με κερί παραφίνης ως PCM, μέσω δοκιμών συστημάτων, που ενσωματώνουν μείγματα μετάλλων για να αυξήσουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας. Επιστήμονες από το Center Scientific et Technique du Batiment στο Παρίσι πατεντάρισαν συσκευές, που ενσωματώνουν PCM με σημεία τήξης από 15 έως 40°C για χρήση σε εφαρμογές κλιματισμού του αέρα.

Πέρα από τη Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο με το Βρετανικό Κέντρο Ερευνών Garston, Watford έχει εδώ και πολλά χρόνια πραγματοποιήσει έρευνα για το θέμα της τεχνολογίας θερμικής αποθήκευσης με PCM. Οι A. Bromley, E. Mckey και J. Wilkins αποτελούν την ομάδα μελέτης θερμικής αποθήκευσης και έχουν διεξαγάγει έρευνα σε εφαρμογές θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και ιδιαίτερα με αποθήκευση σε πάγο. Μια μικρή ομάδα επιστημόνων επίσης στο Πανεπιστήμιο του Salford, πραγματοποίησε έρευνα για το ενυδατωμένο φωσφορικό νάτριο και εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο και μαζί με το Πανεπιστήμιο του Cardiff, στην Ουαλία, ανέπτυξε την τεχνολογία PCM με παραφίνη ως μέσο αποθήκευσης.[1]

### 3.1.2.3 Άπω Ανατολή (Ιαπωνία)

Η Ιαπωνία διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο παράλληλα με τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στην τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM έχοντας ερευνητικές ομάδες μελέτης για πολλά χρόνια με ισχυρή κυβερνητική υποστήριξη. Τα υλικά που κρίθηκαν ως τα πλέον επιτυχημένα κατά τη διάρκεια έρευνας από την Mitsubishi

Electronics Corp. και την Tokyo Electric Power Co. ήταν τα ένυδρα νιτρικά άλατα, τα φωσφορικά άλατα, τα φθοριούχα άλατα και το χλωριούχο ασβέστιο.

Η έρευνα μέχρι τη δεκαετία του 1970 επικεντρωνόταν στα συστήματα θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας με PCM αν και πιο πρόσφατες εξελίξεις έχουν επέλθει και σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αρκετές νέες οργανώσεις, συμπεριλαμβανομένων της Nippon Pillar Packing Co., δημιούργησαν εξαένυδρο βρωμιούχο ασβέστιο ως PCM μαζί με παράγοντες σχηματισμού πυρήνων. Άλλες όπως η Kureha Chemical Industry Inventors χρησιμοποίησαν την έρευνα του άλατος Glauber ως PCM για θέρμανση και ψύξη, χρησιμοποιώντας γύψο και άλλα ελαφρού βάρους αδρανή υλικά για τη σταθεροποίηση του PCM.

Σημαντική έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε σε μια σειρά από εύηκτα νιτρικά άλατα για εφαρμογές σε θερμοκρασία δωματίου. Οι Yoneda και Takanashi ανέπτυξαν μια σειρά από μοντέλα, χρησιμοποιώντας ένα απλό εναλλάκτη θερμότητας για την παρακολούθηση του συστήματος PCM, και οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ήταν πολύ αποτελεσματικό, αλλά εμφανίστηκαν προβλήματα όταν συνδέθηκε με ένα ηλιακό συλλέκτη που είχε ως αποτέλεσμα μια σημαντική μείωση της αποτελεσματικότητας.[1]

### 3.2 Εφαρμογές PCM στα κτίρια

Η εφαρμογή των PCM σε κτίρια μπορεί να έχει δύο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον τη χρήση της φυσικής θερμότητας, που είναι η ηλιακή ενέργεια, για θέρμανση ή του κρύου στη διάρκεια της νύχτας για ψύξη. Δεύτερον τη χρήση ανθρωπογενών πηγών θέρμανσης ή ψύξης. Σε κάθε περίπτωση η αποθήκευση θερμότητας είναι αναγκαία προκειμένου να ταυτίζονται η διαθεσιμότητα και η ζήτηση ως προς το χρόνο καθώς και σε ό,τι αφορά και την ισχύ. Τρεις ουσιαστικά είναι οι τρόποι χρήσης των PCM σε κτίρια, δηλαδή τοποθέτηση σε τοίχους κτιρίων, σε δομικά στοιχεία εκτός από τοίχους και σε μονάδες αποθήκευσης. Τα δύο πρώτα είναι παθητικά συστήματα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή το κρύο αυτόματα απελευθερώνεται όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι

ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή κρύο είναι σε δοχείο θερμικά διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Ως εκ τούτου, η ζέστη ή το κρύο χρησιμοποιείται μόνο κατόπιν ζήτησης και όχι αυτόματα. Διάφορες πιθανές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας (LHTES), που μελετήθηκαν για θέρμανση και ψύξη χώρου, παρουσιάζονται στη συνέχεια.[4]

### 3.2.1 Γυψοσανίδες με PCM

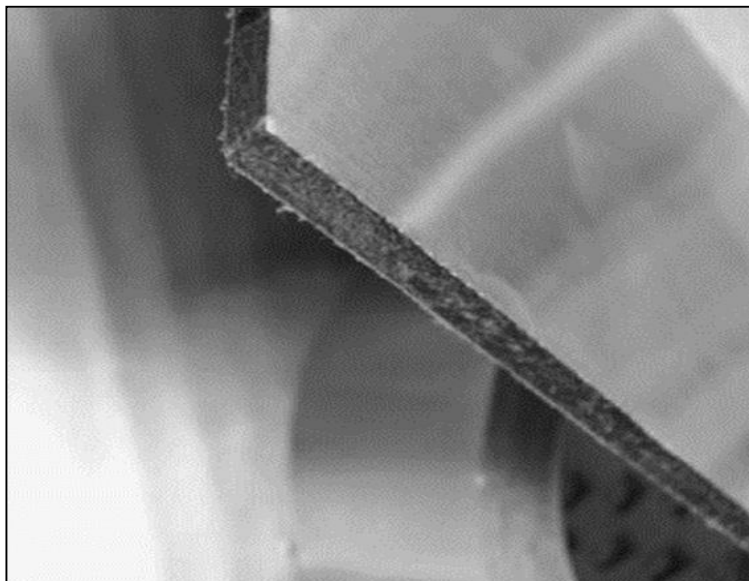
Οι γυψοσανίδες είναι εξαιρετικά κατάλληλες για την ενσωμάτωση των PCM. Θεωρούνται ως μια αποτελεσματική και λιγότερο ακριβή μέθοδος για την αποθήκευση της ηλιακής θερμότητας στα κτίρια. Συγκεκριμένα πρόκειται για PCM ενσωματωμένα σε πλάκες γύψου, σοβά ή άλλες κτιριακές κατασκευές. Τα θερμικά χαρακτηριστικά των γυψοσανίδων με PCM έχουν μεγάλες ομοιότητες με αυτά των PCM και όταν μια τέτοιου είδους γυψοσανίδα κοπεί, παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση στο εξωτερικό τρίτο επίπεδο του πάχους της κοντά σε κάθε πρόσοψη λόγω της διαδικασίας της διάχυσης.[5]

Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες, τόσο αριθμητικές/προσομοίωσης όσο και πειραματικές για την αξιολόγηση της απόδοσης των γυψοσανίδων που έχουν ενισχυθεί με PCM. Η αποδοτικότητα αυτών των στοιχείων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- ο τρόπος με τον οποίο το PCM έχει ενσωματωθεί στη γυψοσανίδα,
- ο προσανατολισμός του τοίχου,
- οι κλιματικές συνθήκες,
- το ενεργειακό όφελος από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία-άμεσα ηλιακά κέρδη
- το εσωτερικό ενεργειακό όφελος-εσωτερικά κέρδη
- το χρώμα της επιφάνειας,
- ο ρυθμός εξαερισμού
- το PCM που επιλέχθηκε και η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του,

- το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης,
- η χωρητικότητα λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του τοίχου, κ.α.[6]

Ο Kuznik και οι συνεργάτες [7] του διερεύνησαν τη βέλτιστη τιμή του πάχους των γυψοσανίδων με PCM. Χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα CODYMUR για να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή και τα αποτελέσματα έδειξαν την ύπαρξη βέλτιστης τιμής, σύμφωνα με τις ημερήσιες διακυμάνσεις των εξωτερικών και εσωτερικών θερμοκρασιών. Το νέο προϊόν που δοκιμάστηκε, δημιουργήθηκε από την DuPont de Nemours Society. Αποτελείται κατά 60% από μικροενσωματωμένη παραφίνη, η οποία έχει θερμοκρασία τήξεως περίπου 22°C (σχήμα 3.1 ). Η διαδικασία διεξήχθη χρησιμοποιώντας σαν πρότυπο ένα ελαφρύ τοίχο και εσωτερικές-εξωτερικές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός μιας περιόδου 24 ωρών. Τα αποτελέσματα, που αφορούν τη αποθηκευμένη ενέργεια σε πλήρη λειτουργία μιας ημέρας, έδειξαν ότι το βέλτιστο πάχος του PCM είναι 1 cm. Αυτό το πάχος της γυψοσανίδας επιτρέπει το διπλασιασμό της θερμικής αδράνειας του κτιρίου. Η αποθηκευμένη ενέργεια, αποτρέπει την υπερθέρμανση των δωματίων του κεντρικού κτιρίου κατά τη διάρκεια των ζεστών ημερών, και κατά τη διάρκεια της νύχτας, η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται, αυξάνοντας έτσι την ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα.



**Σχήμα 3.1** : Σύνθετη γυψοσανίδα DuPont de Nemours PCM, που αποτελείται από 60% μικροενσωματωμένη παραφίνη[7]

Ο Kuznik και οι συνεργάτες του [8] πραγματοποίησαν μία πειραματική έρευνα σε έναν δοκιμαστικό θάλαμο πλήρους μεγέθους υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμότητας και ακτινοβολίας, ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση των τοίχων, με και χωρίς PCM κατά τη διάρκεια μίας καλοκαιρινής ημέρας. Σχεδίασαν μια πειραματική διάταξη MINIBAT χρησιμοποιώντας μια μπαταρία 12 προβολέων για να προσομοιώσουν την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν την ίδια σύνθεση PCM του σχήματος για να δείξουν ότι οι γυψοσανίδες με PCM μειώνουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ενός δωματίου και το φαινόμενο της υπερθέρμανσης είναι ηπιότερο αφού ενισχύουν τη φυσική συναγωγή αναμιγνύοντας τον αέρα ώστε να αποφευχθούν θερμικές διαστρωματώσεις. Οι ερευνητές επίσης συμπέραναν ότι η διαθέσιμη προς αποθήκευση ενέργεια είναι διπλάσια με τη γυψοσανίδα PCM πάχους 5 mm, τιμή η οποία αντιστοιχεί σε στρώση τσιμέντου πάχους 8 cm.

Οι Kuznik και Virgone [9] διεξήγαγαν μία συγκριτική μελέτη, χρησιμοποιώντας δύο πανομοιότυπους κυβικούς δοκιμαστικούς θαλάμους, με και χωρίς σύνθετο PCM, ώστε να προκύψουν πειραματικά δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση του αριθμητικού μοντέλου και στη συνέχεια να μελετηθούν ορισμένα στοιχεία που σχετίζονται με τη χρήση της γυψοσανίδας PCM. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες τέθηκαν σε δύο περιβάλλοντα όπου οι εξωτερικές θερμοκρασίες εξελίσσονταν διαφορετικά, θερμαίνοντας και ψύχοντας σταδιακά με διάφορους ρυθμούς και θεωρώντας ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Η επίδραση του φαινομένου της υστέρησης έγινε ξεκάθαρη με τα πειραματικά δεδομένα, και οι συγγραφείς συμπέραναν ότι το φαινόμενο υστέρησης θα πρέπει να λαμβάνεται σωστά στη δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου, ώστε να προβλέπεται η πραγματική θερμική συμπεριφορά του στοιχείου κατασκευής.

Για την πραγματική αξιολόγηση της δυνατότητας μίας γυψοσανίδας PCM, που αποτελείται κατά 60% κατά βάρος από μικροενσωματωμένη παραφίνη εντός ενός συμπολυμερούς (τα σημεία τήξης και πήξης είναι 13,6 °C και 23,5 °C αντίστοιχα), παρακολούθηθηκε ένα ανακαινισμένο κτίριο γραφείων στη Λυών για ένα έτος από τον Kuznik και τους συνεργάτες του [10]. Ένα δωμάτιο εξοπλίστηκε με γυψοσανίδες PCM στους κάθετους τοίχους και στην οροφή, ενώ ένα άλλο δωμάτιο, πανομοιότυπο με το πρώτο, δεν εξοπλίστηκε αλλά τέθηκε υπό παρακολούθηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι

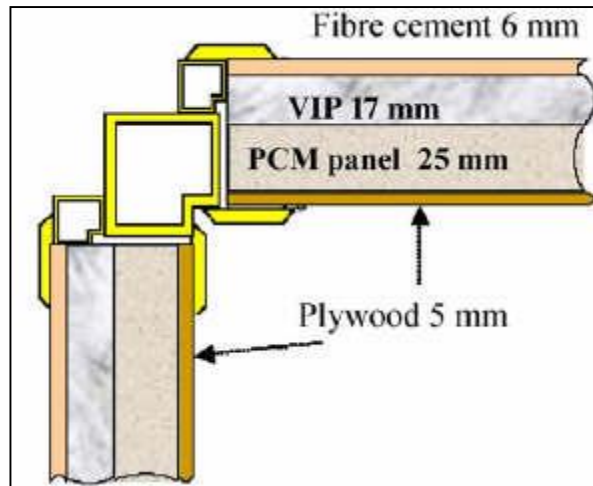
οι γυψοσανίδες PCM βελτιώνουν τη θερμική άνεση των χρηστών λόγω της θερμοκρασίας του αέρα και των επιδράσεων ακτινοβολίας των τοίχων.

Ο Shilei και οι συνεργάτες του [11] αξιολόγησαν την επίδραση γυψοσανίδας PCM με 26 % κατά βάρος λιπαρών οξέων σε εσωτερικό θερμικό περιβάλλον, υπό τις κλιματικές συνθήκες της βορειοανατολικής Κίνας το χειμώνα. Τα αποτελέσματα του πειράματος απέδειξαν ότι η γυψοσανίδα PCM μπορεί να βελτιώσει το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον για αυτές τις συνθήκες. Συγκεκριμένα η γυψοσανίδα PCM μπορεί να εξασθενήσει την εσωτερική διακύμανση του αέρα, να μειώσει τη μεταφορά της θερμότητας στον εξωτερικό αέρα και να βελτιώσει την εσωτερική θερμική άνεση διατηρώντας τη ζέστη. Επιπλέον το δωμάτιο με τοίχο γυψοσανίδας PCM μειώνει την κλίμακα του απαιτούμενου εξοπλισμού θέρμανσης και του σχετικού κόστους επένδυσης.

Ο Ahmad και οι συνεργάτες του [12] μελέτησαν τρεις τύπους πάνελ PCM για το ελαφρύ κέλυφος των κτηρίων: ένα πολυανθρακικό πάνελ γεμάτο με κόκκους παραφίνης (σημείο τήξης 26 °C), ένα πολυανθρακικό πάνελ με πολυαιθυλενογλυκόλη PEG 600 (σημείο τήξης 25 °C), και ένα πάνελ PVC γεμάτο με PEG 600 σε συνδυασμό με πάνελ μόνωσης κενού (vacuum isolation panel- VIP). Τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το τελευταίο είναι το πιο εύχρηστο για τους σκοπούς των ερευνητών.

Κάποιοι ερευνητές έχουν αναφέρει ότι η χρήση πάνελ μόνωσης κενού σε γυψοσανίδα, μπορεί να μειώσει τις θερμικές απώλειες και να βελτιώσει την αποδοτικότητα των κτιρίων με ελαφρές κατασκευές. Δύο πειραματικές διατάξεις κατασκευάστηκαν από τον Ahmad και τους συνεργάτες του [13] και κάθε μία αποτελούνταν από έναν υαλοπίνακα και πέντε αδιαφανή τζάμια μονωμένα με VIP. Η μία διάταξη ήταν εξοπλισμένη με πέντε πάνελ PCM. Η δομή της γυψοσανίδας PCM και της μόνωσης VIP φαίνεται στο σχήμα 3.2. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασιακής διακύμανσης μέσα στη διάταξη με τα πάνελ PCM ήταν μειωμένη κατά 20°C. Έτσι το χειμώνα, αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αποτροπή αρνητικών θερμοκρασιών μέσα στο χώρο. Επίσης, διαπίστωσαν ότι τα πάνελ PCM παρουσιάζουν καλή θερμοαποθηκευτική ικανότητα ακόμη και μετά από 480 κύκλους φόρτισης.





**Σχήμα 3.2:** Δομή γυψοσανίδας με PCM και μόνωση VIP[13]

Ο Athienitis και οι συνεργάτες του [14] χρησιμοποίησαν γυψοσανίδες εμποτισμένες με PCM (με 25 % κατά βάρος στεατικού βουτυλεστέρα) τοποθετημένες στους κάθετους τοίχους σ'ένα άμεσου κέρδους υπαίθριο χώρο δοκιμών, στο Μόντρεαλ, ώστε να διερευνήσουν τη θερμική απόδοσή τους σε παθητικά ηλιακά κτίρια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία του δωματίου μπορεί να μειωθεί μέχρι και 4 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Δηλαδή οι πιο πάνω γυψοσανίδες μείωσαν το συνολικό θερμικό φορτίο κατά περίπου 15%. Επίσης μείωσαν τη ζήτηση θέρμανσης κατά τη διάρκεια της νύκτας.

Οι Diaconu και Cruceru [15] σε μια έρευνά τους ανέπτυξαν ένα νέο τύπο σύνθετων πάνελ PCM για ελαφριά κατασκευή και για ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας. Διαπίστωσαν ότι επιλέγοντας κατάλληλα το σημείο τήξεως του PCM, μειώνεται η ετήσια ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη και η μείωση του εξοπλισμού θέρμανσης και ψύξης είναι δυνατή. Συγκεκριμένα εκτίμησαν τη δυνατότητα ενός πλαισίου μόνωσης τριών στρώσεων, τύπου σάντουιτς (όπου τα εξωτερικά στρώματα αποτελούνται από γυψοσανίδες PCM ενώ το μεσαίο στρώμα αποτελείτο από θερμική μόνωση), για κλιματισμό και εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης σε ήπια κλίματα. Όπως σημειώθηκε από τους ερευνητές, τα στρώματα των γυψοσανίδων PCM επιτελούν διαφορετικές λειτουργίες: το εξωτερικό στρώμα έχει υψηλότερης τιμής σημείου τήξης PCM και είναι ενεργό κατά τη διάρκεια της ζεστής εποχής, ενώ το εσωτερικό στρώμα έχει PCM σημείου τήξης κοντά στην προκαθορισμένη θερμοκρασία για θέρμανση και

είναι ενεργό κατά τη διάρκεια της κρύας περιόδου. Πραγματοποίησαν μία προσομοίωση κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου με ένα δωμάτιο που είχε κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας το νέο σύστημα τοίχου και βρήκαν ότι συνεισφέρει σε ετήσιες εξοικονομήσεις ενέργειας ύψους 12,8% για τη θέρμανση και 1% για ψύξη, και ότι μειώνει τη μέγιστη τιμή των φορτίων ψύξης / θέρμανσης κατά 35,4%. Τα συμπεράσματα βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος, αλλά χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των εσωτερικών φορτίων και εξαερισμού.

Η Diaconu [16] ανέπτυξε ένα απλοποιημένο μοντέλο για την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος, εξετάζοντας ένα σύστημα τοίχου ενισχυμένου με PCM, χρησιμοποιώντας μία γυψοσανίδα PCM στο εσωτερικό στρώμα. Ο βασικός στόχος της συγγραφέας ήταν να αξιολογήσει την επίδραση των εσωτερικών φορτίων και του εξαερισμού στην εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια με PCM. Η ζήτηση ενέργειας για θέρμανση υπολογίστηκε για διάφορες τιμές του σημείου τήξης του PCM. Η ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση, έλαβε ελάχιστη τιμή περίπου στους 19 °C για όλα τα εσωτερικά φορτία με ή χωρίς εξαερισμό. Το υψηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, χωρίς εξαερισμό, βρέθηκε για το σημείο τήξεως του PCM στους 18 °C. Η μέγιστη τιμή της εξοικονόμησης ενέργειας (περίπου 15%), με δραστικό εξαερισμό, βρέθηκε στην περίπτωση που το σημείο τήξεως του PCM ήταν στους 19 °C. Το στρώμα PCM με σημείο τήξης 17 °C εμποδίζει την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας που μπορεί να προκαλείται εξαιτίας των διακυμάνσεων.

### **3.2.2 Βελτιωμένα στοιχεία με υλικά αλλαγής φάσης σταθεροποιημένου σχήματος –SSPCM**

Το σταθεροποιημένου σχήματος PCM είναι ένα είδος σύνθετου υλικού PCM και υποστηρικτικού υλικού, με το ποσοστό του PCM να είναι 70-85% κ.β. σε αυτή την ένωση όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2. Εφόσον η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από το σημείο τήξης του υποστηρικτικού υλικού, το υλικό της ένωσης μπορεί να κρατήσει το σχήμα του, ακόμη και όταν το PCM αλλάζει από στερεό σε υγρό.

Η ένταξη SSPCM στα οικοδομικά στοιχεία για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, έχει μελετηθεί από πολλούς συγγραφείς. Σκοπεύοντας στην

παροχή βοήθειας αναφορικά με την επιλογή των SSPCM και των εφαρμογών τους σε παθητικά ηλιακά κτήρια, ο Zhou και οι συνεργάτες του [17], διεξήγαγαν μονοδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις για τη διερεύνηση της απόδοσης των σανίδων SSPCM με ημιτονοειδή κύματα ροής θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που σχετίζονται με τα παραδοσιακά οικοδομικά υλικά, όπως τα τούβλα, το ελαφρομπετόν και η διογκωμένη πολυστερίνη. Τα θερμικά χαρακτηριστικά μίας σανίδας SSPCM με ημιτονοειδές κύμα θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια διερευνήθηκαν επίσης αριθμητικά από τον Zhou και τους συνεργάτες του [18] και συγκρίθηκαν με τα ίδια παραδοσιακά οικοδομικά υλικά.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής προσομοίωσης για κτίρια γραφείων με κλιματισμό σε τυπικά υποτροπικά και ξηρά ηπειρωτικά κλίματα που προέκυψαν από τον Zhou και τους συνεργάτες του [19] έδειξαν ότι η χρήση των SSPCM στο κέλυφος των κτιρίων μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και να παρέχουν σημαντικό οικονομικό όφελος τόσο στα κτίρια με τιμολογιακή πολιτική που βασίζεται στο χρόνο, όσο και στα κτίρια με τιμολογιακή πολιτική που βασίζεται στη ζήτηση επιπλέον ενέργειας. Επίσης μπορούν να βελτιώσουν την εσωτερική θερμική άνεση μειώνοντας την εσωτερική μεταβολή της θερμοκρασίας.

Ο Zhou και οι συνεργάτες του [20] εξέτασαν αριθμητικά την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος ψύξης χώρου με νυχτερινό εξαερισμό και αποθήκευση θερμότητας χρησιμοποιώντας πλάκες SSPCM ως εσωτερικές επενδύσεις στους τοίχους και στην οροφή. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η επίδραση της θερμικής αποθήκευσης των πλακών SSPCM, σε συνδυασμό με το νυχτερινό εξαερισμό, θα μπορούσαν να βελτιώσουν το εσωτερικό επίπεδο θερμικής άνεσης και να εξοικονομήσουν το 76% της ενέργειας για ψύξη που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας το καλοκαίρι στο Πεκίνο (σε σύγκριση με την περίπτωση μη χρήσης SSPCM και νυχτερινού εξαερισμού).

Ο Zhou και οι συνεργάτες του [21] αξιολόγησαν επίσης την επίδραση των πλακών SSPCM στους τοίχους και στη οροφή σε συνδυασμό με νυχτερινό εξαερισμό κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στο Πεκίνο. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πλάκες SSPCM θα μπορούσαν να μειώσουν την ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία μέχρι και 2°C εξαιτίας της ψύξης που αποθηκεύτηκε το βράδυ.

Για τις χειμερινές κλιματικές συνθήκες στο Πεκίνο, ο Zhou και οι συνεργάτες του [22] βελτιστοποίησαν αριθμητικά τη θερμική απόδοση ενός νότιου προσανατολισμού δωματίου με άμεσα ηλιακά κέρδη που ήταν εξοπλισμένο με πλάκες SSPCM, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ενθαλπίας, και σημείωσαν ότι οι πλάκες SSPCM δημιουργούν μία απάντηση βαρέως τύπου σε ελαφριές κατασκευές, αυξάνοντας την ελάχιστη θερμοκρασία δωματίου μέχρι και 3°C κατά τη διάρκεια της νύχτας για την περίπτωση που μελέτησαν.

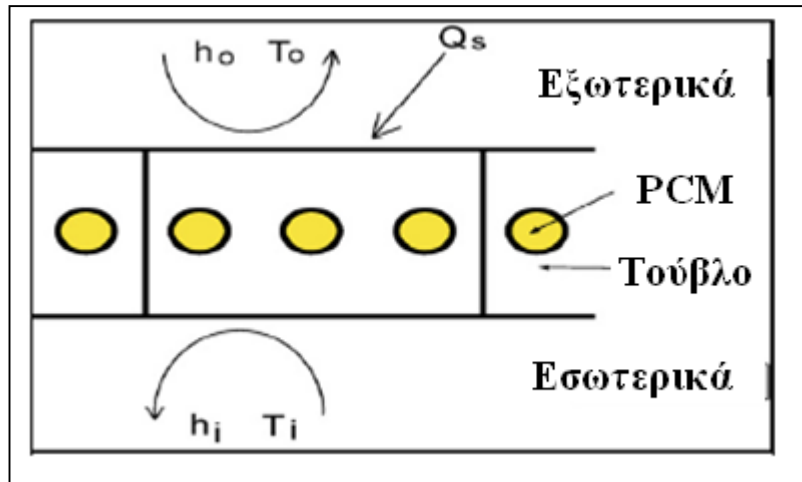
Η σύγκριση μεταξύ της θερμικής απόδοσης δύο σύνθετων στοιχείων PCM αξιολογήθηκε αριθμητικά σε ένα παθητικό ηλιακό κτήριο στο Πεκίνο από το Zhou και τους συνεργάτες του [23]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο οι μεικτού τύπου γυψοσανίδες PCM όσο και οι πλάκες SSPCM μειώνουν αποτελεσματικά τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά 46% και 56% αντίστοιχα, και ότι οι πλάκες SSPCM ανταποκρίνονται πιο γρήγορα σε σχέση με την γυψοσανίδα PCM μεικτού τύπου, και αποδεικνύεται ότι είναι θερμικά πιο αποτελεσματικές όσο αφορά στη χρήση της λανθάνουσας θερμότητας.

### 3.2.3 Ενσωμάτωση PCM σε Τούβλα

Παρά το γεγονός ότι έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα σχετικά με την ενσωμάτωση των PCM σε διάφορα οικοδομικά υλικά, σχεδόν καθόλου δεν έχει απασχολήσει η ενσωμάτωση των PCM σε διάφορες τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούν τούβλο, οι οποίες ευρέως εφαρμόζονται στις Μεσογειακές χώρες.

Η πρώτη σημαντικότερη μελέτη για την εν λόγω ενσωμάτωση πραγματοποιήθηκε από τον Alawadhi [24], οποίος παρουσίασε τη θερμική ανάλυση ενός μοντέλου δύο διαστάσεων για ένα κοινό τούβλο οικοδομής με κυλινδρικές οπές οι οποίες περιείχαν PCM. Ο σκοπός ήταν η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σε θερμά κλίματα για ψύξη. Κατά την άποψη του συγγραφέα, ο στόχος του συνδυασμού τούβλου-PCM είναι να μειωθεί η ροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον, απορροφώντας το θερμικό κέρδος στο τούβλο πριν αυτό φτάσει στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά την διάρκεια της νύχτας, η συσσωρευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στους εσωτερικούς και στους εξωτερικούς χώρους. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος

που μελέτησε, δίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.3.

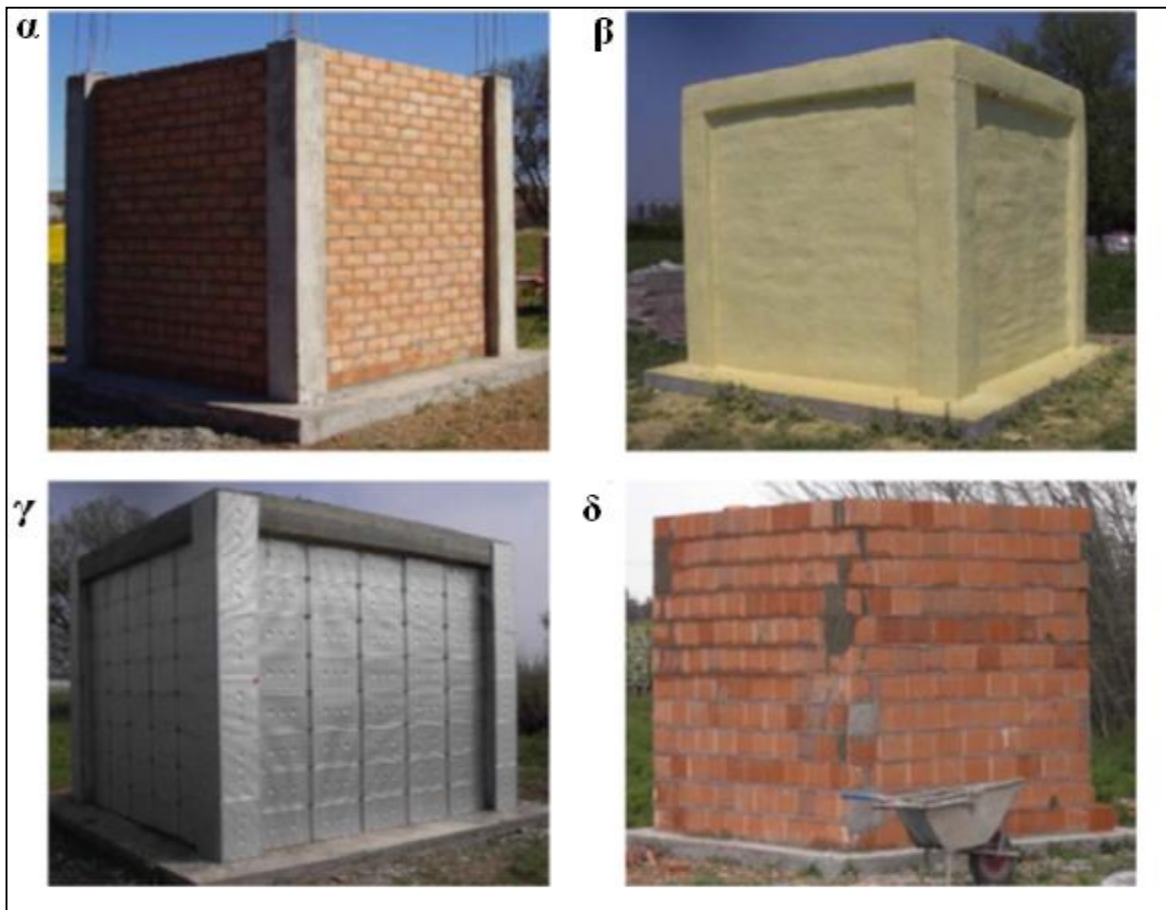


**Σχήμα 3.3:** Σχηματική απεικόνιση του συστήματος τούβλου-PCM και των οριακών συνθηκών

Ελέγχθηκαν οι επιδράσεις των διαφορετικών παραμέτρων όπως η ποσότητα, το είδος του PCM και η θέση που αυτό πρέπει να τοποθετείται στο τούβλο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το θερμικό κέρδος μειώνεται όταν το PCM ενσωματώνεται στο τούβλο, ενώ η αύξηση της ποσότητας του PCM έχει θετική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα. Η ν-εικοσαίνη (n-eicosane) είχε τη καλύτερη απόδοση μεταξύ των τριών PCM, δηλαδή του ν-δεκαοκτανίου (n-octadecane), της ν-εικοσαίνης (n-eicosane) και του P116. Επίσης ως βέλτιστη θέση τοποθέτησης των κυλίνδρων με PCM από άποψη αποτελεσματικότητας, αλλά και της ικανότητας να υποστηριχθεί η αντοχή του τούβλου, κρίθηκε η κεντρική γραμμή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ροή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο μπορεί να μειωθεί κατά 17,55% όταν εισάγονται τρεις κύλινδροι PCM και τοποθετούνται στην κεντρική γραμμή του τούβλου.

Η δεύτερη σημαντική εφαρμογή σε αυτό το πεδίο ήρθε από τον Castell και τους συνεργάτες του [25] οι οποίοι αξιολόγησαν πειραματικά τα οφέλη της χρήσης PCM σε κάψουλες σε συμβατικό και σε κυψελιδικό τούβλο για την παθητική ψύξη στην περιοχή Puigverd de Lleida, η οποία αντιπροσωπεύει το τυπικό κλίμα της Ισπανίας, με αρκετούς χειμώνες και υγρά καλοκαίρια. Κατασκευάστηκαν τρεις θάλαμοι με συμβατικό τούβλο και δύο θάλαμοι με κυψελιδικό τούβλο και μετρήθηκε η θερμική τους απόδοση σε βάθος χρόνου (σχήμα 3.4). Οι θάλαμοι με το συμβατικό τούβλο ήταν ένας θάλαμος αναφοράς χωρίς μόνωση, ένα θάλαμος με μονωτικό υλικό και ένας θάλαμος με μονωτικό υλικό και PCM. Ως μονωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε η πολυουρεθάνη και ως PCM η παραφίνη

RT27. Οι θάλαμοι με το κυψελιδικό τούβλο ήταν ένας θάλαμος αναφοράς και ένας θάλαμος με PCM, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το ένυδρο άλας SP-25 A8. Οι θάλαμοι διαθέτουν μία αντλία θερμότητας ως σύστημα ψύξης και η κατανάλωση ενέργειας καταγράφεται ώστε να καθοριστεί η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιου είδους ψύξη (φυσικής ή μηχανικής ) κατά τη διάρκεια της νύχτας ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των PCM κάτω από ελεύθερα κυμαινόμενες συνθήκες. Επίσης όταν χρησιμοποιήθηκε μια αντλία θερμότητας ώστε να καθορίζει και να ελέγχει την εσωτερική θερμοκρασία των θαλάμων, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανάλωση της ενέργειας στους θαλάμους με PCM ήταν μειωμένη κατά 15% σε σχέση με τους θαλάμους χωρίς PCM.



**Σχήμα 3.4:** (α) Θάλαμος από τούβλο (β) Θάλαμος από τούβλο με πολυουρεθάνη (γ) Θάλαμος από τούβλο με RT27 και πολυουρεθάνη (δ) θάλαμος με κυψελιδικό τούβλο[25].

Τέλος μια άλλη σημαντική εφαρμογή έγινε από τον Silva και τους συνεργάτες του

[26], οι οποίοι αξιολόγησαν το ενδεχόμενο ενσωμάτωσης μακροενσωματωμένης παραφίνης σε τυπική τοιχοποιία με τούβλα αργίλου της Πορτογαλίας (σχήμα 3.5). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση των PCM συνεισφέρει στη μείωση της διακύμανσης της θερμοκρασίας στους εσωτερικούς χώρους, μειώνοντας από 5 ως 10°C το θερμοκρασιακό εύρος, αλλά και επίσης αυξάνοντας την χρονική καθυστέρηση κατά περίπου 3 ώρες.



**Σχήμα 3.5:** Τούβλα με μακροκάψουλες PCM

### 3.2.4 Μπλόκ σκυροδέματος και κονιάματα εμποτισμένα με PCM

Μια άλλη δυνατότητα εφαρμογής των PCM στις κατασκευές κτιρίων είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM.

Η Cabeza και οι συνεργάτες της [27] μελέτησαν ένα νέο καινοτόμο είδος σκυροδέματος με PCM με σκοπό να αναπτύξουν ένα προϊόν το οποίο δε θα επηρέαζε τη μηχανική αντοχή του τοίχου από σκυρόδεμα. Κατασκεύασαν δύο πραγματικού μεγέθους δωμάτια με σκυρόδεμα στη Lleida της Ισπανίας, ώστε να παρουσιαστεί η δυνατότητα της χρήσης μικροκάψουλων PCM στο σκυρόδεμα με σκοπό τη βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης. Το σκυρόδεμα με PCM χρησιμοποιήθηκε στους νότιους και δυτικούς τοίχους καθώς επίσης και στην οροφή ενός εκ των δυο από τα δωμάτια

δοκιμής. Το βελτιωμένο σκυρόδεμα περιέχει 5% κατά βάρος PCM (Micronal<sup>®</sup> της εταιρείας BASF) με σημείο τήξης τους 26°C.

Το άλλο δωμάτιο δοκιμής κατασκευάστηκε με συμβατικό σκυρόδεμα δίπλα στο κτίριο με την εφαρμογή PCM. Και τα δύο κτίρια δοκιμής ήταν πλήρως εξοπλισμένα με κατάλληλα όργανα παρακολούθησης και αξιολόγησης των θερμικών μεταβολών εντός του κάθε δωματίου. Η θερμική συμπεριφορά των δωματίων δοκιμής μελετήθηκε για το χρονικό διάστημα του καλοκαιριού και του φθινοπώρου του 2005 και τα αποτελέσματα που προέκυψαν προσέγγιζαν πολύ καλά την αναμενόμενη απόδοση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι η αποθήκευση της ενέργειας στους βελτιωμένους τοίχους σκυροδέματος οδηγεί σε βελτιωμένη θερμική αδράνεια, αλλά και σε χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα στο δωμάτιο με PCM επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας έως και 4°C. Το PCM που περιέχεται στο σκυρόδεμα στερεοποιείται και λιώνει σε κάθε κύκλο φόρτισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι σημαντική η ύπαρξη νυχτερινού αερισμού για να επιτυγχάνεται η σταθερότητα του κύκλου φόρτισης του υλικού. Διαπίστωσαν επίσης ότι σε αυτή την περίπτωση η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη είναι πάνω από 25 MPa και σε εφελκυσμό πάνω από 6 MPa χωρίς να διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα για το PCM μετά από έξι μήνες λειτουργίας.



**Σχήμα 3.6:** Αριστερά: κτίρια δοκιμής, το ένα εκ των οποίων με τοίχους από σκυρόδεμα και το άλλο με τοίχους από σκυρόδεμα με PCM.[27]

Ο Chandra και οι συνεργάτες του [28] συμπέραναν ότι ένας τοίχος με PCM

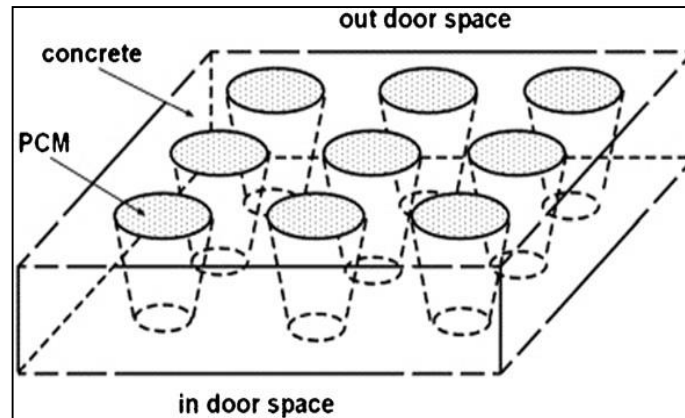


μικρότερου πάχους είναι περισσότερο επιθυμητός σε σύγκριση με ένα συνηθισμένο τοίχο σκυροδέματος για την παροχή αποτελεσματικής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES), όπως και καλύτερης θερμικής άνεσης σε κτίρια.

Ο Entrop και οι συνεργάτες του [29] μελέτησαν σκυρόδεμα εμπλουτισμένο με PCM για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας σε δάπεδα για μέτρια θαλάσσια κλίματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή μικροενσωματωμένου PCM σε δάπεδα σκυροδέματος επέφερε μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών δαπέδου μέχρι και  $16 \pm 2\%$ , και αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών μέχρι και  $7 \pm 3\%$ .

Ο Amault και οι συνεργάτες του [30] εφάρμοσαν ένα αριθμητικό μοντέλο ώστε να καθορίσουν τη θερμική απόδοση των εσωτερικών επιφανειών που περιείχαν PCM, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση ενός τυπικού δαπέδου σκυροδέματος με ένα δάπεδο με PCM για τις καιρικές συνθήκες της πόλης του Κεμπέκ. Οι συγγραφείς μελέτησαν παραμετρικά κάθε σύστημα και βελτιστοποίησαν τη διαμόρφωσή τους βάσει των επιμέρους αντικειμενικών λειτουργιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πάχος του δαπέδου από σκυρόδεμα θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί και να βελτιωθεί η απόδοση του δαπέδου μέσω της ενσωμάτωσης στρώματος PCM.

Ο Alawadhi και Alqallaf [31] μελέτησαν τη θερμική αποτελεσματικότητα οροφής κτιρίου με υλικά αλλαγής φάσης (PCM), το μοντέλο της οποίας αποτελείται από μια πλάκα από σκυρόδεμα με κάθετες οπές κόλουρου κώνου γεμάτες με PCM (σχήμα 3.7). Διεξήγαγαν μια παραμετρική μελέτη για να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις της γεωμετρίας κόλουρου κώνου, και το είδος του PCM που χρησιμοποιείται. Το n-eicosane έδειξε την καλύτερη επίδοση μεταξύ των εξεταζόμενων PCM (n-octadecane, n-eicosane, και SUNTECH P116) και η κωνική γεωμετρία του δοχείου PCM έδειξε την καλύτερη θερμική απόδοση. Τα αποτελέσματα ήταν ότι η συνολική ροή θερμότητας στο εσωτερικό χώρο μπορεί να μειωθεί κατά 39% όταν κωνικό δοχείο PCM εισάγεται και ως εκ τούτου, το ψυκτικό φορτίο ενέργειας μπορεί να μειωθεί κατά το ποσοστό αυτό, όταν PCM ενσωματώνεται στη οροφή κατά τη διάρκεια του τυπικού ωραρίου λειτουργίας.



**Σχήμα 3.7** : Σχηματική απεικόνιση της οροφής με σπές γεμάτες με PCM [31]

Ο Σά και οι συνεργάτες του [32] μελέτησαν ένα νέο, θερμικά βελτιωμένο, κονίαμα με 25% μικροεσωματωμένο PCM κατά βάρος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη ενσωμάτωση PCM στο κονίαμα δεν μείωσε τις ιδιότητες που είναι επιθυμητές για την εφαρμογή του ως υλικό γύψωσης.

### 3.2.5 Τοίχος Trombe με PCM

Η παθητική ηλιακή θέρμανση των κτιρίων εξακολουθεί να αποτελεί μεγάλο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πολλοί συγγραφείς έχουν προτείνει τη συμμετοχή των PCM σε συστήματα τοίχων Trombe για την αντικατάσταση των μεγάλων όγκων τοιχοποιίας και πολλές πειραματικές και θεωρητικές δοκιμές έχουν διεξαχθεί για τη διερεύνηση της αξιοπιστίας των PCM σε ένα τέτοιο σύστημα. Οι παραδοσιακά τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση ενέργειας, αλλά λόγω του δυναμικού για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με PCM είναι μία περίπτωση με αρκετό ενδιαφέρον.

Παρά το γεγονός ότι το έμμεσο θερμικό κέρδος του τοίχου Trombe καθορίστηκε πριν δεκαετίες και έχει μελετηθεί από πολλούς συγγραφείς, η αρχιτεκτονική και σχεδιαστική υιοθέτησή του από τις διάφορες χώρες είναι πολύ αργή. Η νέα τάση όμως για περισσότερο πράσινα κτίρια μηδενικής ενέργειας και η εισαγωγή των PCM στον κλάδο της οικοδομής δίνουν μία νέα ευκαιρία για τη διάδοση αυτής της τεχνικής έμμεσου ενεργειακού οφέλους.

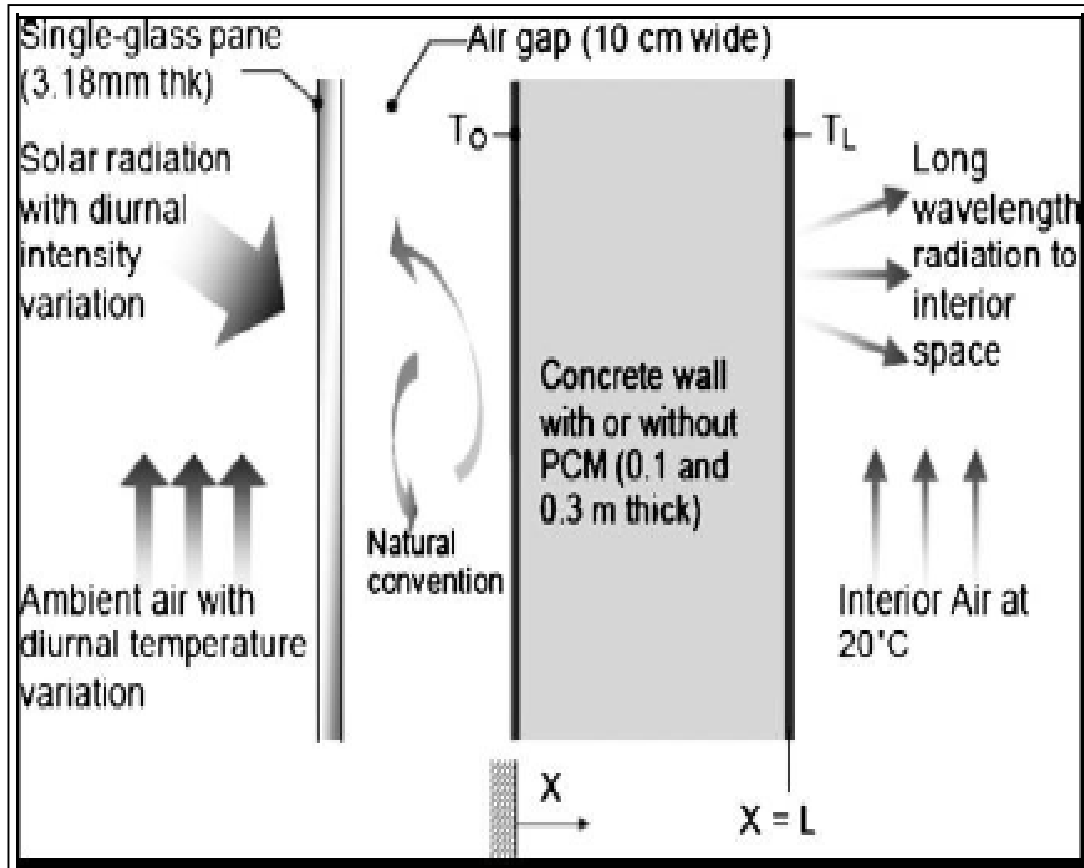
Η εισαγωγή των PCM σε συστήματα τοίχων Trombe θα μπορούσε να συνεισφέρει

στην ανάπτυξη ελαφριών, φορητών, μετακινούμενων και περιστρεφόμενων συστημάτων, πλήρως προσαρμοσμένων στην κατηγορία ελαφρών κτιρίων. Σε αυτή τη νέα προσέγγιση, η τεράστια αισθητή θερμική μάζα ενός παραδοσιακού τοίχου Trombe και η μεγάλη ποσότητα του υλικού, θα μπορούσαν να αντικατασταθούν με τα φορτία λανθάνουσας θερμότητας από τις διαδικασίες αλλαγής φάσης των PCM και συνεπώς θα απαιτούσε λιγότερες ποσότητες υλικών.

Ένας τοίχος Trombe που περιέχει PCM κατασκευάζεται πίσω από το παράθυρο στη νότια πλευρά ενός κτιρίου. Ο τοίχος θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας τήκοντας το PCM ενώ το βράδυ η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, ώστε να θερμανθεί το κτίριο. Για δεδομένη ποσότητα θερμότητας που θέλουμε να αποθηκεύσουμε, οι τοίχοι με PCM απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους που είναι γεμάτοι με νερό ή από τους παραδοσιακούς ογκώδεις τοίχους Trombe, και είναι πολύ ελαφρύτεροι. Επομένως τέτοιοι τοίχοι είναι αρκετά βολικοί για χρήση σε εφαρμογές ανακαίνισης κτιρίων. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα PCM στους τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες.

Ο Eiamworawutthikul και οι συνεργάτες του [33] αξιολόγησαν τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης ενός συνηθισμένου τοίχου Trombe για παθητική ηλιακή θέρμανση από την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με PCM. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση τυπικών δεδομένων χειμερινού κλίματος από την τοποθεσία Raleigh-Durham στη Βόρεια Καρολίνα. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είχε σκοπό να εκτιμήσει τη μεταβολή της θερμοκρασίας ενός συμβατικού τοίχου από τσιμέντο με πάχος 30cm και 10cm.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από έναν όμοιο κατασκευαστικό τοίχο, ο οποίος όμως περιείχε 20% κατά βάρος ένα PCM που ανήκε στο είδος των παραφινών, το οποίο είχε ομοιογενώς αναμειχθεί με το τσιμέντο. Η διαμόρφωση του μοντέλου του τοίχου Trombe φαίνεται στο σχήμα 3.8. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμική απόδοση του τοίχου με PCM ήταν πολύ καλύτερη σε σχέση με τον συμβατικό τοίχο με τσιμέντο για το ίδιο πάχος, και ήταν ελαφρώς καλύτερη σε σχέση με τον συμβατικό τοίχο από τσιμέντο με πάχος 30cm.



**Σχήμα 3.8:** Σχηματική αποτύπωση ενός τοίχου Trombe με PCM. [33]

Ο Swet [34], ο Ghoneim και οι συνεργάτες του [35] και ο Sharma και οι συνεργάτες του [36] χρησιμοποίησαν στις μελέτες τους, το δεκαένυδρο θειικό νάτριο (sodium sulfate decahydrate), με σημείο τήξης τους  $32^{\circ}\text{C}$  ως PCM για ενσωμάτωση σε νοτίου προσανατολισμού τοίχου Trombe. Τα αποτελέσματα των ερευνών τους έδειξαν ότι ένας τοίχος Trombe με PCM μικρού πάχους είναι πιο αποτελεσματικός από έναν συμβατικό τοίχο για την παροχή αποτελεσματικής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Οι Farouk και Gucerı [37] μελέτησαν τη χρησιμότητα των τοίχων Trombe με PCM σε ένα κτίριο για νυχτερινή οικιακή θέρμανση χρησιμοποιώντας ως PCM ένα μείγμα από άλας του Glauber και κερί παραφίνης SUNOCO P-116. Σε αυτή τη μελέτη παρατηρήθηκε ότι αν ο τοίχος Trombe με PCM είναι σωστά κατασκευασμένος, μπορεί να μειώσει κάποια από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των παραδοσιακών τοίχων Trombe με συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Οι Buddhi και Sharma [38] μέτρησαν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω

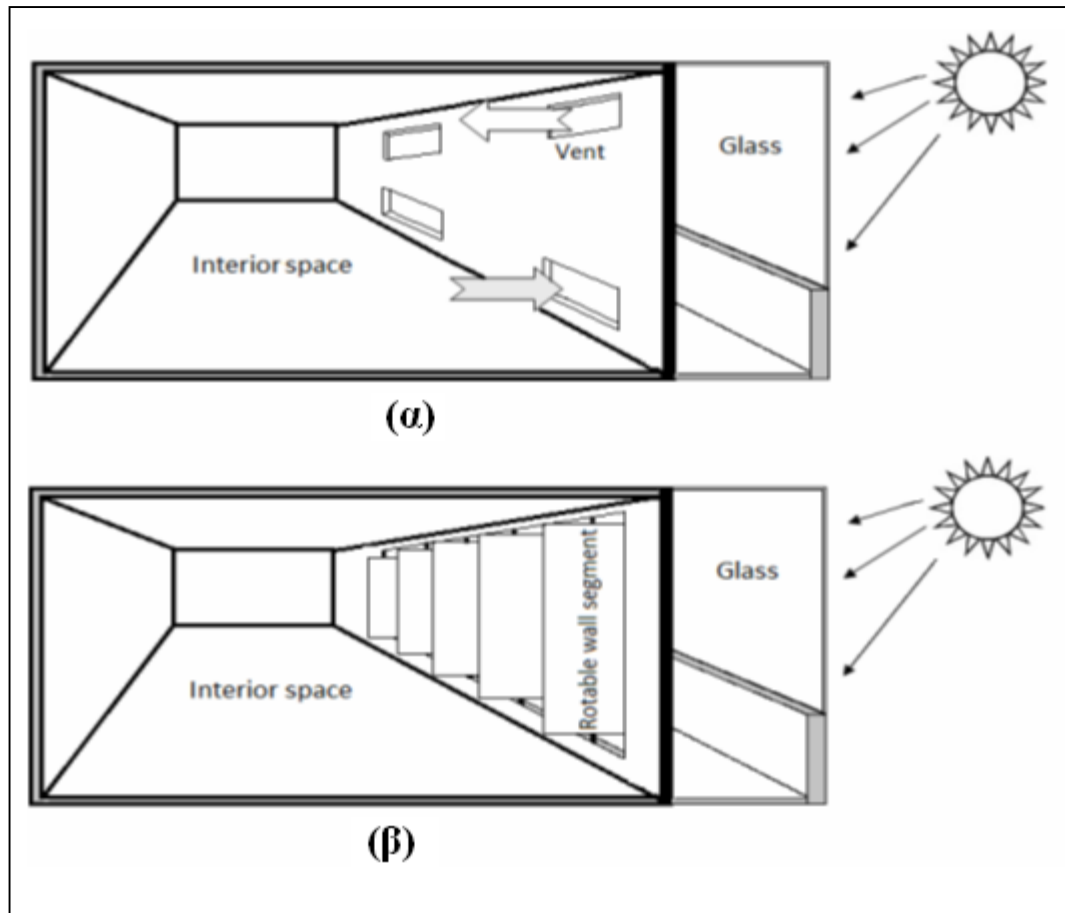
υλικών αλλαγής φάσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε το στεαρικό οξύ. Τα αποτελέσματα ήταν ότι μεταφέρεται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία στα PCM σε σχέση με το γυαλί για το ίδιο πάχος και πρότειναν μια νέα εφαρμογή, την εισαγωγή των PCM σε παράθυρα/τοίχους ως ένα διάφανο υλικό μόνωσης.

Οι Stritih και Novak [39] παρουσίασαν έναν ηλιακό τοίχο για αερισμό κτιρίων, ο οποίος απορροφά ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης (σημείο τήξης 25-30°C). Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για τη θέρμανση του αέρα και τον αερισμό του σπιτιού. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79%. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πάνελ υπαγορεύει την ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας ως αισθητή ή λανθάνουσα και ότι το σημείο τήξης του PCM έχει επίδραση στη θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Η ανάλυση για την περίοδο θέρμανσης έδωσε το βέλτιστο πάχος 50 mm και το σημείο τήξεως λίγους βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία του δωματίου.

Ο Bourdeau [40] ερεύνησε δύο τοίχους συλλογής παθητικής αποθήκευσης χρησιμοποιώντας εξαένδρο χλωρίδιο του ασβεστίου (calcium chloride hexahydrate) σαν PCM με σημείο τήξης τους 29°C. Τα αποτελέσματα ήταν ότι ένας τοίχος πάχους 8,1cm με PCM παρουσίαζε καλύτερη θερμική απόδοση από ό,τι ένας κλασικός τοίχος πάχους 40cm.

Ο Knowler [41] με την σειρά του διεξήγαγε τις δικές του έρευνες χρησιμοποιώντας κερί παραφίνης CG αναμεμιγμένη με μεταλλικά πρόσθετα για αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας, άρα και απόδοσης, του τοίχου Trombe στον οποίο ενσωματώθηκε.

Ο Moghiman και οι συνεργάτες του [42] αντικατέστησαν τον κλασικό σχεδιασμό τοίχων Trombe από μία συστοιχία περιστρεφόμενων τμημάτων τοιχοποιίας, τα οποία μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τους κάθετους άξονές τους. Με αυτή τη διαμόρφωση, τα περιστρεφόμενα τμήματα των τοίχων αποτελούν ένα καλό μέσο απορρόφησης κατά τη διάρκεια της ημέρας και ένα καλό θερμαντικό στοιχείο κατά τη διάρκεια των βραδιών του χειμώνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε σύγκριση με τους κλασικούς τοίχους Trombe, οι περιστρεφόμενοι τοίχοι αποθήκευσης μπορούν να είναι περισσότερο αποδοτικοί, ακόμα και σε κρύα κλίματα.



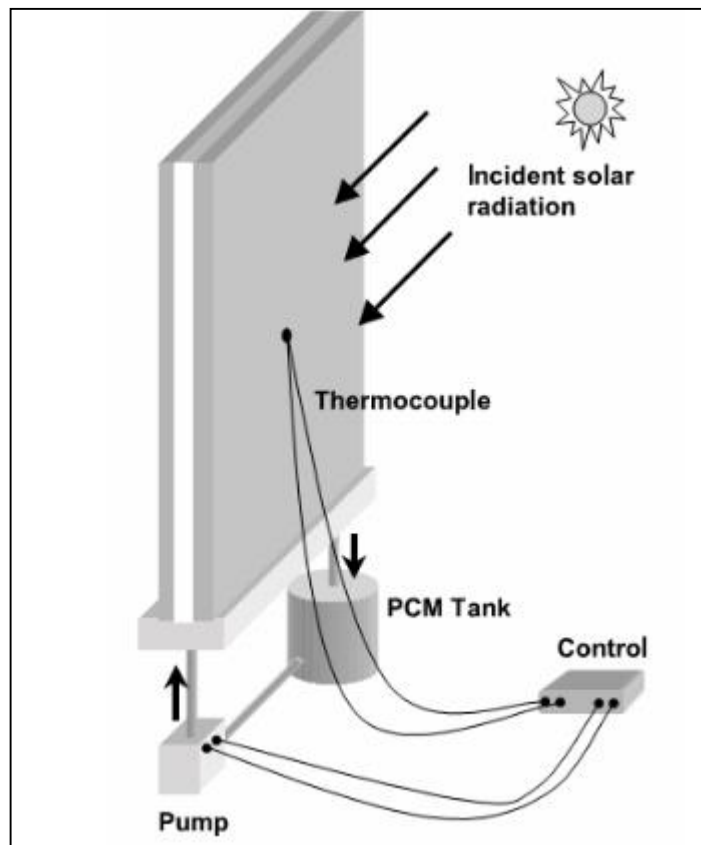
**Σχήμα 3.8:** α) Ηλιακός Τοίχος Trombe β) Τοίχωμα με περιστρεφόμενο τμήματα .

### 3.2.6 Θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM

Τα παράθυρα των κτιρίων συντελούν σε ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη των χώρων, γιατί μέσω αυτών μεταφέρεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Το χειμώνα χάνεται θερμότητα από μέσα προς τα έξω, ενώ το καλοκαίρι εισέρχεται θερμότητα από το ζεστό εξωτερικό περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλα κατασκευασμένων ενεργειακά αποδοτικών παραθύρων.

Οι Ismail και Henriquez [43] πρότειναν ένα είδος ενεργειακών παραθύρων τα οποία αποτελούνται από PCM. Η διάταξη απεικονίζεται στο σχήμα 3.9. Το παράθυρο αποτελείται από δύο γυάλινες επιφάνειες οι οποίες έχουν μεταξύ τους κενό, ενώ στην πάνω άκρη βρίσκεται ένας εξαεριστήρας. Η βάση και οι πλευρές του παραθύρου είναι σφραγισμένες, με εξαίρεση δύο τρύπες στη βάση οι οποίες είναι συνδεδεμένες μέσω ενός

πλαστικού αγωγού με μία αντλία και μία δεξαμενή με PCM. Η αντλία με τη σειρά της είναι και αυτή συνδεδεμένη με τη δεξαμενή που περιέχει το υγρό PCM. Η λειτουργία της αντλίας ρυθμίζεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας. Έτσι, όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει μία προκαθορισμένη τιμή, η αντλία τίθεται σε λειτουργία και το υγρό PCM αρχίζει να γεμίζει τον κενό χώρο μεταξύ των δύο γυάλινων επιφανειών του παραθύρου. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας που επικρατεί στην εξωτερική επιφάνεια, το PCM αρχίζει να κρυσώνει σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα το οποίο αυξάνεται σε πάχος με την πάροδο του χρόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το PCM να μετατραπεί όλο σε στερεό.



**Σχήμα 3.9:** Απεικόνιση των παραθύρων με PCM

Ο Ismail και Henriquez διεξήγαγαν επίσης έρευνες οι οποίες απέδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει και το καλοκαίρι για ψύξη του χώρου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η πλήρωση του παραθύρου με PCM βοηθάει στο φιλτράρισμα της ηλιακής ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες, αφού το μεγαλύτερο μέρος της

μεταφερόμενης ενέργειας απορροφάται από το PCM κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης. Η χρήση έγχρωμου PCM, ιδιαίτερα πράσινου χρώματος, αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική.

### 3.2.7 Παραθυρόφυλλα, εσωτερικές περσίδες με PCM και ημιδιαφανείς τοίχοι με PCM

Τα παραθυρόφυλλα που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης αποτελούν κινητά δομικά στοιχεία σκίασης και τοποθετούνται έξω από τις επιφάνειες των παραθύρων. Το σύστημα των παραθυρόφυλλων με PCM θα πρέπει να λειτουργεί κυκλικά, αντανakλώντας συνεχείς καθημερινούς κύκλους 24 ωρών. Κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτά προς τα έξω, έτσι ώστε η εξωτερική τους πλευρά να είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Το PCM απορροφά την ακτινοβολία, την αποθηκεύει ως λανθάνουσα θερμότητα και λιώνει. Την νύχτα, κλείνουμε τα παραθυρόφυλλα, ανοίγουμε το παράθυρο και η αποθηκευμένη θερμότητα μεταφέρεται στους εσωτερικούς χώρους. Το σύστημα των παραθυρόφυλλων με PCM θα πρέπει να ανοίγει κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να μεγιστοποιηθούν τα άμεσα ηλιακά κέρδη εσωτερικά μέσω των υαλοπινάκων και ταυτόχρονα να επιτρέπεται η φόρτισή του. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το σύστημα θα πρέπει να κλείνει ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας μέσω των παραθύρων και να επιτραπεί η εκφόρτισή του, εκλύοντας τη θερμική ενέργεια στους εσωτερικούς χώρους.

Ο Soares και οι συνεργάτες του [44] πρότειναν και βελτίωσαν αριθμητικά ένα σύστημα παραθυρόφυλλων με PCM και νότιο προσανατολισμό, το οποίο επωφελείται από την ηλιακή θερμική ενέργεια για την παροχή θέρμανσης στους εσωτερικούς χώρους κατά τη διάρκεια της νύχτας το χειμώνα στην Κοϊμπρα της Πορτογαλλίας. Τα εξωτερικά στοιχεία σκίασης των παραθύρων με PCM έχουν επίσης μελετηθεί και από άλλους ερευνητές.

Ο Buddhi και οι συνεργάτες του [45] μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού δωματίου διαστάσεων 1m x1m x1m με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το λαυρικό οξύ CG (lauric acid) με σημείο τήξης 49°C. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του δωματίου λόγω της παρουσίας PCM αυξάνεται έως 4 °C



για 4 με 5 ώρες όταν χρησιμοποιείται νύχτα, χάρη στην παρουσία του PCM.

Η χρήση παραθυρόφυλλων με PCM με τα παράθυρα παρουσιάστηκε επίσης από τον μελετητή H. Mehling [46], στο 8<sup>ο</sup> Συνέδριο Εμπειρογνομόνων με θέμα «Καινοτόμες τεχνολογίες PCM». Συνέστησε ότι η μέγιστη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας σκίαση καθυστερείται κατά 3 ώρες και η θερμοκρασία του δωματίου μειώνεται κατά 2°C με την εφαρμογή των παραθυρόφυλλων από PCM. Στο σχήμα 3.10 φαίνεται μια τέτοια εφαρμογή.



**Σχήμα 3.10:** Παραθυρόφυλλα με PCM[46]

Ένα εσωτερικό σύστημα προστασίας από τον ήλιο, το οποίο αποτελείται από κάθετες ράγες που είναι γεμάτες με PCM (σχήμα 3.11) εγκαταστάθηκε σε δωμάτια γραφείων με δυτικό προσανατολισμό που βρίσκονταν στη Karlsruhe και σε δωμάτια γραφείων νοτιοανατολικού προσανατολισμού στο Kassel. Τα συστήματα αυτά τέθηκαν υπό παρακολούθηση από τον χειμώνα 2008 μέχρι το καλοκαίρι 2010, από τον Weinlaeder και τους συνεργάτες του [47]. Τα συστήματα αυτά έδειξαν μία σημαντική δυνατότητα ψύξης το καλοκαίρι και μερικά πλεονεκτήματα τον χειμώνα σε σύγκριση με το συμβατικό αντηλιακό χωρίς PCM. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ τα συμβατικά συστήματα συχνά θερμαίνονται σε θερμοκρασίες 40°C ή παραπάνω, τα

αποτελέσματα παρακολούθησης έδειξαν ότι η θερμοκρασία επιφανείας στην εσωτερική πλευρά των ραγών με PCM σπάνια ξεπερνούσε το σημείο τήξης των PCM, το οποίο ήταν 28°C. Τα PCM επίσης μείωναν το συντελεστή ενεργειακού κέρδους του υλικού προστασίας από τον ήλιο. Οι συγγραφείς συνέστησαν τη χρήση ενός συστήματος εξαερισμού σε συνδυασμό με κεκλιμένα παράθυρα για τη βελτίωση της εκφόρτισης του συστήματος κατά τη διάρκεια της νύχτας.



**Σχήμα 3.11:** Γραφείο με εσωτερικό σύστημα προστασίας από τον ήλιο, το οποίο αποτελείται από κάθετες ράγες με PCM[47]

Ένα εξωτερικό σύστημα τοιχοποιίας TIM-PCM για τη θέρμανση του χώρου με ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας που αποτελείται από διαφανές μονωτικό υλικό (TIM) και ημιδιαφανές PCM διερευνήθηκε θεωρητικά και πειραματικά από το Manz και τους συνεργάτες του [48]. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την επιλεκτική οπτική περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας: το ορατό φως το διαπερνά ενώ η αόρατη ακτινοβολία κατά βάση απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Τα βασικά αποτελέσματα έδειξαν την υποσχόμενη θερμική - οπτική συμπεριφορά του συστήματος TIM-PCM για πεδινό σουηδικό κλίμα, ακόμα και κατά τη διάρκεια του μήνα με τη χαμηλότερη ακτινοβολία.

Ο Bontemps και οι συνεργάτες του [49] διεξήγαγαν μία μελέτη πειραματικής και αριθμητικής προσομοίωσης για την αξιολόγηση της επίδρασης ενός τοίχου που αποτελείται από κοίλα υαλότουβλα γεμάτα με PCM (σχήμα 3.12) για τη θερμική διαχείριση ενός εξωτερικού παθητικού ηλιακού θαλάμου δοκιμών. Παρατηρήθηκε λογική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και του πειράματος, και οι συγγραφείς σημείωσαν τη σημασία δημιουργίας συστημάτων με PCM σε συνδυασμό με αποδοτικό νυχτερινό εξαερισμό.



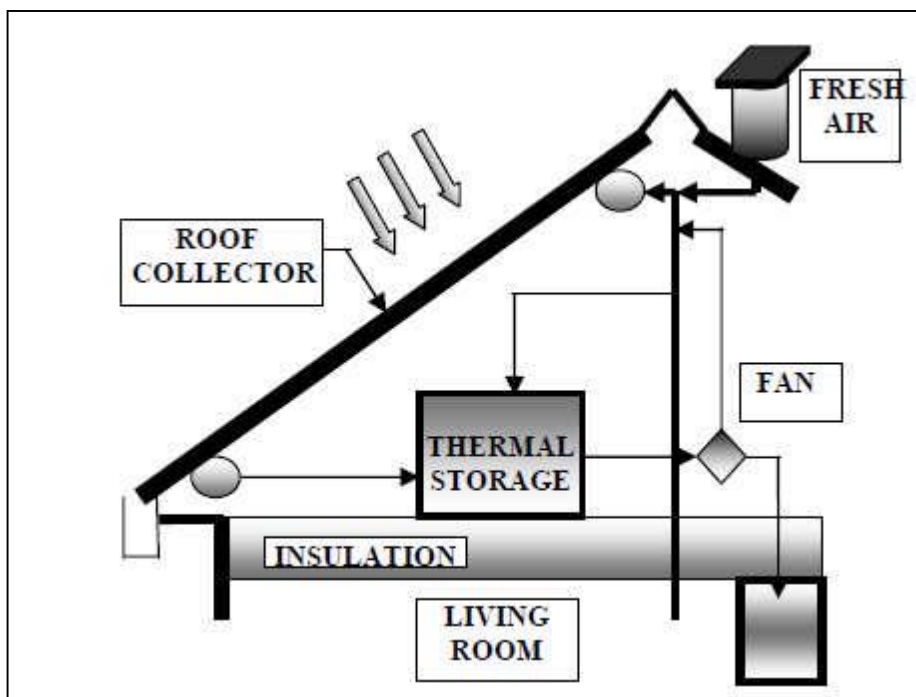
**Σχήμα 3.12:** Διαχωριστικό τοίχωμα με 16 υαλότουβλα γεμάτα με PCM

Ο Weinlader και οι συνεργάτες του [50] μελέτησαν ένα πάνελ πρόσοψης με PCM για την υποδοχή φωτισμού ημέρας και τη θέρμανση των δωματίων. Ο διπλός υαλοπίνακας, σε συνδυασμό με πάνελ πρόσοψης με PCM, μεταδίδει επαρκές φως και εξαιτίας του φαινομένου συσσώρευσης λανθάνουσας θερμότητας των PCM, υφίσταται μία περισσότερο ισορροπημένη ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε σύγκριση με την εφαρμογή διπλού υαλοπίνακα χωρίς PCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτό το σύστημα θα μπορούσε να είναι μία καλή επιλογή για ελαφριές κατασκευές. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ιδιαίτερα τα βράδια, το πάνελ πρόσοψης με PCM, παρείχε ομοιογενή φωτισμό και είχε λιγότερες απώλειες θερμότητας, βελτιώνοντας τη θερμική άνεση. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, τα αποτελέσματα έδειξαν χαμηλά κέρδη θερμότητας, γεγονός που μειώνει την αιχμή των ψυκτικών φορτίων κατά τη διάρκεια της

ημέρας.

### 3.2.8 Σύστημα θέρμανσης και ψύξης χώρου τοποθετημένο στην οροφή

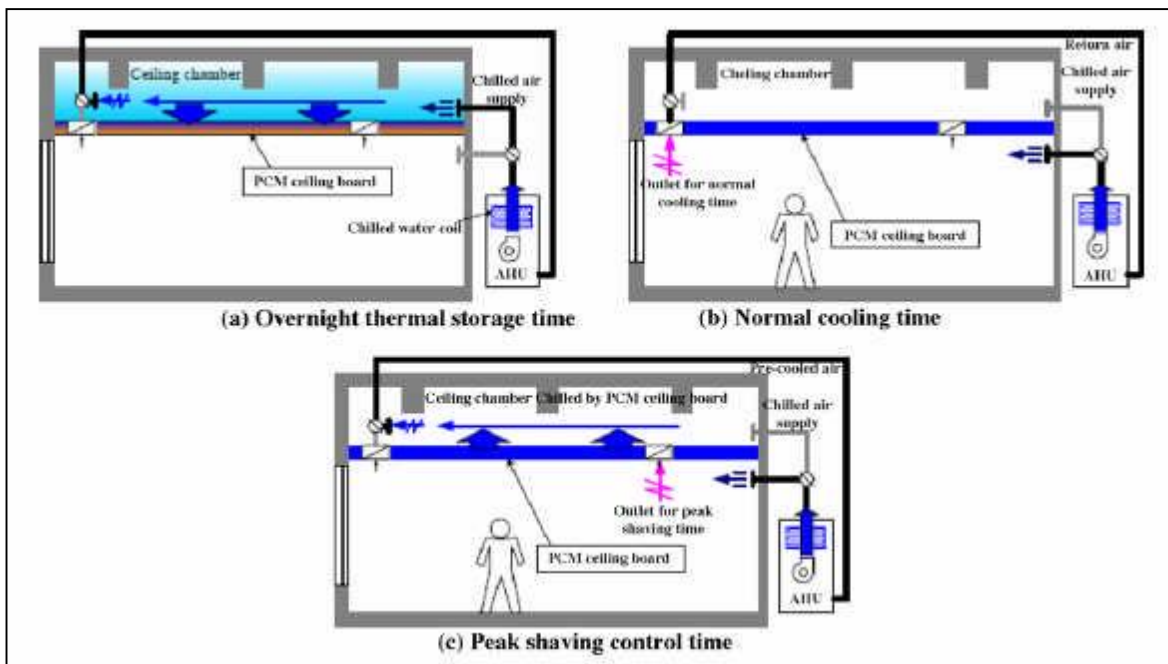
Οι σανίδες οροφής που περιέχουν PCM σε συστήματα κλιματισμού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των φορτίων αιχμής. Μια ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας (UNISA) [51] ανέπτυξε το 1997 μια οροφή με σύστημα αποθήκευσης της ηλιακής θερμότητας με αέρα, όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 3.13. Η μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, στην οποία υπάρχει μια πλάκα σιδήρου με αυλακώσεις, που χρησιμοποιείται ως ηλιακός συλλέκτης, αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέρας, ώστε η θερμότητα να μπορεί να παρέχεται κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.



Σχήμα 3.13: Σύστημα αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας με αέρα [51]

Οι Kondo και Iwamoto [52] σχεδίασαν σανίδες οροφής μέσα στις οποίες ενσωμάτωσαν μικροκάψουλες PCM για κτίριο γραφείων, για την εξομάλυνση των φορτίων αιχμής των συστημάτων κλιματισμού. Το σημείο τήξης και η θερμότητα τήξης του PCM σε μικροκάψουλες, που χρησιμοποιήθηκε για να ενισχύσει μία απλή σανίδα

οροφής από πετροβάμβακα, ήταν αντίστοιχα  $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $174,4\text{kJ/kg}$ . Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο ψυχρός αέρας από την κεντρική κλιματιστική μονάδα (Air-Handling Unit - AHU) με μειωμένο συντελεστή ηλεκτρικής ενέργειας ρέει στο χώρο της οροφής και ψύχει τις πλάκες PCM της οροφής. Κατά τη διάρκεια της ώρας κανονικής ψύξης, ο κρύος αέρας από την κλιματιστική συσκευή ρέει κατευθείαν στο εσωτερικό του δωματίου. Κατά τη διάρκεια των φορτίων αιχμής ο αέρας από το δωμάτιο επιστρέφει στην κλιματιστική συσκευή μέσω του χώρου στο θάλαμο της οροφής. Καθώς ο αέρας αυτός περνά μέσα από τις πλάκες PCM της οροφής, ο θερμός αέρας του δωματίου προψύχεται περνώντας πάνω από την ψυχρή σανίδα. Διαπίστωσαν ότι το φορτίο της κλιματιστικής συσκευής μειώνεται κατά την περίοδο αιχμής. Το μόνο ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζεται είναι ότι εξαιτίας της αναφλεξιμότητάς τους οι πλάκες οροφής απαιτούν βελτίωση. Πέραν της πειραματικής ανάλυσης, έχουν διεξαχθεί πολλές αριθμητικές εργασίες για την ανάλυση της θερμικής απόδοσης αυτού του συστήματος.

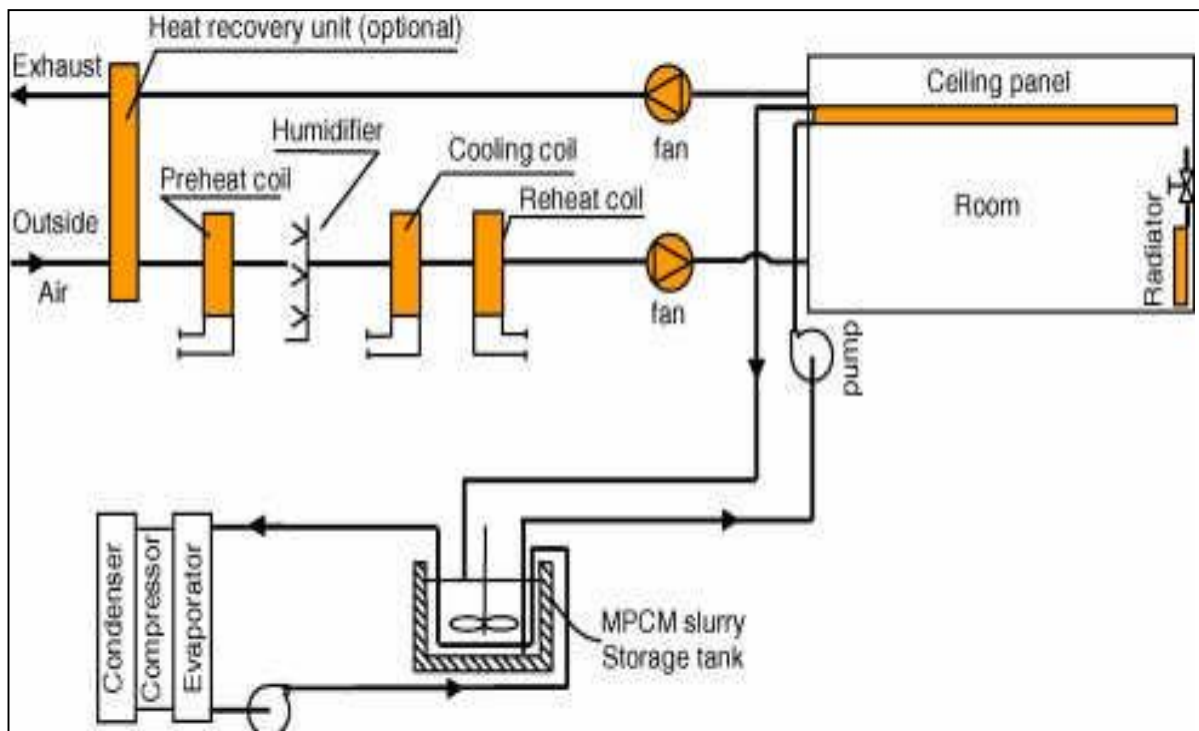


**Σχήμα 3.14** : Απεικόνιση των διαφορετικών περιόδων λειτουργίας του συστήματος με τις σανίδες οροφής

Οι Koschenz και Lehmann [53] πρότειναν μια νέα ιδέα για θερμικά ενεργητικά πάνελ οροφής σε ανακαινισμένα κτίρια. Σε αυτό το σύστημα το μείγμα των μικροκάψουλων PCM και του γύψου τοποθετήθηκε μέσα σε ένα κατασκευασμένο δίσκο από φύλλα χάλυβα, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως υποστήριγμα για τη διατήρηση της μηχανικής σταθερότητας του πάνελ. Ένα σύστημα τριχοειδών σωλήνων νερού χρησιμοποιήθηκε για

τον έλεγχο της θερμικής μάζας. Μετά από τη διεξαγωγή δοκιμών σχετικά με τη θερμική απόδοση του συστήματος, συμπέραναν ότι ένα στρώμα μικροκάψουλων PCM και γύψου πάχους μόλις 5cm ήταν αρκετό για να διατηρήσει τη θερμοκρασία σε τιμή που προσφέρει άνεση στους εργαζόμενους του γραφείου.

Ακόμα μια νέα προσέγγιση που προστέθηκε ήταν η εφαρμογή των μικροκάψουλων πολτοποιημένων PCM σε συστήματα ψύξης οροφών. Οι μικροκάψουλες πολτοποιημένων PCM λειτουργούν ως μέσα μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας. Τα τελευταία χρόνια έχουν διερευνηθεί τα χαρακτηριστικά της ροής και της μεταφοράς θερμότητας των μικροκάψουλων πολτοποιημένων PCM. Οι Wang και Niu [54] σχεδίασαν ένα συνδυασμό συστήματος ψύξης οροφής και αποθήκευσης με μικροκάψουλες πολτοποιημένου PCM (σχήμα 3.15) το οποίο θεωρήθηκε ως το καλύτερο αναμεταξύ τριών διαφορετικών συστημάτων, ψύξης οροφής σε συνδυασμό με αποθήκευση με μικροκάψουλες πολτοποιημένων PCM, ψύξης οροφής με αποθήκευση πάγου, και ψύξης οροφής χωρίς αποθήκευση θερμότητας, εξετάζοντάς τα και όσο αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και στις διακυμάνσεις ζήτησης ψύξης.



**Σχήμα 3.15:** Σύστημα ψύξης οροφής με δεξαμενή μικροκάψουλων πολτοποιημένων PCM[54]

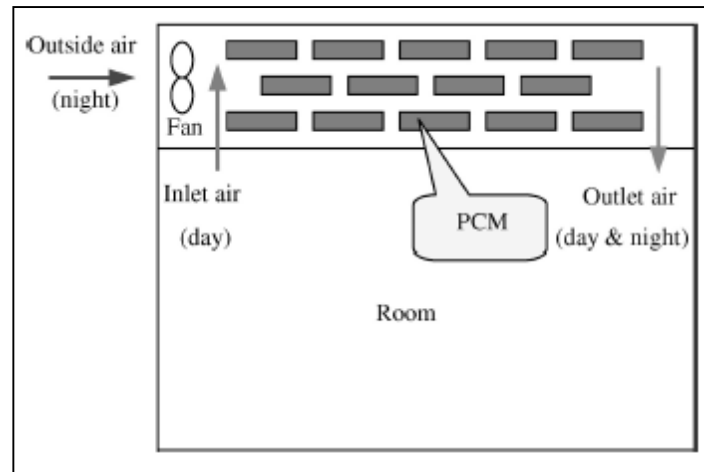
### 3.2.9 Υποδαπέδια ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης με PCM

Τα υποδαπέδια ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης μπορούν να φορτιστούν χρησιμοποιώντας φθηνή ηλεκτρική ενέργεια κατά την διάρκεια της νύχτας και να αποδίδουν τη θερμότητα που αποθήκευσαν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μετατόπιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις περιόδους αιχμής σε περιόδους εκτός αιχμής θα προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ο Lin και οι συνεργάτες του [55] παρουσίασαν ένα σύστημα υποδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες σταθερού σχήματος PCM και χωρίς αγωγούς παροχής αέρα, η οποία χαρακτηρίζεται ως μια πολύ καλή και εφικτή εφαρμογή. Για την υπόλοιπη εργασία τους, είχαν κατασκευάσει επίσης ένα μοντέλο για την ανάλυση της θερμικής απόδοσης αυτού του συστήματος θερμότητας, όπως και πολλών παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμική του απόδοση [56].

### 3.2.10 Ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας

Η φυσική ψύξη αποτελεί μια έννοια που έχει αναπτυχθεί για εφαρμογές κλιματισμού, όπου η ψύξη συλλέγεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας και απελευθερώνεται στο δωμάτιο κατά τη διάρκεια των πιο θερμών ωρών της ημέρας. Οι Vakilatojjar και Saman [57] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την ανάλυση του συστήματος αποθήκευσης αλλαγής φάσης για εφαρμογές κλιματισμού. Διαπίστωσαν ότι μικρότερα κενά αέρος και πιο λεπτές πλάκες PCM μπορούσαν να προσφέρουν καλύτερη θερμική απόδοση.

Ο Kang και οι συνεργάτες του [58] πρότειναν ένα νέο είδος νυχτερινού εξαερισμού με σύστημα αποθήκευσης συσκευασμένου στρώματος PCM (Night Ventilation with PCM Packed Bed Storage system –NVP), το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.16. Τη νύχτα ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται μέσω του συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για να ψύξουν τα PCM, ενώ κατά τη διάρκεια της μέρας η δροσιά αποδίδεται στο χώρο.



**Σχήμα 3.16:** Σχηματικό διάγραμμα συστήματος NVP[58]



## Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>
2. <http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-03-79.pdf>
3. Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc., Florida, USA, 1983
4. Vineet Veer Tyagi, and D.Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 6 1146-1166 (2007).
5. Athienitis AK, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. Building and Environment 2 (5) 3405-410 (1997).
6. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, A. Pasupathy, R. Velraj., R.V. Seenira, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 39–64 (2008).
7. F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel, "Optimization of a phase change material wallboard for building use", Applied Thermal Engineering 28 (11–12) 1291–1298 (2008).
8. F. Kuznik, J. Virgone, J.-J. Roux, "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation ", Energy and Buildings 40 (2) 148–156 (2008).
9. F. Kuznik, J. Virgone, Experimental investigation of wallboard containing phase change material: data for validation of numerical modeling, Energy and Buildings 41 (5) 561–570 (2009).
10. F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard, Renewable Energy 36 (5) 1458–1462 (2011).
11. L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings 38 (1) 18–24 (2006).
12. M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, D. Quenard, Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material, Energy and Buildings 38 (4) 357–366 (2006).
13. Ahmad M, Bontemps A, Sallée H, Quenard D. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. Energy and Buildings 38: 673-681 (2006).
14. A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, Building and Environment 5 405–410 (1997).
15. B.M. Diaconu, M. Cruceru, "Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings ", Energy and Buildings 42 (10) 1759–1772 (2010).
16. B.M. Diaconu, "Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: Influence of occupancy pattern and ventilation ", Energy and Buildings 43 (1) 101–107 (2011).
17. G. Zhou, Y. Yang, H. Xu, Performance of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside heat flux waves, Applied Energy 88 2113–2121 (2011).

18. G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, J. Cheng, Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves, *Applied Energy* 87 2666–2672 (2010).
19. N. Zhu, S. Wang, Z. Ma, Y. Sun, Energy performance and optimal control of airconditioned buildings with envelopes enhanced by phase change materials, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 3197–3205.
20. G. Zhou, Y. Yang, H. Xu, Energy performance of a hybrid space-cooling system in an office building using SSPCM thermal storage and night ventilation, *Solar Energy* 85 477–485 (2011).
21. G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, S. Zhou, Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation, *Applied Energy* 86 52–59 (2009).
22. G. Zhou, Y. Zhang, K. Lin, W. Xiao, Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates, *Renewable Energy* 33 (6) 1228–1236 (2008).
23. G. Zhou, Y. Zhang, X. Wang, K. Lin, W. Xiao, An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating, *Solar Energy* 81 1351–1360 (2007).
24. E.M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings* 40 (3) 351–357 (2008).
25. A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings* 42 (4) 534–540 (2010).
26. T. Silva, R. Vicente, N. Soares, V. Ferreira, Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution, *Energy and Buildings* 49 235–245 (2012).
27. L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 39 (2) (2007) 113–119.
28. S. Chandra, R. Kumar, S. Kaushik, S. Kaul, Thermal performance of a non-airconditioned building with PCCM thermal storage wall, *Energy Conversion and Management* 25 (1) 15–20 (1985).
29. A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, A.H.M.E. Reinders, Experimental research on the use of micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Solar Energy* 85 (5) 1007–1020(2011).
30. A. Arnault, F. Mathieu-Potvin, L. Gosselin, Internal surfaces including phase change materials for passive optimal shift of solar heat gain, *International Journal of Thermal Sciences* 49 (11) 2148–2156 (2010).
31. E.M. Alawadhi, H.J. Alqallaf, Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: numerical study, *Energy Conversion and Management* 52 (8-9) 2958–2964 (2011).
32. A.V. Sá, M. Azenha, H. de Sousa, A. Samagaio, Thermal enhancement of plastering mortars with phase change materials: experimental and numerical approach, *Energy and Buildings* 49 6–27(2012).
33. Eiamworawutthikul C, Strohbahn J, Harman C. Investigation of phase change thermal storage in passive solar design for light-construction building in the southeastern climate region. A research program to promote energy

- conservation and the use of renewable energy.
34. Swet CJ. Phase change storage in passive solar architecture. In: Proceedings of the fifth national passive solar conference, Amherst, MA, 282–6 (1980).
  35. Ghoneim AA, Killein SA, Duffie JA. Analysis of collector—storage building walls using phase change materials. *Sol Energy* 47(1) 237–42 (1991).
  36. Chandra S, Kumar R, Kaushik S, Kaul S. Thermal performance of a non-A/C building with PCCM thermal storage wall. *Energy Convers Manage* 25(1) 15–20 (1985).
  37. Farouk B, Guceri SI. Tromb–Michal wall using a phase change material. In: Proceedings of the second Miami international conference on alternative energy, Miami, 1979.
  38. Buddhi D, Sharma SD. Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material. *Energy Convers Manage* 40 1979–84 (1999).
  39. Stritih U, Novak P. Solar heat storage wall for building ventilation, In: World renewable energy congress (WREC), 268–71 (1996\_).
  40. Bourdeau LE. Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage. In: Hayes J, Snyder R, editors. Proceedings of the fifth national passive solar conference, 19–26 October, Amherst. Newark, DE: American Solar Energy Society 297–301(1980).
  41. Knowler T. Proportioning composites for efficient-TSWs. *Sol Energy* 31(3) 319–26 (1983).
  42. M. Moghiman, M. Hatami, M. Boghrati, Improvement the winter space heating by the effect of rotating thermal wall storage, in: Proceedings of ECOS 2011, Novi Sad, Serbia, July 4–7 (2011).
  43. K.A.R.Ismail, J.R.Henriquez, Thermally effective windows with moving phase change material curtains *Applied Thermal Engineering* 21 (18) 1909-1923 (2001).
  44. N. Soares, A. Samagaio, R. Vicente, J. Costa, Numerical simulation of a PCM shutter for buildings space heating during the winter, in: Proceedings of WREC – World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden, 8–13 May (2011).
  45. D. Buddhi, H.S. Mishra, A. Sharma, Thermal performance studies of a test cell having a PCM window in south direction. Annex 17, Indore, India, 2003.
  46. Mehling Harald. Strategic project “Innovative PCM-Technology”---results and future perspectives, 8th expert meeting and work shop, Kizkalesi, Turkey, April 18-24 (2004).
  47. H. Weinlaeder, W. Koerner, M. Heidenfelder, Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage, *Energy and Buildings* 43 (9) (2011) 2468–2475.
  48. H. Manz, P.W. Egolf, P. Suter, A. Goetzberger, TIM-PCM, external wall system for solar space heating and daylight, *Solar Energy* 61 (6) 369–379 (1997).
  49. A. Bontemps, M. Ahmad, K. Johannès, H. Sallée, Experimental and modeling study of twin cells with latent heat storage walls, *Energy and Buildings* 43 (9) 2456–2461 (2011).
  50. H. Weinläder, A. Beck, J. Fricke, PCM-facade-panel for daylighting and room heating, *Solar Energy* 78 (2) 177–186 (2005).



51. Saman WY, Belusko M. " Roof integrated unglazed transpired solar air heater", Proc. of the 1997 Australian and New Zealand Solar Energy Society, Lee T. (ED). Paper 66, Canberra, Australia, 1997.
52. Kondo T, Iwamoto T. "Research on using the PCM for ceiling board ", IEA ECESIA, Annex 17, 3rd workshop, Tokyo, Japan, 2002.
53. Koschenz M, Lehmann B. "Development of a thermally actived ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings ", Energy and Buildings 36 567-578 (2004).
54. Wang XC, Niu JL. Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry. Energy Conversion and Management 50 583-591 (2009).
55. Lin KP, Zhang YP, Di HF, Yang R. "Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage ", Energy Conversion and Management 48 2016-2024 (2007)
56. Lin KP, Zhang YP, Xu X, Di HF, Yang R, Qin PH. "Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates ", Building and Environment 39 (12) 1427-1434 (2004).
57. Wakilatojjar SM, Saman W. " Analysis and modeling of a phase change storage system for air conditioning applications "Applied Thermal Engineering 21 249-263 (2001).
58. Kang YB, Jiang Y, Zhang YP, " Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system –NVP system ", Energy and Building 35 (4) 417-425 (2003).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΩΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

### 4.1 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων PCM

Η διαδικασία επιλογής ενός κατάλληλου PCM είναι εξαιρετικά περίπλοκη αλλά και κρίσιμης σημασίας για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Το υποψήφιο PCM θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από το κατάλληλο σημείο τήξης, και να διαθέτει την επιθυμητή θερμότητα τήξης και θερμική αγωγιμότητα που ορίζονται από την πρακτική εφαρμογή. Συνεπώς, οι μέθοδοι για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων των PCM είναι πολύ σημαντικές. Υπάρχουν πολλές τεχνικές μετρήσεων αλλά αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως είναι οι εξής:

- 1) Διαφορική Θερμική Ανάλυση-DTA-Differential Thermal Analysis
- 2) Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης-DSC-Differential Scanning Calorimetry
- 3) Μέθοδος T-History

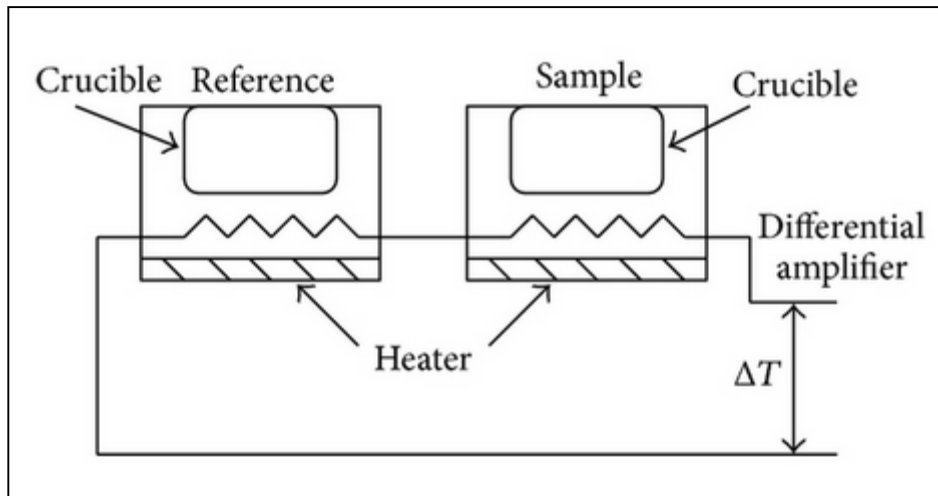
#### 4.1.1 Διαφορική θερμική ανάλυση (DTA)

Η DTA είναι η πιο μελετημένη και παλαιότερη μέθοδος θερμικών μετρήσεων. Η μέθοδος DTA έχει ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μέτρησης από  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Σε υψηλές θερμοκρασίες η DTA απαιτεί ομοιόμορφη θέρμανση, συμμετρικό και ισοδύναμο σε βάρος δείγμα, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ευαισθησία.

#### Συσκευή Δοκιμής

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει ένα δοχείο χοάνη, ένα θερμοστοιχείο, ένα ενισχυτή, και τον καταγραφέα. Το PCM και το υλικό αναφοράς (με γνωστές θερμικές ιδιότητες) τοποθετούνται στο δοχείο. Κάτω από το δοχείο είναι ένα γαλβανικό φύλλο και δύο θερμοστοιχεία με αντίθετη πολικότητα. Με την πρόσδοση θερμότητας και στα δυο υλικά όταν η θερμοκρασία του PCM φθάσει στο σημείο τήξης του, παρατηρείται μια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ PCM και του υλικού αναφοράς. Τα δύο θερμοστοιχεία μετρούν τη διαφορά θερμοκρασίας με τη μορφή διαφοράς δυναμικού και ακολούθως τα αποτελέσματα διαβιβάζονται στο διαφορικό ενισχυτή. Μια τυπική διάταξη αυτής της

μεθόδου παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1:** Συσκευή DTA

### Αρχή Ελέγχου

Η DTA μετράει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του PCM και του υλικού αναφοράς, όταν και τα δύο υποβληθούν στο ίδιο θερμικό φορτίο. Ακολουθώς και τα δύο συγκρίνονται χρησιμοποιώντας μια θερμοκρασία. Αυτή η μέθοδος είναι ικανή να μετρήσει την ειδική θερμοχωρητικότητα και την λανθάνουσα θερμότητα.

Η βασική αρχή φαίνεται στο σχήμα 4.2. Όταν το PCM και το υλικό αναφοράς απορροφήσουν την ίδια ποσότητα θερμότητας, οι μεταβολές στις θερμοκρασίες τους είναι διαφορετικές λόγω των διαφορετικών τους θερμικών ιδιοτήτων.

Η αλλαγή φάσης και οι υπόλοιπες θερμικές ιδιότητες μπορούν έπειτα να ελεγχθούν μέσω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του δείγματος και του υλικού αναφοράς. Το σχήμα 4.3 παριστάνει την καμπύλη της θερμοκρασίας και την καμπύλη DTA όπου η  $T_w$  είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Το σχήμα 4.4 δείχνει τη καμπύλη θερμοκρασιακής διαφοράς. Η ενθαλπιακή διαφορά που προκαλείται από την θέρμανση, δίνεται από την σχέση:[1]

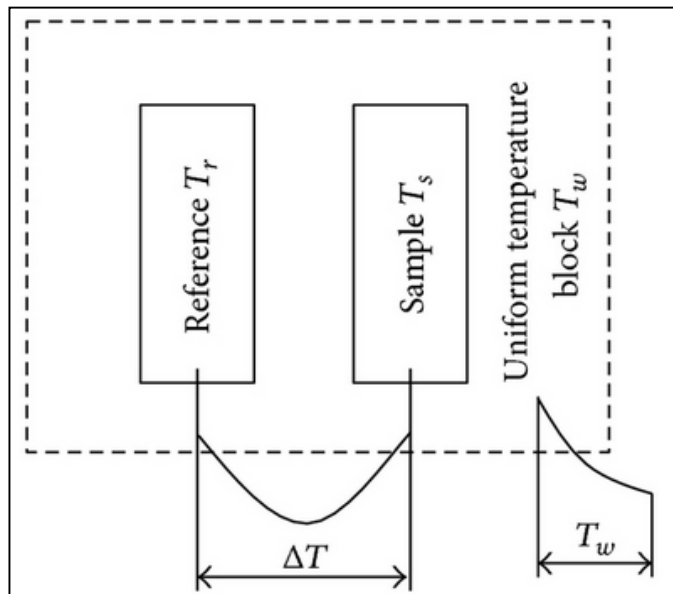
$$\Delta H = h_T \cdot \int_a^c [\Delta T - (\Delta T)_a] dt + h_T \int_c^\infty [\Delta T - (\Delta T)_a] dt \quad [4.1]$$

Άρα:

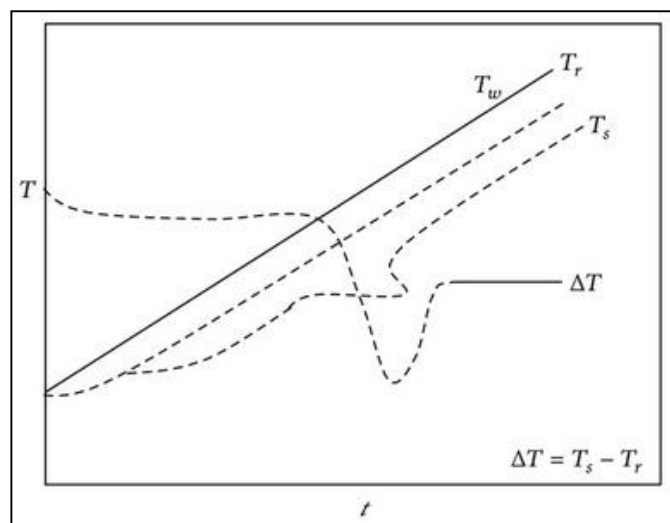
$$\Delta H = h_T \cdot \int_a^\infty [\Delta T - (\Delta T)_a] dt = h_T \cdot S \quad [4.2]$$

Όπου:

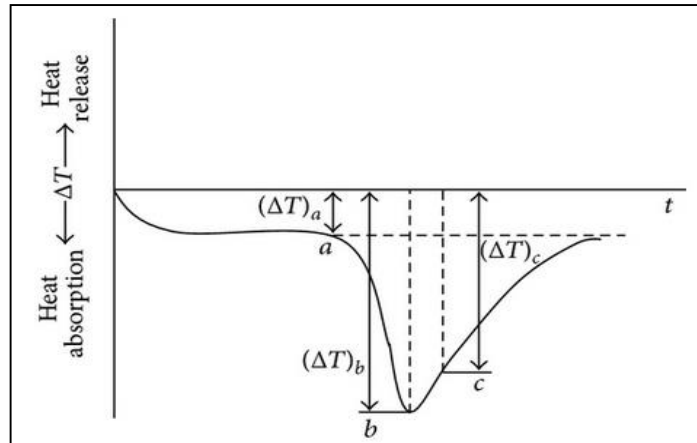
- $S$  : είναι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη
- $h_t$ : είναι ο συντελεστής συναγωγής.



**Σχήμα 4.2:** Η βασική αρχή της DTA



**Σχήμα 4.3:** Η καμπύλη αύξησης της θερμοκρασίας και η καμπύλη DTA.



**Σχήμα 4.4:** Καμπύλη θερμοκρασιακής διαφοράς DTA.

#### 4.1.2 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)

Σε μία δοκιμή DSC, το δείγμα και το υλικό αναφοράς διατηρούνται σε σχεδόν ίδια θερμοκρασία (σε αντίθεση με τη μέθοδο DTA) καθ' όλη τη διάρκεια μέτρησης. Μετρώντας τη διαφορά της θερμότητας, που προστίθεται μεταξύ του δείγματος και του υλικού αναφοράς, μπορούν να διαπιστωθούν πολλές θερμικές ιδιότητες για το δείγμα, όπως η θερμότητα σύντηξης, η θερμοχωρητικότητα και η θερμοκρασία τήξης /στερεοποίησης.

Η DSC μέθοδος αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970 και υπάρχουν αρκετές διαφορές με τη DTA. Η DTA καταγράφει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υλικού αναφοράς και του δείγματος. Αυτή η διαφορά προκλήθηκε από την μεταβολή της θερμοχωρητικότητας, η οποία συνδέεται με την αλλαγή της φάσης. Στη DSC καταγράφεται η διαφορά στην θερμότητα που απορροφάται μεταξύ υλικού αναφοράς και του PCM, όταν και τα δύο κρατηθούν στην ίδια θερμοκρασία. Σε δοκιμή DSC, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο υλικών μπορεί να είναι μηδέν, οπότε δεν υπήρχε μεταφορά θερμότητας, γι αυτό το λόγο, η DSC είναι πιο ακριβής από ό,τι η DTA.

#### Διάταξη δοκιμών

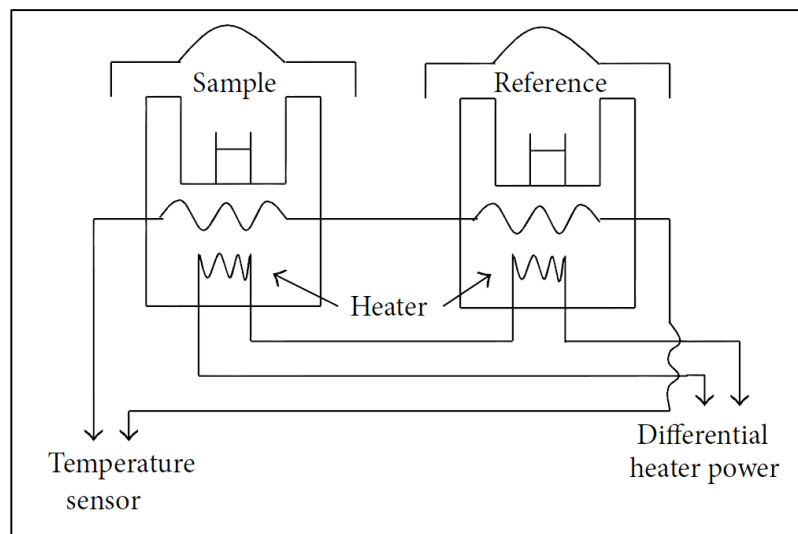
Τα σχήματα 4.5 και 4.6 επεξηγούν τη συσκευή. Ένα θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης αποτελείται από ένα σύστημα δυο κυψελίδων οι οποίες θερμαίνονται ή ψύχονται ομοίομορφα από διαφορετικά θερμαντικά σώματα με σταθερό ρυθμό. Στη μία κυψελίδα περιέχεται το υλικό αναφοράς ενώ στην άλλη το δείγμα. Κατά τη διάρκεια του



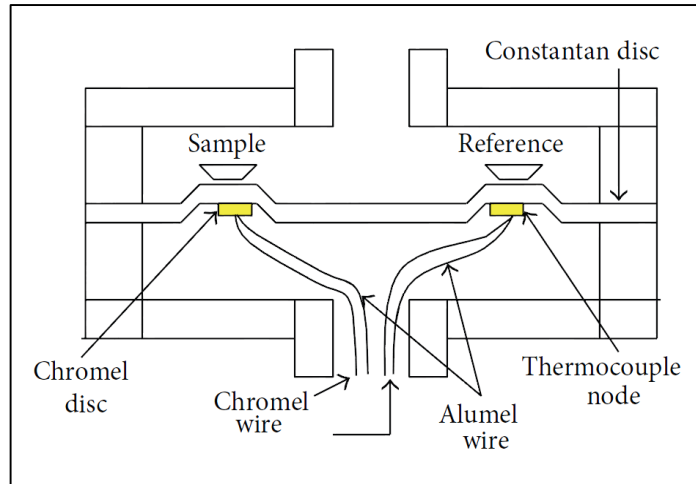
πειράματος η θερμοκρασία του υπό μελέτη δείγματος παραμένει συνεχώς ίση με αυτή του δείγματος αναφοράς, ενώ η θερμοκρασία και των δύο αυξάνει (ή μειώνεται) γραμμικά με το χρόνο ακολουθώντας τον προκαθορισμένο ρυθμό θέρμανσης (ή ψύξης).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετράται η διαφορά στη ροή θερμότητας που προσφέρεται (ή απάγεται) στο υπό μελέτη δείγμα για την αύξηση (ή μείωση) της θερμοκρασίας του έναντι αυτής που προσφέρεται (ή απάγεται) στο δείγμα αναφοράς, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όταν το υπό μελέτη δείγμα υπόκειται σε μετατροπή φάσης, περισσότερη (ή λιγότερη) θερμότητα προσφέρεται σε αυτό, προκειμένου η θερμοκρασία του να διατηρηθεί ίση με αυτή του δείγματος αναφοράς. Παρατηρώντας τις διαφορές ροής θερμότητας ανάμεσα στο δείγμα και το υλικό αναφοράς μπορούν να καταγραφούν τα ποσά ενέργειας που απορροφώνται ή απελευθερώνονται κατά τη μετατροπή των διαφόρων φάσεων.

Η συσκευή αυτή είναι μια ώριμη συσκευή με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας, υψηλής ανάλυσης ισχύος, και υψηλής ευαισθησίας.



**Σχήμα 4.5:** Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)



**Σχήμα 4.6:** Διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC)

### Αρχή Ελέγχου.

Η DSC είναι θερμική αναλυτική τεχνική, που χρησιμοποιεί τον έλεγχο της θερμοκρασίας για τη μέτρηση της σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας και της ενέργειας που απορροφάται από το δείγμα αναφοράς και το PCM. Η DSC είναι ικανή να μετρήσει την ενθαλπία και την ειδική θερμοχωρητικότητα. Υπάρχουν δύο μοντέλα για τη μέθοδο αυτή: το μοντέλο σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης και το μοντέλο ισόθερων βημάτων.

Η μέθοδος του σταθερού ρυθμού ψύξης (dynamic method) είναι η μέθοδος κατά την οποία μετράται η διαφορά ισχύος που απαιτείται για να διατηρηθεί το δείγμα αναφοράς και το PCM στην ίδια θερμοκρασία. Αυτό περιγράφεται από:

$$\Delta W = \frac{dQ_S}{dt} - \frac{dQ_R}{dt} = \frac{dH}{dt} = I_T \cdot \Delta V \quad [4.3]$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας ανά μονάδα χρόνου περιγράφηκε από:

$$\frac{dH}{dt} = I_T \cdot \Delta V \quad [4.4]$$

Όπου:

$\Delta W$ : η διαφορά ισχύος που απαιτείται (W)



$Q_S$  και  $Q_R$ : η ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται από το PCM και το υλικού αναφοράς (J)

$dH/dt$ : η μεταβολή ενθαλπίας ανά μονάδα χρόνου ( ποσοστό της ροής θερμότητας ) J /s

$I$ : το ηλεκτρικό ρεύμα (A)

$\Delta V$  : η διαφορά τάσης (V)

Η μέθοδος των ισόθερων βημάτων μετράει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του δείγματος αναφοράς και του PCM για την ίδια (αναρροφούμενη) ποσότητα ισχύος. Η διαφορά θερμοκρασίας μετατρέπεται σε διαφορά θερμικής ροής χρησιμοποιώντας την εξίσωση της θερμορροής.

Η  $\Delta T$  είναι ανάλογη προς τη διαφορά θερμικής ροής και περιγράφεται από την πιο κάτω εξίσωση 4.5

$$\Delta T = \frac{i_S - i_R}{\left(\frac{1}{R}\right) + \left(\frac{1}{R_g}\right) + \left(\frac{2}{R_b}\right)} \quad [4.5]$$

Όπου:

**$R$** : η τιμή της θερμικής αντίστασης του δείγματος και του βραχίονα του (  $m^2 k/W$  )

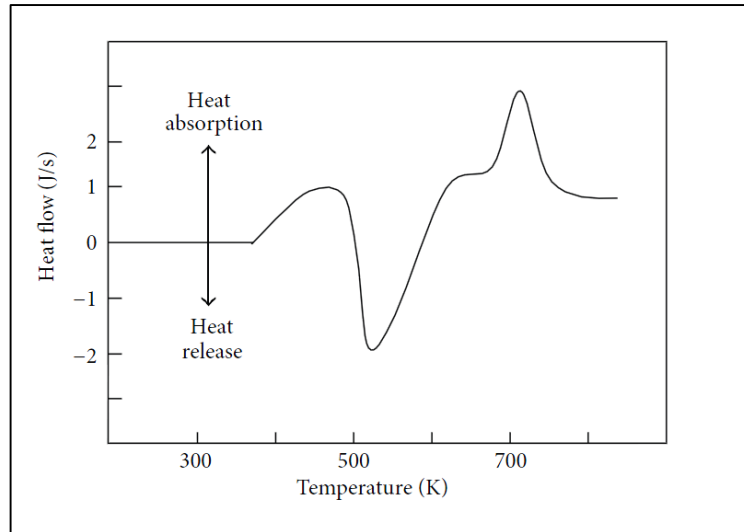
**$R_b$** : η τιμή της θερμική αντίστασης της γέφυρα μεταξύ δείγματος και PCM (  $m^2 k/W$  )

**$R_g$** : η τιμή της θερμικής αντίστασης διαρροής θερμότητας,  $m^2 k/W$

**$i_S$**  και  **$i_R$** : η θερμική ροή του δείγματος και του υλικού αναφοράς ( $W/m^2$  ) (που ελήφθη με τη χρήση του ισοδύναμου θερμικού νόμου του Kirchoff).

### Μέτρηση ενθαλπίας.

Η DSC καταχωρεί απευθείας τη ροή θερμότητας κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη είναι ανάλογη με τη θερμότητα που μεταφέρεται. Η καμπύλη DSC κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία στον άξονα των  $x$  και τη θερμική ροή στον άξονα των  $y$  (σχήμα 4.7 ).



**Σχήμα 4.7:** Μια τυπική καμπύλη DSC

### Μέτρηση ειδικής θερμοχωρητικότητας.

Το ποσοστό της θερμικής ροής  $dH/dt$  είναι ανάλογο της ειδικής θερμοχωρητικότητας του δείγματος. Η θερμοχωρητικότητα  $c_p$  του PCM υπολογίστηκε από:

$$c_p = \frac{1}{m} \cdot \frac{dH}{dT} \quad [4.6]$$

Όπου:

- $c_p$ : η θερμοχωρητικότητα του PCM [J/(kg·K)]
- $dT/dt$ : η μεταβολή της θερμοκρασίας στο χρόνο (K/s)
- $m$ : η μάζα του PCM (kg)

Η μέθοδος αυτή είναι πιο χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία της από την προηγούμενη μέθοδο. Απαιτεί δύσκολο προγραμματισμό και αξιολόγηση δεδομένων, δηλαδή εξειδικευμένο προσωπικό. Παρόλα αυτά, είναι προτιμότερη διότι προσφέρει την ίδια ακρίβεια για όλα τα υλικά-δείγματα χωρίς μακροχρόνιες δοκιμές και διαδικασίες προσαρμογής.

Η μέθοδος DSC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των θερμικών ιδιοτήτων των γυψοσανίδων με PCM. Με τη μέθοδο αυτή, μπορεί να διαπιστωθεί όχι μόνο η θερμοκρασία τήξης και η θερμότητα σύντηξης του PCM, αλλά μπορεί επίσης να

ελεγχθεί και η κατανομή της στη γυψοσανίδα με PCM, η αποθηκευτική ικανότητα της γυψοσανίδας με PCM και η επίδραση πολλαπλών θερμικών κύκλων στις θερμικές ιδιότητες των PCM.

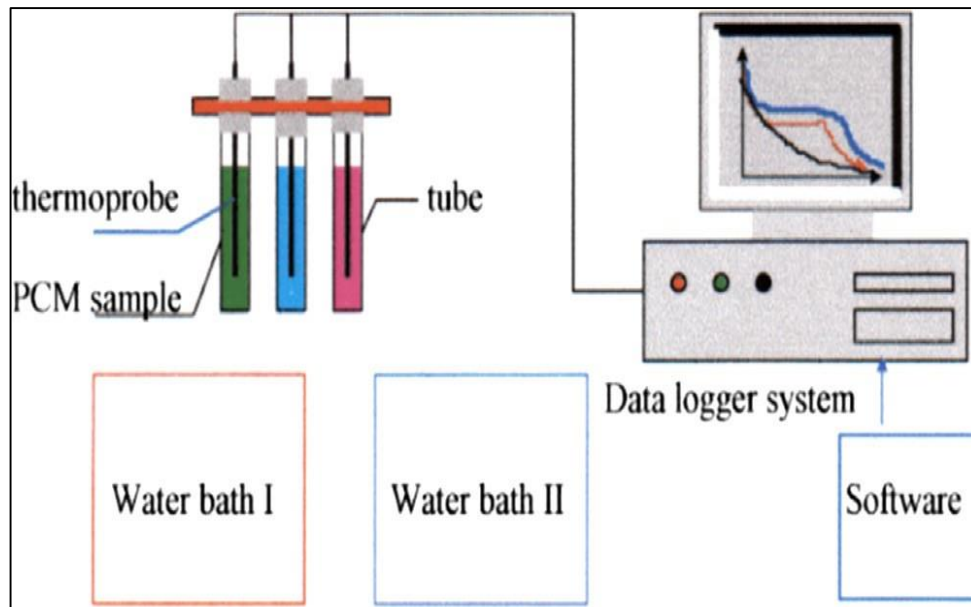
Τόσο η μέθοδος DTA όσο και η μέθοδος DSC θεωρούνται καλές μέθοδοι για τη μέτρηση της θερμότητας τήξεως. Τα μειονεκτήματα όμως των μεθόδων DSC και DTA είναι εμφανή, καθώς το μέγεθος των δειγμάτων το οποίο είναι πολύ μικρό (μεταξύ 1-10mg) σε σύγκριση με το πραγματικό μέγεθος των χρησιμοποιηθέντων PCM, οπότε οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων είναι συχνά πολύ διαφορετικές από τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις πρακτικές εφαρμογές.[1,2]

#### 4.1.3 Μέθοδος T-history (Temperature-history method)

Ο Zhang και άλλοι επιστήμονες [4], το 1999 ανέλυσαν τα μειονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων, συμπεριλαμβανομένων των θερμιδομετρικών μεθόδων DSC και DTA και έπειτα πρότειναν μια νέα βελτιωμένη μέθοδο, με την ονομασία T-history για τον προσδιορισμό του σημείου τήξης, του βαθμού υπόψυξης, της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, της ειδικής θερμοχωρητικότητας, της θερμικής αγωγιμότητας των PCM καθώς και του συντελεστή θερμικής διάχυσης του PCM. Με αυτή τη μέθοδο έχουν μετρηθεί σε διάφορα πειράματα οι θερμοφυσικές ιδιότητες των παραφινών, των ένυδρων αλάτων και τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στα αντίστοιχα θεωρητικά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Η μέθοδος αυτή ονομάστηκε έτσι από την καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου, η οποία είναι αποτέλεσμα των μετρήσεων που πραγματοποιούνται με την μέθοδο αυτή.

#### Διάταξη δοκιμών

Η πειραματική διάταξη της μεθόδου T-history, απεικονίζεται στο σχήμα 4.8. Ένας ή περισσότεροι δοκιμαστικοί σωλήνες γεμίζονται με το PCM του οποίου θέλουν να μετρηθούν οι ιδιότητες και ένας άλλος δοκιμαστικός σωλήνας γεμίζεται με το υλικό αναφοράς. Το δείγμα αναφοράς είναι συνήθως νερό, αλλά κάθε είδους υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον είναι γνωστές οι θερμοφυσικές του ιδιότητες. Συνεπώς η διαδικασία αλλαγής φάσης μπορεί να παρατηρηθεί οπτικά κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

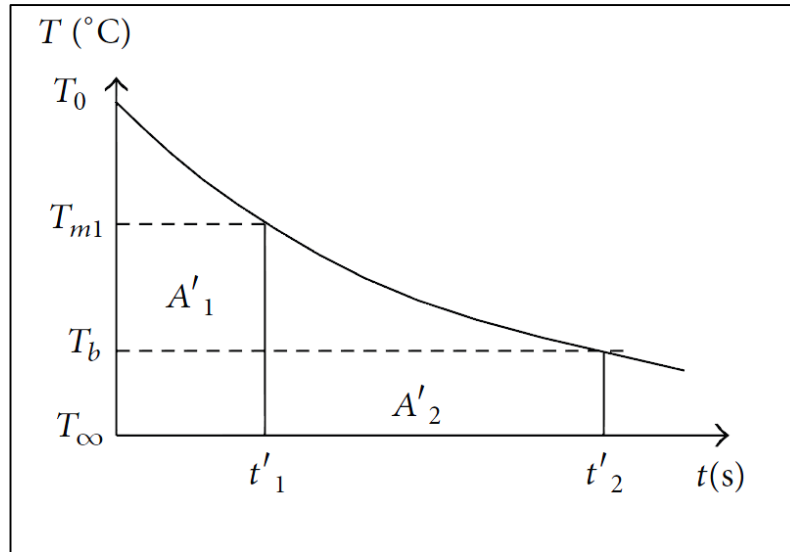


**Σχήμα 4.8:** Πειραματική διάταξη μεθόδου T-history [3]

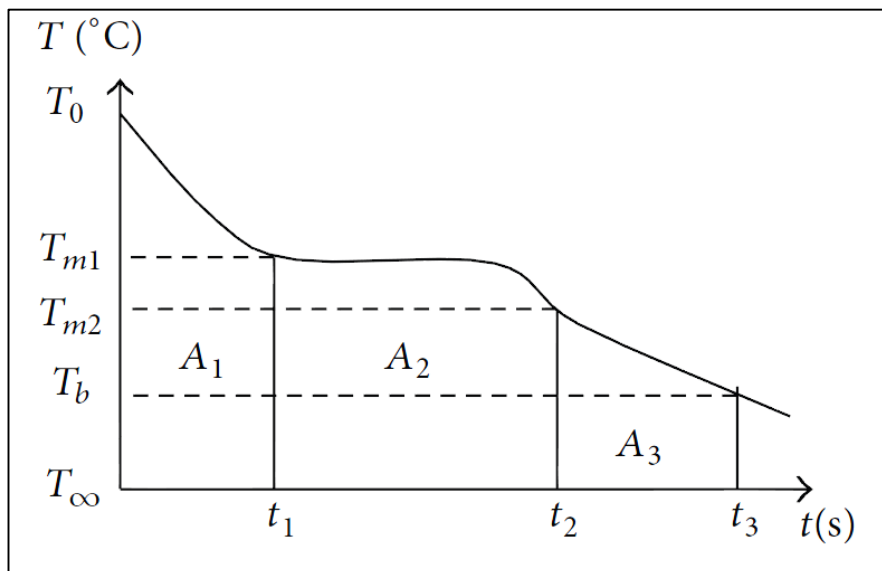
#### Αρχή Ελέγχου.

Οι δοκιμαστικοί σωλήνες, οι οποίοι έχουν την ίδια μάζα προθερμαίνονται σε ένα λουτρό νερού σταθερής θερμοκρασίας  $T_0$ , όπου  $T_0 > T_m$  ( $T_m$ : η θερμοκρασία αλλαγής φάσης). Όταν η θερμοκρασία των υλικών φτάσει την  $T_0$ , οι δοκιμαστικοί σωλήνες απομακρύνονται γρήγορα από το λουτρό και εκτίθενται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_\alpha$  ( $T_\alpha < T_m$ ). Μετρώντας τις θερμοκρασίες των δοκιμαστικών σωλήνων κατά την διαδικασία της ψύξης λαμβάνονται οι καμπύλες ψύξης (θερμοκρασίας-χρόνου) ή καμπύλες T-history. Οι καμπύλες της μεθόδου T-history, τόσο για το PCM όσο και το υλικό αναφοράς φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Το σχήμα 4.9 δείχνει τη διαδικασία της ψύξης συναρτήσει του χρόνου του PCM. Το σχήμα 4.10 δείχνει τη διαδικασία της ψύξης συναρτήσει του χρόνου του υλικού αναφοράς.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, αναμένονται θετικά αποτελέσματα, μόνο στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, περιορισμός που τίθεται εξ αιτίας της υπόθεσης μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας του PCM σε ένα σωλήνα δοκιμής κατά την αποφόρτιση.



**Σχήμα 4.9:** Τυπική καμπύλη T-HISTORY ενός P.C.M κατά την διάρκεια της ψύξης



**Σχήμα 4.10:** Τυπική καμπύλη T-HISTORY νερού κατά την διάρκεια της ψύξης

Οι ενεργειακές εξισώσεις είναι:

$$m \cdot H_m + m_0 \cdot C_{p0}(T_{m1} - T_{m2}) = h \cdot B \cdot A_2 \quad [4.7]$$

$$m_0 \cdot C_{p0} + m_w \cdot C_{pw}(T_0 - T_{m1}) = h \cdot B \cdot A'_1 \quad [4.8]$$

Η λανθάνουσα θερμότητα του PCM:

$$H_m = \frac{m_0 \cdot C_{p0} + m_w \cdot C_{pw}}{m} + \frac{A_2}{A'_1} \cdot (T_0 - T_{m1}) - \frac{m_0 \cdot C_{p0} \cdot (T_1 - T_{m2})}{m} \quad [4.9]$$

Όπου:

$$A_2 = \int_{t_1}^{t_2} (T - T_\infty) dt \quad [4.10]$$

$$A'_1 = \int_0^{t'_1} (T - T_\infty) dt \quad [4.11]$$

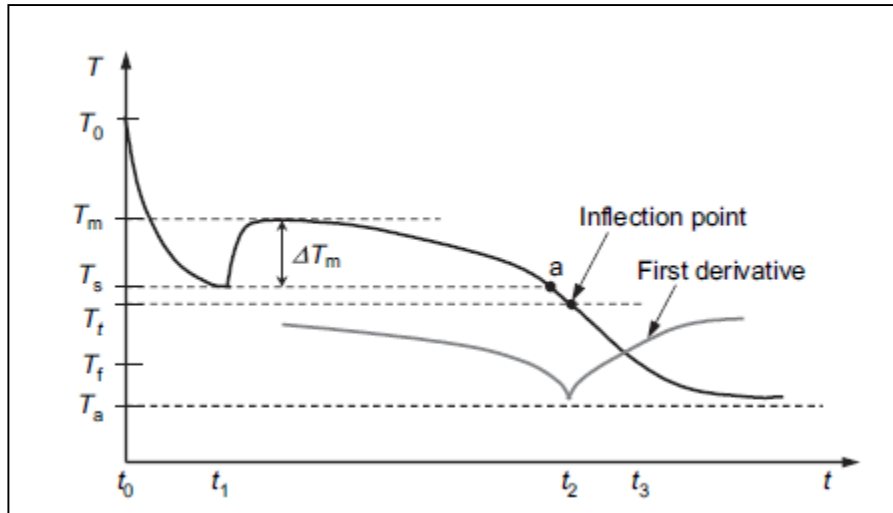
- $m_0$ , η μάζα του δοκιμαστικού σωλήνα
- $m$ , η μάζα του PCM
- $m_w$ , η μάζα του νερού
- $C_{p0}$ , η θερμοχωρητικότητα του δοκιμαστικού σωλήνα (j/kg K)
- $C_{pw}$ , η θερμοχωρητικότητα του νερού (j/kg K)
- $B$ , το εμβαδόν συναγωγής του δοκιμαστικού σωλήνα  $m^2$

Η μέθοδος T-history, όπως προτάθηκε από τον Zhang και τους συνεργάτες του, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις εμπορικές διαθέσιμες μεθόδους θερμικής ανάλυσης (DSC, DTA) για τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των PCM. Τα πιο σημαντικά είναι το μεγάλο μέγεθος του δείγματος που μπορεί να τεθεί προς μέτρηση και η απλή, εύκολη και οικονομική δημιουργία της. Το μεγάλο μέγεθος δείγματος της μεθόδου αυτής, επιτρέπει καλύτερα αποτελέσματα για ετερογενή μείγματα, τα οποία δεν θα μπορούσαν να έχουν αντιπροσωπευτική σύσταση σε πολύ μικρό μέγεθος. Επιπλέον πλεονέκτημα του μεγάλου δείγματος είναι μια πιο αντιπροσωπευτική τιμή του βαθμού υπόψυξης.

Υπάρχει επίσης μεγάλη ευελιξία ως προς το είδος των PCM που μπορεί να μετρήσει, αλλά και ως προς τις μετρούμενες ιδιότητες. Δεν απαιτείται διαδικασία δειγματοληψίας και τελικά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ικανοποιητική για τις μηχανικές εφαρμογές. Επίσης η διαδικασία αλλαγής φάσης κάθε δείγματος PCM μπορεί να παρατηρηθεί με μεγάλη ευκρίνεια.

Σε μελέτη που έγινε το 2005 από τον Jong Hyeon και τους συνεργάτες του [5] παρατηρήθηκαν κάποια σημαντικά προβλήματα. Για παράδειγμα η μέθοδος T-History χρησιμοποιεί το σημείο υπέρψυξης ως το σημείο που τελειώνει η αλλαγή φάσης. Κάτι τέτοιο είναι λάθος και έτσι στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε άλλο σημείο στην καμπύλη, το οποίο φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα, εκεί όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης παρουσιάζει ελάχιστο (inflection point).





**Σχήμα 4.11:** Τυπική καμπύλη PCM κατά τη διάρκεια ψύξης

Ο Hong και οι συνεργάτες του [6] τροποποίησαν τη μέθοδο T-history βελτιώνοντας ορισμένες λανθασμένες παραδοχές στη μέθοδο του Zhang και των συνεργατών του. Επίσης ο Peck και οι συνεργάτες του [7] βελτίωσαν αυτή τη μέθοδο μέτρησης τοποθετώντας το δοκιμαστικό σωλήνα οριζόντια, γεγονός που μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη διαφορά θερμοκρασίας στη διαμήκη κατεύθυνση του δοκιμαστικού σωλήνα, ώστε να λάβουν περισσότερο ακριβή δεδομένα από τη μέθοδο T-history.



## Βιβλιογραφία 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

1. Jingchao Xie,1 Yue Li,1 Weilun Wang,2 Song Pan,1 Na Cui,1 and Jiaping Liu1, Comments on Thermal Physical Properties Testing Methods of Phase Change Materials: A review article :  
<http://www.hindawi.com/journals/ame/2013/695762/>
2. E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, Measurement of the Enthalpy of PCM , Bavarian Center for Applied Energy Research, Germany
3. Aran Solé, Laia Miró, Camila Barreneche, Ingrid Martorell, Luisa F. Cabeza, "Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 425–436, (2013)
4. Zhang YP, Jiang Y. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Sci. Technol.* 1999; 10: 201-205.
5. Jong Hyeon Pecka, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang, Hiki Hong A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T History method, 2005
6. Hong Hiki, Kim Sun Kuk, Kim Yong-Shik. Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials. *International Journal of Refrigeration* 2004; 27: 360-366.
7. Peck Jong Hyeon, Kim Jae-Jun, Kang Chaedong, Hong Hiki. A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method. *International Journal of Refrigeration* 2006; 29: 1225-1232.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο, που διέπει τη συμπεριφορά των υλικών αλλαγής φάσης, σε κάθε εφαρμογή τους, είναι η μεταφορά θερμότητας κάνοντας εφικτή την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η μελέτη εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας προϋποθέτει την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Η εξίσωση αυτή προκύπτει από τη γενική εξίσωση μεταφοράς προσαρμοσμένη στα δεδομένα του κάθε προβλήματος. Η αναλυτική λύση μιας διαφορικής εξίσωσης όπως αυτή, όταν υπάρχει, μπορεί να είναι ακριβής αλλά να μη βρίσκεται σε εύχρηστη μορφή, δηλαδή να είναι είτε δύσκολη είτε αδύνατη η απ' ευθείας αριθμητική επεξεργασία της. Πολλές φορές μάλιστα, η αναλυτική λύση είναι αδύνατο να βρεθεί γιατί δεν υπάρχει. Όλα αυτά τα προβλήματα οδήγησαν στην ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης, διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων, με τις οποίες η αριθμητική πλέον επίλυση είναι εφικτή, έστω και προσεγγιστικά. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν θεμελιώδεις αρχές της μεταφοράς θερμότητας και θα υπολογιστεί η ροή θερμότητας και ο απαιτούμενος χρόνος για να αποπερατωθεί η αλλαγή φάσης.

### 5.2 Γενική εξίσωση μεταφοράς

Η παρακάτω διαφορική εξίσωση εκφράζει τη μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας με συνδυασμό μοριακής κίνησης (διάχυσης ή αλλιώς αγωγής) και συναγωγής λόγω της ροής του ρευστού.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) + S_{\Phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho\vec{U}\Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \cdot \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad [5.1]$$

Όπου  $\Phi$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή,  $t$  ο χρόνος,  $u$ ,  $v$  και  $w$  οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας  $U$  του ρευστού κατά τις διευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$  αντίστοιχα,  $\rho$  η πυκνότητά του και  $\Gamma_{\Phi}$ ,  $S_{\Phi}$  ο συντελεστής διάχυσης και ο ρυθμός παραγωγής του

μεγέθους  $\Phi$  αντίστοιχα. Η φυσική σημασία των όρων της εξίσωσης (5.1) είναι η παρακάτω:[2]

- $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi)$  : χρονικός όρος και προσδιορίζει αν το φαινόμενο μεταφοράς είναι μόνιμο ή μεταβατικό
- $\text{div}(\rho\vec{U}\Phi)$  : όρος συναγωγής και εκφράζει τη μεταφορά της ορμής, της θερμότητας ή της μάζας λόγω ροής ρευστού
- $\text{div}(\Gamma_{\Phi}\text{grad}\Phi)$  : όρος διάχυσης και εκφράζει τη μεταφορά της ορμής, της θερμότητας ή της μάζας λόγω μοριακής κίνησης.
- $S_{\Phi}$  : πηγαίος όρος και εκφράζει το ρυθμό παραγωγής ή καταστροφής της ορμής, θερμότητας ή μάζας ανά μονάδα όγκου.

### 5.3 Γενική εξίσωση μεταφοράς ενέργειας

Η γενική εξίσωση μεταφοράς ενέργειας που περιγράφει πλήρως το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας γράφεται στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}(\rho\vec{U}h) = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + S_h \quad [5.2]$$

Όπου  $h$  είναι η ειδική ενθαλπία και ο όρος  $S_h$  εκφράζει το ρυθμό παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου και το διασκορπισμό ενέργειας λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού, ο οποίος είναι συνήθως αμελητέος εκτός από περιπτώσεις πολύ μεγάλων μεταβολών ταχύτητας.

Για  $h = c_p T$  με σταθερή ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση  $c_p = \text{σταθερή}$ , η εξίσωση (5.2) γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}(\rho\vec{U}c_p T) = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + S_h \quad [5.3]$$

Και κατόπιν:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \text{div}(\rho\vec{U}T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \cdot \text{grad}T\right) + \frac{S_h}{c_p} \quad [5.4]$$

Συνεπώς, η παραπάνω εξίσωση ενέργειας προκύπτει από τη γενική εξίσωση μεταφοράς (5.1) για  $\Phi=T$ ,  $\Gamma_{\Phi}=k/c_p$  και  $S_{\Phi}=S_h/c_p$ [2]

## 5.4 Διεργασία αλλαγής φάσης του υλικού

Στη διεργασία τήξης, το PCM είναι αρχικά σε μια στερεή κατάσταση σε θερμοκρασία χαμηλότερη ή και ίδια με την θερμοκρασία τήξης του. Το υλικό αρχίζει να τήκεται και να αποθηκεύει ενέργεια όταν τα ακραία τοιχώματα εκτίθενται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την θερμοκρασία τήξης του PCM. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης το PCM είναι αρχικά σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή της στερεοποίησης του. Το υλικό αρχίζει να στερεοποιείται όταν τα τοιχώματα εκτίθενται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του υλικού.

Κατά τη διεργασία τήξης, η θερμότητα μεταφέρεται από τα τοιχώματα, πρώτα με αγωγή μέσω του τοιχώματος του PCM, και αργότερα με φυσική συναγωγή μέσω του PCM. Κατά τη διαδικασία στερεοποίησης, η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή διαμέσου του στερεοποιημένου υλικού αλλαγής φάσης από τη διεπιφάνεια στερεού-υγρού προς τα ακραία τοιχώματα. Φυσική συναγωγή υπάρχει στη διεπιφάνεια υγρού-στερεού, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο υγρό PCM. Ακόμα όμως και να είναι πολύ ισχυρή η φυσική συναγωγή στη διεπαφή στερεού-υγρού, έχει αμελητέα επίδραση στη θέση της διεπιφάνειας στερεού-υγρού σε σχέση με την επίδραση της αγωγής θερμότητας σε στερεά PCM και γι αυτό μπορεί να αμεληθεί. Η διαδικασία στερεοποίησης είναι πολύ βραδύτερη από τη τήξη, επειδή η φυσική συναγωγή δεν επιταχύνει τη στερεοποίηση. Οι εξισώσεις που διέπουν τη διεργασία αλλαγής φάσης είναι οι εξισώσεις ορμής- Navier-Stokes: η εξίσωση της συνέχειας, και η εξίσωση της ενέργειας.[4]

## 5.5 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης των υλικών στις κτιριακές εφαρμογές.

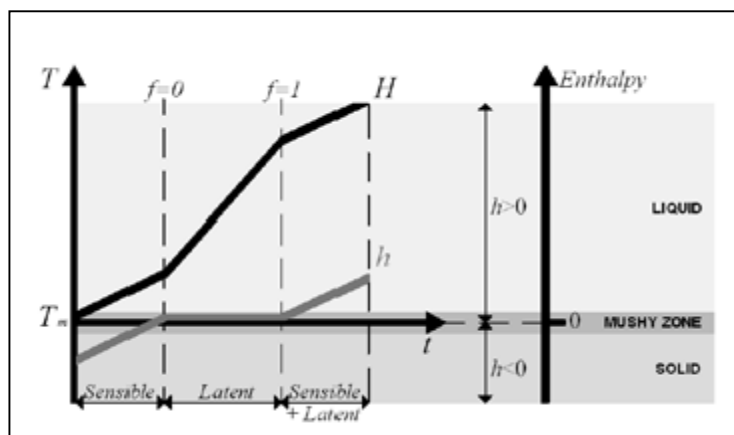
Για την επίλυση του θερμικού προβλήματος στις κτιριακές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι (π.χ. πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένα στοιχεία, κτλ.), στις οποίες ενσωματώνεται μοντέλο για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης.

Δύο είναι τα κυριότερα μοντέλα που αναπτύχθηκαν γι' αυτό το σκοπό

- Το μοντέλο της ενθαλπίας
- Το μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας.

### 5.5.1 Μοντέλο της Ενθαλπίας

Το μοντέλο της ενθαλπίας επιλύει την διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Η ενθαλπία είναι η εξαρτημένη μεταβλητή. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η διαμόρφωση της ενθαλπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας, ενώ διακρίνεται και η ζώνη συνύπαρξης των δύο φάσεων (διφασική περιοχή) ή mushy zone. Το μοντέλο αυτό εγγυάται την ισόθερμη φύση της διαδικασίας αλλαγής φάσης ενώ καθορίζει το σύνολο της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας. Το μοντέλο της ενθαλπίας είναι κατάλληλο για τον υπολογισμό λεπτομερειών κατά την αλλαγή φάσης.[



**Σχήμα 5.1:** Διαμόρφωση ενθαλπίας

### 5.5.2 Μοντέλο Ενεργού Θερμοχωρητικότητας

Το μοντέλο ενεργού θερμοχωρητικότητας δεν παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού λεπτομερειών, αλλά εφαρμόζεται ευκολότερα από το μοντέλο της ενθαλπίας, διότι ακολουθεί τη συνήθη αριθμητική διαδικασία επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς της ενέργειας, θεωρώντας ότι η θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης, κατά την αλλαγή φάσης, δίδεται από μία συνάρτηση της θερμοκρασίας, γνωστή ως "συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας" και είναι συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$c_{p,eff} = c_{p,eff}(T) \quad [5.5]$$

Αυτή η συνάρτηση μπορεί να προσδιοριστεί με μετρήσεις.

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αρχικές και οριακές συνθήκες στη μέθοδο της

ενεργού θερμοχωρητικότητας λαμβάνει τη μορφή:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho} \nabla^2 T \quad [5.6]$$

$$T(x, y, 0) = T_i \quad [5.7]$$

$$T(0, y, t) = T(l, y, t) = T_w(t) \quad [5.8]$$

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, l, t)}{\partial y} = 0 \quad [5.9]$$

Με τη θερμοχωρητικότητα,  $c_p$ , να δίνεται από τη σχέση:

$$c_p = \begin{cases} c_{ps}, & T < T_s \\ c_{p,eff}(T), & T_s < T < T_l \\ c_{pl}, & T > T_l \end{cases} \quad [5.10]$$

Όπου,

$c_{ps}$ : η θερμοχωρητικότητα του υλικού στη στερεά φάση

$c_{pl}$ : η θερμοχωρητικότητα του υλικού στην υγρή φάση.

Κατά τις κτιριακές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης, η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνον ως μακροσκοπικό φαινόμενο, χωρίς να είναι απαραίτητες οι λεπτομέρειες στη διαφασική ζώνη. Συνεπώς, το μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας προτιμάται έναντι του μοντέλου της ενθαλπίας.[4,6,7,8]

## 5.6 Αναλυτικές εκφράσεις ενεργούς θερμοχωρητικότητας $c_p$ , $eff(T)$ για διαφορά PCM

Οι τιμές της ενεργούς θερμοχωρητικότητας  $c_{p,eff}$  συναρτήσκει της θερμοκρασίας για την ελληνική παραφίνη, και τα PCM με τα εμπορικά ονόματα RT20, RT27 και SP25A8, αντίστοιχα δίνονται παρακάτω. Οι εκφράσεις αυτές της ενεργού θερμοχωρητικότητας  $c_{p,eff}$  προέρχονται από την επεξεργασία των καμπυλών ψύξης, που σχηματίστηκαν μετά από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν από τους συγγραφείς. Αυτές οι εκφράσεις προέρχονται από την προσέγγιση της καμπύλης  $c_{p,eff}$ - $T$ . Σύμφωνα με τους συγγραφείς, διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη αναλυτική προσέγγιση της  $c_{p,eff}(T)$  επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικές εξισώσεις για κάθε PCM, δηλαδή:



1. Για την ελληνική παραφίνη:

$$c_{p,eff} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad [5.11]$$

Θερμοκρασιακό εύρος ισχύς [°C]	a0	a1	a2	a3	a4	a5
50≤T≤54.5	-238826.7515	25234.88721	-1066.214192	22.51889622	-0.2377544057	0.001003917218
54.5<T≤55.1	474815.4706	-17443.30321	160.2106051	0	0	0
55.1<T≤55.7	428651.7876	-15408.60663	138.4803961	0	0	0
55.7<T≤58	613200.0901	-40671.49665	1011.420754	-11.17652292	0.04630473077	0

Πίνακας συντελεστών της σχέσης (5.10) για την ελληνική παραφίνη στο θερμοκρασιακό τους εύρος.

2. Για το RT20:

$$c_{p,eff} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad [5.11]$$

Θερμοκρασιακό εύρος ισχύς [°C]	a0	a1	a2	a3	a4	a5
15≤T≤19.5	444.4711352	-170.5210626	25.80658991	-1.912462169	0.06910480624	-0.0009667426392
19.5<T≤20.5	5529.086311	-565.4394794	14.50378915	0	0	0
20.5<T≤22	3780.001949	-342.8478233	7.797040983	0	0	0
22<T≤26	3735.906512	-536.9879458	28.98735267	-0.6959772441	0.006270432248	0



**3. Για το RT27:**

$$c_{p,\text{eff}} = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 \quad [5.11]$$

Θερμοκρασιακό εύρος ισχύς [°C]	a0	a1	a2	a3	a4	a5
22≤T≤25	-329.5000062	106.3162953	-13.35423683	0.8223480772	-0.02488671396	0.0002972388922
25<T≤26.8	9542.790195	-774.7503271	15.74031481	0	0	0
26.8<T≤27.5	41611.7679	-3023.692869	54.96396748	0	0	0
27.5<T≤31	31155.44075	-3820.483549	175.7678837	-3.594806096	0.02757236338	0

**4. Για το SP25A8:**

$$c_{p,\text{eff}} = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 \quad [5.11]$$

Θερμοκρασιακό εύρος ισχύς [°C]	a0	a1	a2	a3	a4	a5
22≤T≤23.8	-5822.7083	1559.960873	-166.178906	8.806172538	-0.2322802438	0.002441877714
23.8<T≤24.5	30643.84674	-2584.495777	54.51400097	0	0	0
24.5<T≤27.2	2456.776607	-177.5933256	3.228251256	0	0	0
27.2<T≤32	-3900.417315	553.0906948	-28.64445051	0.6468310842	-0.005396817351	0

Οι παραπάνω σχέσεις προσεγγίζουν με εξαιρετική ακρίβεια τις πειραματικές καμπύλες των PCM. Η εκτενής αναφορά των σχέσεων έγινε για το λόγο ότι κάποιες από αυτές τις σχέσεις θα χρησιμοποιηθούν ως βάση υπολογισμού της ενεργού θερμοχωρητικότητας στο υπολογιστικό 2ο μέρος.[9]

## 5.7 Εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών

Οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα εκείνα, στα οποία λαμβάνουν μέρος διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι πολύ δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

Μία τέτοια διαφορική εξίσωση είναι και αυτή που περιγράφει το φαινόμενο της μονοδιάστατης, μόνιμης ή όχι μεταφοράς θερμότητας. Εδώ περιγράφεται ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών σε ένα τέτοιο πρόβλημα, με σκοπό την επίλυσή του. Τα παρακάτω είναι βασικά στοιχεία της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών.

### 5.7.1 Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων

Η περιοχή του προβλήματος, ή διαφορετικά η περιοχή επίλυσης, χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές, βάσει ενός πλέγματος γραμμών το οποίο μπορεί να ποικίλλει ως προς τις διαστάσεις του, συνήθως όμως είναι ομοιόμορφο. Τα σημεία τομής των γραμμών ονομάζονται κόμβοι. Επομένως η περιοχή έχει πλέον χωριστεί σε υποπεριοχές που καθορίζονται μεταξύ τεσσάρων γειτονικών κόμβων ή, όπως συνηθίζεται, ομοιόμορφα γύρω από ένα κόμβο.

Σε κάθε υποπεριοχή αντικαθίσταται η διαφορική εξίσωση με αλγεβρική, η οποία συνδέει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής του προβλήματος στους εκατέρωθεν γειτονικούς κόμβους. Σκοπός είναι η διαμόρφωση ενός επιλύσιμου γραμμικού ή μη συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων, η λύση του οποίου θα έχει καθορίσει με προκαθορισμένη ακρίβεια την τιμή της μεταβλητής του προβλήματος σε κάθε θέση της περιοχής υπολογισμού.

Όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα, τόσο ακριβέστερη είναι η λύση και άρα τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση της αναλυτικής λύσης του προβλήματος μέσω της αριθμητικής μεθόδου. Βέβαια και εδώ υπάρχουν περιορισμοί, καθώς ένα ιδιαίτερα πυκνό πλέγμα καταλήγει προφανώς σε ένα τεράστιο σύστημα εξισώσεων, πράγμα που απαιτεί μεγάλη επεξεργαστική ισχύ από μόνο του, ειδικά, όταν η επίλυση απαιτεί και

επαναληπτική διαδικασία.

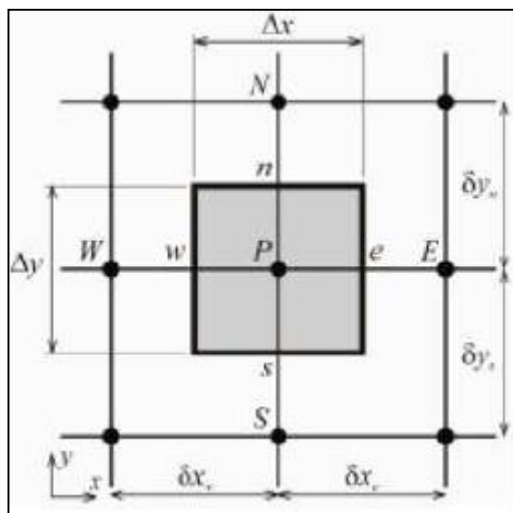
Η πιο πάνω μέθοδος χωρισμού της περιοχής επίλυσης σε υποπεριοχές, ονομάζεται διακριτοποίηση της περιοχής επίλυσης, και οι αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν, ονομάζονται διακριτοποιημένες εξισώσεις.

Ένα σύστημα διακριτοποιημένων εξισώσεων ενδέχεται να διαφέρει στην έκφραση των εξισώσεών του με ένα άλλο σύστημα, το οποίο περιγράφει ακριβώς το ίδιο πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στη μέθοδο διακριτοποίησης της περιοχής επίλυσης.[10, 11]

### 5.7.1.1 Μέθοδος όγκου αναφοράς

Η παρούσα εργασία ασχολείται με μονοδιάστατα προβλήματα γι' αυτό θα εξεταστεί η διαφορική εξίσωση της μόνιμης μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial}{\partial x} \right) = 0 \quad [5.12]$$



**Σχήμα 5.2:** Όγκος αναφοράς

Το σχήμα 5.2 παρουσιάζει ένα σκαρίφημα το οποίο παριστάνει την περιοχή επίλυσης μετά την εφαρμογή του πλέγματος σε αυτήν, καθώς και τα αξιοσημείωτα μεγέθη. Το σκαρίφημα αναφέρεται σε διδιάστατο πρόβλημα. Είναι εύκολη η σύλληψη του κυψελοειδούς (κυβικού σχήματος) πλέγματος, το οποίο αναφέρεται σε τριδιάστατο

πρόβλημα. Στην παράγραφο αυτή έχει σημασία μόνο η  $x$  διεύθυνση, καθώς το πρόβλημα θεωρείται μονοδιάστατο.[10,11]

Η εξίσωση θα ολοκληρωθεί στο γραμμοσκιασμένο όγκο, ο οποίος περιβάλλει τον κόμβο P του πλέγματος. Οι γειτονικοί κόμβοι οι οποίοι χαρακτηρίζονται με βάση τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τον υπό εξέταση κόμβο, συμβολίζονται ως W, E, N, S (West, East, North, South), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Οι πλευρές του κόμβου ονομάζονται με τα αντίστοιχα γράμματα του πλησιέστερου γειτονικού κόμβου με τα αντίστοιχα μικρά γράμματα. Αυτές οι πλευρές συνήθως διχοτομούν τις αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ του κεντρικού κόμβου και των γειτονικών του.

Η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης της μόνιμης μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας στον κόμβο αυτό, δίνει:

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx = 0 \quad [5.13]$$

Με την υπόθεση της γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας με την απόσταση  $x$ , είναι:

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \cong k_e \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - k_w \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w =$$
$$k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} = 0 \quad [5.14]$$

Κάνοντας λοιπόν τις πράξεις στο τελευταίο σκέλος, χωρίζοντας σε επιμέρους παράγοντες τις θερμοκρασίες των κόμβων που λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό, προκύπτει εξίσωση της μορφής:

$$A_p T_p = A_w T_w + A_e T_e \quad [5.15]$$

Όπου:

$$A_w = \left( \frac{k_w}{\delta x} \right)_w \quad [5.16]$$

$$A_e = \left( \frac{k_e}{\delta x} \right)_e \quad [5.17]$$

$$A_p = A_e + A_w \quad [5.18]$$

Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών, που προέκυψε βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας, εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Από αυτές τις εξισώσεις



όπως γίνεται κατανοητό, πηγάζουν και οι δύο βασικές μέθοδοι (θερμοκρασίας και ενθαλπίας) οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη διεθνή βιβλιογραφία για την περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας μέσω πεπερασμένων διαφορών.

Η εξίσωση αυτή εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας στον κόμβο P, όπως η αντίστοιχη διαφορική εξίσωση εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας σε ένα απειροστό όγκο αναφοράς.

Ο ενεργειακός ισολογισμός στον όγκο αναφοράς, για τη μία διάσταση, δίνει:

$$\dot{Q}_w - \dot{Q}_e = 0 \quad [5.19]$$

Όπου ο δείκτης συμβολίζει την αντίστοιχη έδρα του όγκου αναφοράς, στην οποία αναφέρεται η θερμορροή.

Εφαρμόζοντας τη σχέση του Fourier:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad [5.20]$$

ο ενεργειακός ισολογισμός με βάση την παραδοχή της γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης δίνει τη μορφή της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών:

Ισχύει ότι:

$$\dot{Q}_i = q_i A_i \quad [5.21]$$

Αφού λοιπόν, η επιφάνεια A είναι εξ ορισμού παντού η ίδια, είναι:

$$\begin{aligned} q_w - q_e = 0 &\Rightarrow \\ -\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_w - \left(-k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_e = 0 &\Rightarrow \\ k_e \frac{T_E - T_p}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_p - T_w}{(\delta x)_w} = 0 \end{aligned} \quad [5.22]$$

Η προκύπτουσα λύση ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της θερμότητας όχι μόνο στον εκάστοτε όγκο αναφοράς αλλά και σε οποιαδήποτε ομάδα όγκων, οπότε προφανώς και σε όλη την περιοχή διακριτοποίησης- υπολογισμού.[10,11,12,13]

## 5.8 Υπολογιστικό πλέγμα

Οι αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος, όπως προαναφέρθηκε δεν είναι υποχρεωτικά ίσες. Αντίθετα μάλιστα, σε περιπτώσεις όπου η μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής σε συγκεκριμένο σημείο της περιοχής επίλυσης είναι μεγάλη, ενδείκνυται πύκνωση του πλέγματος, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου με μικρότερο αριθμό κόμβων και, συνακόλουθα, μικρότερες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ.

Αυξανόμενης της λεπτότητας του ομοιόμορφου ή ανομοιόμορφου υπολογιστικού πλέγματος, η αριθμητική λύση τείνει προς την αναλυτική λύση της υπό επίλυση διαφορικής εξίσωσης. Πέρα ενός βαθμού λεπτότητας πλέγματος επιτυγχάνεται κατάσταση, κατά την οποία οποιαδήποτε περαιτέρω εκτέλεση του υπολογιστικού πλέγματος προκαλεί αμελητέες διαφορές στη λύση, οπότε έχει ήδη επιτευχθεί λύση ανεξάρτητη της λεπτότητας του πλέγματος.[10]

## 5.9 Οριακές συνθήκες

Από τα προηγούμενα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εφαρμογή μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση της λύσης μιας διαφορικής εξίσωσης, καταλήγει σε (γραμμικό ή μη) σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό όμως είναι από μόνο του μη επιλύσιμο.

Για παράδειγμα, σε (καταχρηστικό) υπολογιστικό ομοιόμορφο πλέγμα μίας διάστασης, έστω ότι διακρίνονται  $N$  ευθύγραμμα τμήματα. Αυτό αυτόματα σημαίνει ότι υπάρχουν  $N+1$  κόμβοι προς υπολογισμό, εκ των οποίων οι  $N-1$  είναι εσωτερικοί, δηλαδή έχουν εκατέρωθεν τους άλλους κόμβους. Ο διαχωρισμός γίνεται, γιατί η παραπάνω μέθοδος πεπερασμένων διαφορών εφαρμόζεται μόνο σε εσωτερικούς κόμβους υπολογιστικού πλέγματος.

Επομένως, μετά την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτει σύστημα  $N+1$  αγνώστων, αφού πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής σε κάθε κόμβο και μόλις  $N-1$  εξισώσεων, πράγμα που από μόνο του καθιστά το σύστημα μη επιλύσιμο.

Οι δύο εξισώσεις που απαιτούνται δίνονται από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται σε τρία είδη, όπως περιγράφονται παρακάτω, και η παρούσα μελέτη ασχολείται μόνο με το πρώτο. Παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες προσαρμοσμένες στο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας.

**1. Οριακή συνθήκη πρώτου είδους (Dirichlet):** Είναι γνωστές οι τιμές της θερμοκρασίας στα δύο άκρα, εκεί δηλαδή όπου είναι αδύνατη η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, οπότε με γνωστές τις δύο αυτές θερμοκρασίες, το σύστημα υποβιβάζεται σε N-1 επί N-1, άρα επιλύεται.

**2. Οριακή συνθήκη δεύτερου είδους (Neumann):** Είναι γνωστές οι τιμές της θερμορροής στα δύο άκρα, οπότε με βάση την εξίσωση του Fourier κατασκευάζονται δύο ακόμα εξισώσεις και το σύστημα μετατρέπεται σε ένα επιλύσιμο N+1 επί N+1

**3. Οριακή συνθήκη τρίτου είδους (συναγωγής):** Αν το πρόβλημα περιλαμβάνει κίνηση ρευστού στα όρια του υπό εξέταση σώματος και είναι επίσης γνωστές οι συναγωγιμότητες του ρευστού, καταστρώνονται δύο ακόμα εξισώσεις, βάση της εξίσωσης συναγωγής θερμότητας  $q=h_1(T_{\text{ρευστού},1}-T_1)$  και -όπως πριν- το σύστημα γίνεται N+1 επί N+1.[12]

## 5.10 Επίλυση προκύπτοντος συστήματος

Αποδείχθηκε παραπάνω πως η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών σε υπολογιστικό πλέγμα, οδηγεί μέσω των οριακών συνθηκών στην κατάστρωση επιλύσιμου συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής:

$$A_p T_p = A_E T_E + A_W T_W \quad [5.23]$$

Όπου τα P,E,W αναφέρονται στις σχετικές θέσεις των κάθε φορά διαδοχικών κόμβων.

Αλλάζοντας τους δείκτες, ώστε η εξίσωση να εκφράζει όλους του κόμβους, είναι:

$$A_i T_i = B_i T_{i+1} + C_i T_{i-1} \quad [5.24]$$

Στην περίπτωση όπου οι συντελεστές  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  είναι ανεξάρτητοι της εξαρτημένης μεταβλητής, το σύστημα είναι γραμμικό και επιλύεται με γνωστές μεθόδους. Ευρύτατα



διαδεδομένη μέθοδος για αυτό το σκοπό είναι η μέθοδος του τριδιαγωνίου πίνακα (TriDiagonal Matrix Algorithm -- TDMA).

Στην περίπτωση όπου οι συντελεστές  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  δεν είναι ανεξάρτητοι της εξαρτημένης μεταβλητής, το σύστημα είναι μη-γραμμικό και οι γνωστές μέθοδοι αποδεικνύονται αναποτελεσματικές. Η λύση επιτυγχάνεται με μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης και ιδιαίτερα με επαναληπτική διαδικασία, της οποίας τα βήματα είναι τα παρακάτω:

- Επιλέγονται αυθαίρετες αρχικές τιμές για την εξαρτημένη μεταβλητή, για όλους τους κόμβους εκτός από αυτούς που γνωρίζουμε μέσω των οριακών συνθηκών.
- Βάσει των σχέσεων των συντελεστών των εξισώσεων του συστήματος, με τις αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν, υπολογίζονται οι συντελεστές του συστήματος.
- Με βάση αυτές τις τιμές των συντελεστών, το σύστημα επιλύεται σαν να ήταν γραμμικό.
- Με τις τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο δεύτερο βήμα και επαναλαμβάνει έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση της μεθόδου (δηλαδή από κάποια επανάληψη και μετά να μην παρατηρείται αλλαγή στα αποτελέσματα).[10,11,14,15]





## Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Halime O. Paksoy, "Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design", NATO Science Series, Springer publications (2007).
2. Κ. Α. Αντωνόπουλος, Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς", Μέρος πρώτο, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
3. Γ. Μπεργελές, "Υπολογιστική Ρευστομηχανική\ Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα 2006.
4. Piia Lamberg : Mathematical modelling and experimental investigation of melting and solidification in a finned Phase Change Materials Storage, Report A8, 2003:<http://lib.tkk.fi/Diss/2003/isbn9512266083/isbn9512266083.pdf>
5. Χ. Τζιβανίδης, Κ.Α. Αντωνόπουλος, Ε.Δ. Κραββαρίτης, Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε ηλιακό ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης χώρους στην περιοχή της Αθήνας
6. <http://www.ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-03-79.pdf>
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_capacity](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity)
8. CEN TC 89 WG4 N-77 Building components, Building Elements. Definition and calculation of the internal and external thermal mass. CEN 1992.
9. E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanides "Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method", Applied Energy 88 4459-4469 (2011).
10. Goulding. J.R, Energy Conscious Design, Commission of the European Communities, Architectural Press, 1992.
11. Weider, S., An Introduction To Solar Energy For Scientists and Engineers. 1982, New York: John Wiley & Sons.
12. [http://www.cres.gr/kape/index\\_gr.htm](http://www.cres.gr/kape/index_gr.htm)
13. <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>
14. [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_of\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_fusion)
15. <http://www.fskab.com/annex10/workshops/html>

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ****6.1 Εισαγωγή**

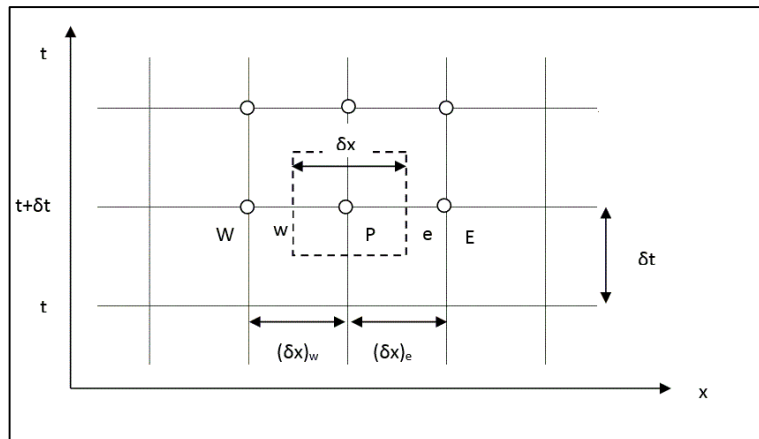
Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, στις εφαρμογές μετάδοσης θερμότητας, όπως είναι οι εφαρμογές των PCM, το μόνιμο φαινόμενο δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς δεν απαντάται σε πραγματικές εφαρμογές. Αυτό που αξίζει να μελετηθεί είναι το μεταβατικό φαινόμενο, όπου η θερμοκρασία είναι συνάρτηση του χρόνου και της απόστασης, και ζητούμενο είναι η παρακολούθηση του θερμοκρασιακού προφίλ του εκάστοτε προβλήματος στο βάθος του χρόνου.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [6.1]$$

Στόχος είναι όπως και προηγουμένως να βρεθούν οι τιμές της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο του πλέγματος, σε κάθε χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ , με γνωστές τις τιμές κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή  $t$ .

Σχηματικά:



**Σχήμα 6.1:** Υπολογιστικό πλέγμα μεταβατικής αγωγής θερμότητας

Έστω  $T_W^0$ ,  $T_P^0$ ,  $T_E^0$  οι γνωστές τιμές της θερμοκρασίας επί των κόμβων W,P,E κατά τη χρονική στιγμή  $t$  (σχήμα 6.1) και  $T_W$ ,  $T_P$ ,  $T_E$  οι αντίστοιχες τιμές κατά την επόμενη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ . Για την κατάστρωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών ακολουθείται η μέθοδος του όγκου αναφοράς, που αναφέρθηκε πιο πάνω.

Υποθέτοντας  $\rho C_p = \text{σταθερό}$ , η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης μονοδιάστατης μεταβατικής αγωγής θερμότητας στον όγκο αναφοράς που περιβάλλει τον κόμβο P και στο χρονικό διάστημα από  $t$  έως  $t+\Delta t$  δίνει:

$$\rho C_p \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial x} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial t} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad [6.2]$$

Με την υπόθεση σταθερής θερμοκρασίας  $T_p$  σε ολόκληρο τον όγκο αναφοράς, το πρώτο μέλος της εξίσωσης γίνεται:

$$\rho C_p \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial x} dx dt = \rho C_p \Delta x (T_p - T_p^0) \quad [6.3]$$

Το χωρικό μέρος του ολοκληρώματος του δευτέρου μέλους της εξίσωσης υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt \\ &\Rightarrow \\ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{k_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] dt \end{aligned} \quad [6.4]$$

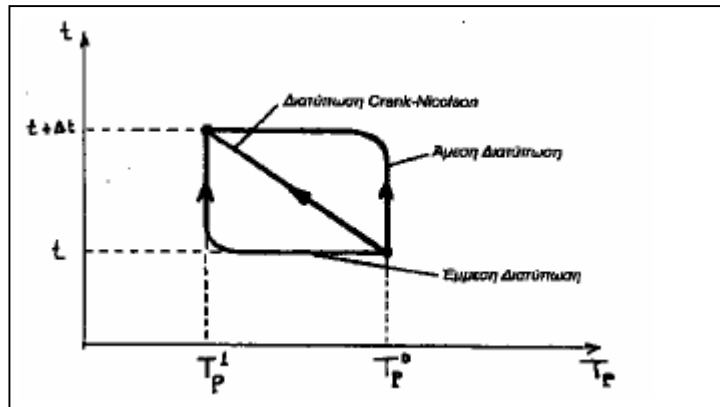
Άρα είναι:

$$\rho C_p \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{k_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad [6.5]$$

Για τον υπολογισμό του παραπάνω χρονικού ολοκληρώματος απαιτείται να γίνει μία υπόθεση σχετικά με τον τρόπο μεταβολής της θερμοκρασίας  $T_p$  με το χρόνο μέσα στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . [1]

## 6.2 Υποθέσεις εργασίας

Γίνονται οι παρακάτω τρεις διαφορετικές υποθέσεις, οι οποίες παριστάνονται και γραφικά στο παρακάτω σχήμα 6.2. [1,2,3,4]



**Σχήμα 6.2:** Γραφική απεικόνιση των τριών υποθέσεων της θερμοκρασίας

Οι τρεις υποθέσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $T_p$

- $T_p$  σταθερή και ίση με  $T_p^0$  κατά τη χρονική στιγμή  $t$
- $T_p$  σταθερή και ίση με  $T_p$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$
- $T_p$  μεταβαλλόμενη γραμμικά με το χρόνο.

Και οι τρεις πιο πάνω υποθέσεις εκφράζονται από τη σχέση:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt [fT_p + (1-f)T_p^0] \Delta t \quad [6.6]$$

Όπου ο παράγων στάθμισης  $f$  λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Στην πρώτη υπόθεση αντιστοιχεί η τιμή του  $f=0$ , και στη δεύτερη και τρίτη οι τιμές  $f=1$  και  $f=0,5$  αντίστοιχα. Σύμφωνα με την πιο πάνω γενική σχέση η εξίσωση γίνεται:

$$\rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} = (T_p - T_p^0) = f \left[ \frac{k_e(T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[ \frac{k_e(T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] \quad [6.7]$$

Μετά από πράξεις η παραπάνω εξίσωση παίρνει την τυπική μορφή εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών, (χάρη απλότητας παραλείπεται ο δείκτης 1).

$$A_p T_p = A_E [fT_E + (1-f)T_E^0] + A_w [fT_w + (1-f)T_w^0] + [A_p^0 - (1-f)A_E - (1-f)A_w] T_p^0 \quad [6.8]$$

Όπου:

$$A_w = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [6.9]$$

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [6.10]$$

$$A_P^0 = \frac{\rho C_P \Delta x}{\Delta \tau} \quad [6.11]$$

$$A_P = f A_E + f A_w + A_P^0 \quad [6.12]$$

Η τυπική μορφή εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, ανάλογα με το είδος της υπόθεσης που θα γίνει όσο αφορά στη μεταβολής της θερμοκρασίας  $T_P$  με τον χρόνο μέσα στο χρονικό διάστημα. Λόγω του γεγονότος αυτού υπάρχουν τρεις κύριες διατυπώσεις της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών, που προκύπτουν από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.

Οι διατυπώσεις αυτές είναι:

- η άμεση, κατά την οποία θεωρείται ότι η θερμοκρασία διατηρεί την τιμή  $T_P^0$  κατά τη διάρκεια όλου του χρονικού βήματος  $\Delta t$  και λαμβάνει απότομα την τιμή  $T_P$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$ .
- η έμμεση στην οποία γίνεται η υπόθεση ότι κατά την χρονική στιγμή  $t$  η θερμοκρασία στον κόμβο  $P$  μεταπίπτει απότομα από την τιμή  $T_P^0$  στην τιμή  $T_P$  την οποία διατηρεί καθ' όλο το χρονικό βήμα  $\Delta t$  και
- η διατύπωση Crank-Nicolson, κατ' αυτή τη διατύπωση έχει υποτεθεί γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο κατά το χρονικό βήμα  $\Delta t$ .

### 6.2.1 Άμεση διατύπωση

Η άμεση διατύπωση προκύπτει από την γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για  $f=0$ , δηλαδή

$$A_P T_P = A_E T_E^0 + A_w T_w^0 + (A_P - A_E - A_w) T_P^0 \quad [6.13]$$

Όπου

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [6.14]$$

$$A_w = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [6.15]$$

$$A_P = \frac{\rho C_P \Delta x}{\Delta t} \quad [6.16]$$

Με βάση αυτή την εξίσωση μπορεί να παρατηρηθεί ότι η άγνωστη θερμοκρασία  $T_P$  δεν συνδέεται με άλλες άγνωστες τιμές ( $T_E$ ,  $T_W$ ) και συνεπώς υπολογίζεται αμέσως συναρτήσει των γνωστών θερμοκρασιών  $T_W^0$ ,  $T_P^0$ ,  $T_E^0$  προηγούμενης χρονικής στιγμής.

Το αναμφισβήτητο πλεονέκτημα της άμεσης διατύπωσης είναι η δυνατότητα άμεσου υπολογισμού των τιμών  $T_P$  χωρίς να απαιτείται επίλυση συστήματος εξισώσεων. Όμως ταυτόχρονα η διατύπωση αυτή παρουσιάζει ένα μεγάλο μειονέκτημα, που είναι το γεγονός ότι ο συντελεστής ( $A_P - A_E - A_W$ ) της  $T_P^0$  ενδέχεται να γίνει αρνητικός με αποτέλεσμα να προκύψει φυσικώς απαράδεκτη τιμή της θερμοκρασίας  $T_P$ , και για να αποκλειστεί η περίπτωση αυτή πρέπει να ισχύει ο περιορισμός  $A_P - A_E - A_W > 0$ . Για σταθερή θερμική αγωγιμότητα  $k_e = k_w = k$  και  $(\delta x)_e = (\delta x)_w = \Delta x$ , η συνθήκη αυτή παίρνει τη μορφή:

$$\Delta t \frac{\rho C_P (\Delta x)^2}{2K} = \frac{A_E}{2} + \frac{A_W}{2} + A_P^0 \quad [6.17]$$

Από τον περιορισμό αυτό προκύπτει ότι για να ισχύει η άμεση διατύπωση απαιτείται μικρό χρονικό βήμα  $\Delta t$  ή μεγάλο χωρικό βήμα  $\Delta x$ . Αυτή ακριβώς η συνθήκη αποτελεί το σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου, διότι η μείωση του  $\Delta x$  με σκοπό την αύξηση της χωρικής ακρίβειας απαιτεί σημαντική μείωση του  $\Delta t$ , που έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος να καθίσταται υπερβολικά χρονοβόρα και αντιοικονομική. Για αυτό το λόγο η άμεση διατύπωση δε συνιστάται για τη δημιουργία εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών.[1]

## 6.2.2 Έμμεση διατύπωση

Η έμμεση διατύπωση προκύπτει όπως και η άμεση διατύπωση από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών αλλά για  $f=1$ , δηλαδή

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_P - A_P^0 T_P^0 \quad [6.18]$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [6.19]$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [6.20]$$

$$A_P^0 = \frac{\rho C_P \Delta x}{\Delta t} \quad [6.21]$$

$$A_P = A_E + A_W + A_P^0 \quad [6.22]$$

Με βάση αυτή την εξίσωση μπορεί να παρατηρηθεί ότι η άγνωστη θερμοκρασία  $T_P$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+\Delta t$  εκφράζεται συναρτήσει των επίσης αγνώστων θερμοκρασιών  $T_E$  και  $T_W$  που αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή. Άρα ο υπολογισμός της  $T_P$  γίνεται μόνο εμμέσως, δηλαδή δια επίλυσης συστήματος εξισώσεων.

Η έμμεση διατύπωση κρίνεται ως αρκετά καλή μέθοδος προσέγγισης του τρόπου μεταβολής της θερμοκρασίας  $T_P$  μετά του χρόνου μέσα στο χρονικό διάστημα  $t, t+\Delta t$ , γιατί κατά την έμμεση διατύπωση δεν υφίσταται περιορισμός στην επιλογή χρονικού βήματος, εξοικονομώντας έτσι χρόνο ηλεκτρονικού υπολογιστή. Συνεπώς η διατύπωση αυτή προτιμάται, σε σχέση με την άμεση διατύπωση, και θεωρείται αρκετά καλή.[1]

### 6.2.3 Διατύπωση Crank-Nicolson

Η διατύπωση Crank-Nicolson προκύπτει όπως και οι δύο άλλες διατυπώσεις από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών αλλά για  $f=0.5$ , δηλαδή

$$A_P T_P = \frac{A_E}{2} (T_E + T_P^0) + \frac{A_W}{2} (T_W + T_W^0) + [A_P^0 - \frac{A_E}{2} - \frac{A_W}{2}] T_P^0 \quad [6.23]$$

Όπου

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad [6.24]$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad [6.25]$$

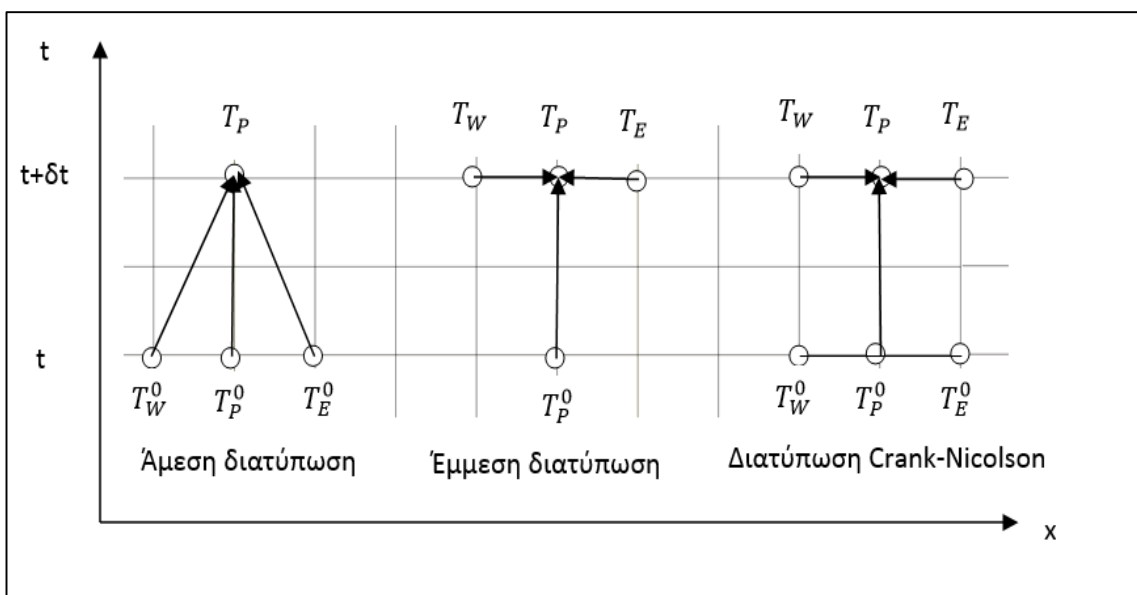
$$A_P^0 = \frac{\rho C_P \Delta x}{\Delta t} \quad [6.26]$$

$$A_P = \frac{A_E}{2} + \frac{A_W}{2} + A_P^0 \quad [6.27]$$

Όπως και κατά την έμμεση διατύπωση, η θερμοκρασία  $T_P$  εκφράζεται συναρτήσει των αγνώστων θερμοκρασιών  $T_E$  και  $T_W$  που αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή. Συνεπώς απαιτείται και εδώ επίλυση συστήματος.[1]

## 6.2.4 Συγκριτικά διατυπώσεων-άλλες διατυπώσεις

Η μέθοδος Crank-Nicolson παρά το γεγονός ότι δίνει μαθηματικώς ευσταθή λύση για οσοδήποτε μεγάλη τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t$ , έχει αποδειχθεί ότι η λύση αυτή ενδέχεται να μην είναι φυσικώς δεκτή. Για αυτό το λόγο από τις τρεις διατυπώσεις που αναφέρθηκαν προτιμάται η έμμεση διατύπωση. Σημαντικό πλεονέκτημα όμως της διατύπωσης Crank-Nicolson είναι το γεγονός ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια, δηλαδή τάξης σφάλματος αποκοπής χρονικής και χωρικής παραγώγου  $(\Delta t)^2$  και  $(\Delta x)^2$  αντιστοίχως, έναντι των  $(\Delta t)$  και  $(\Delta x)^2$  των άλλων δυο διατυπώσεων.



**Σχήμα 6.3:** Σχηματική παράσταση των τριών αριθμητικών μεθόδων

Άλλες διατυπώσεις προκύπτουν από τη γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για άλλες τιμές του συντελεστή στάθμισης  $f$  από 0 έως 1, πλην των τιμών 0, 0.5 και 1 που εξετάστηκαν πιο πάνω. Προφανώς, μόνο η τιμή  $f=0$  δίνει άμεση διατύπωση, δηλαδή οδηγεί σε έκφραση της θερμοκρασίας κάθε κόμβου συναρτήσει μόνο γνωστών θερμοκρασιών του προηγούμενου χρονικού επιπέδου. Αποδεικνύεται ότι για  $0.5 \leq f \leq 1$  οι προκύπτουσες διατυπώσεις είναι μαθηματικώς ευσταθείς χωρίς περιορισμό μεγέθους του χρονικού βήματος  $\Delta t$ . [1]





## Βιβλιογραφία 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Goulding. J.R, Energy Conscious Design, Commission of the European Communities, Architectural Press, 1992.
2. Weider, S., An Introduction To Solar Energy For Scientists and Engineers, 1982, New York: John Wiley & Sons.
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_of\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_fusion)
4. <http://www.fskab.com/annex10/workshops/html>



## **ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ**

### **ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ PCM (ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ) ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ PCM ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

### 7.1 Εισαγωγή

Στο παρελθόν, τα θέματα που αφορούσαν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και την προστασία του περιβάλλοντος δεν θεωρούνταν σημαντικά και τα υλικά κατασκευής που χρησιμοποιούνταν είχαν συνήθως φτωχά θερμικά χαρακτηριστικά. Το φαινόμενο να μη χρησιμοποιείται μόνωση ήταν πολύ συχνό, ακόμα και σε χώρες που βρίσκονταν μακριά από τον ισημερινό. Σήμερα στον κτιριακό τομέα μπορεί να δει κανείς ισχυρή ενεργειακή απόδοση και αρκετές πολιτικές προστασίας του περιβάλλοντος. Στις χώρες της ΕΕ σύντομα τα κτίρια θα πρέπει να κατασκευάζονται με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή θα πρέπει να είναι παθητικά κτίρια.

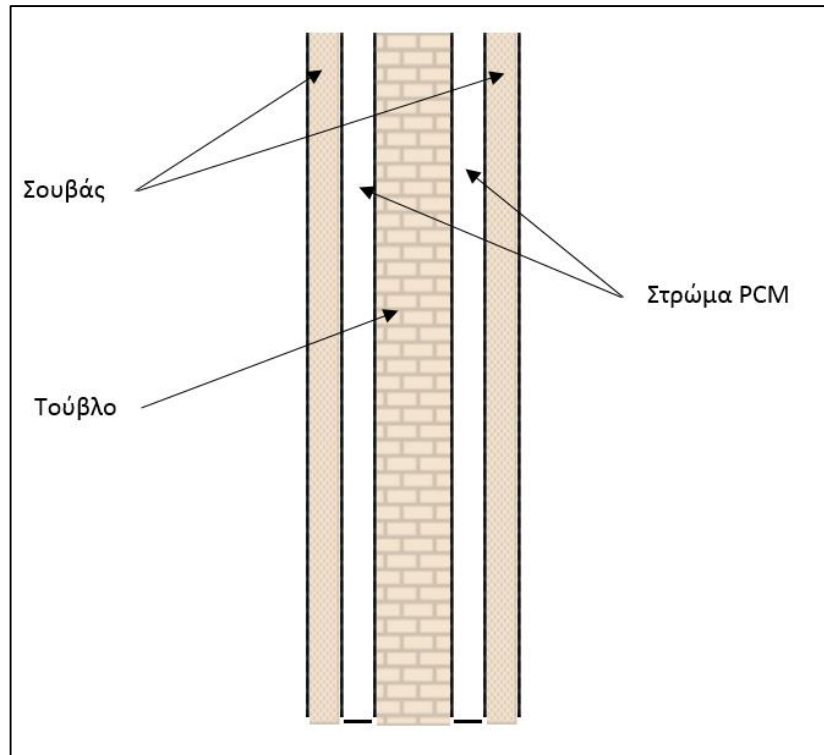
Σήμερα, το κτίριο συνήθως σχεδιάζεται και κατασκευάζεται σύμφωνα με τα πρότυπα εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι τίποτα άλλο δεν μπορεί να γίνει. Στην παρούσα μελέτη διαφαίνεται ότι υπάρχει ακόμα κάτι, που θα μπορούσε να βελτιώσει τα θερμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου με αποτέλεσμα τη μείωση της ζήτησης ενέργειας.

Τα δομικά υλικά παίζουν το ρόλο ενός μέσου θερμικής αποθήκευσης με την μορφή αισθητής θερμότητας. Το στρώμα κατασκευής θα πρέπει να είναι μεγάλου πάχους και αρκετά υψηλής θερμικής μάζας, έτσι ώστε το κτίριο να μπορεί να αποθηκεύει θερμότητα, όσο το δυνατόν περισσότερο.

Σκοπός της παρούσας εφαρμογής είναι η εξέταση της αποδοτικότητας στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης (PCM) σε εσωτερικό τοίχο με νότιο, ανατολικό, δυτικό και ανατολικό-δυτικό προσανατολισμό απέναντι από υαλοπίνακα. Επίσης εκτελείται βελτιστοποίηση ως προς την πλήρη αξιοποίηση του PCM.

Αρχικά για κάθε τοίχο μελετάται η συμπεριφορά του PCM και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά μήκος της τομής του. Ο υπό εξέταση τοίχος αποτελείται από στρώματα PCM, σοβά και τούβλο. Η διάταξή τους δεν είναι τυχαία, αλλά ακολουθεί το μοτίβο του σχήματος 5.1 στρώμα σοβά, στρώμα PCM, τούβλο ακολούθως με η χωρίς στρώμα PCM και στρώμα σοβά. Το σχήμα δίνεται απλά και μόνο για την απεικόνιση και

διάταξη των στρωμάτων χωρίς να απεικονίζει τα πραγματικά υλικά.



**Σχήμα 7.1:** Διάταξη στρωμάτων τοίχου.

## 7.2 Δυναμική ενός κτιρίου

Όλες οι εφαρμογές που παρουσιάστηκαν στο πρώτο μέρος βασίζονται στο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας. Μάλιστα, αυτή καθαυτή η θερμική συμπεριφορά των PCM κυβερνάται από τη διάχυση της θερμότητας, πολύ περισσότερο απ' ό,τι από τους άλλους δύο τρόπους μεταφοράς θερμότητας μαζί.

Ζητούμενο είναι η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας, όπως προκύπτει από τη γενική εξίσωση μεταφοράς. Όπως έχει προαναφερθεί η δυσκολία ή η αδυναμία επίλυσης τέτοιων διαφορικών εξισώσεων αναλυτικά, άνοιξε δρόμους για την ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης.

### 7.2.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργειακού ισοζυγίου σε ένα δωμάτιο

Ένα μαθηματικό μοντέλο του ενεργειακού ισοζυγίου σε ένα κτίριο παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας συνοπτικά. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί για να διατυπώσει και να λύσει το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ηλιακής ενέργειας για το ισοζύγιο αυτό. Το μοντέλο της δυναμικής της ροής ενέργειας

περιλαμβάνει τη ροή της ενέργειας μέσα από τα παράθυρα (με άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία). Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται σε αυτή την περίπτωση (εσωτερικού τοίχου) λαμβάνεται ίση με το 50% της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για ανοιχτόχρωμους τοίχους.

Το ενεργειακό ισοζύγιο σε ένα δωμάτιο μπορεί να γραφτεί σε μια γενικευμένη μορφή, λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές ροές που απορρέουν από ένα δωμάτιο ή σε ένα δωμάτιο του κτιρίου. Έτσι, το ισοζύγιο ενέργειας σε ένα δωμάτιο μπορεί να γραφτεί σε μια γενικευμένη μορφή ως εξίσωση των συγκεντρωμένων παραμέτρων με τον ακόλουθο τρόπο:

$$V \cdot C_p \cdot \rho \cdot \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) + Q_{solar}(t) \quad [7.1]$$

Η θερμοκρασία στο δωμάτιο παραμένει σταθερή κάθε μέρα του χρόνου, στα όρια θερμοκρασιακής άνεσης στο δωμάτιο (21-26 °C) με την βοήθεια κλιματιστικού, που προσδίδει το φορτίο που χρειάζεται και προκύπτει από το ισοζύγιο ενέργειας στο χώρο.

Επιπλέον, μπορεί να υποθεθεί ότι η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου είναι η ίδια σε όλα τα δωμάτια (χώρους) και σταθερή κατά την διάρκεια της μέρας, για να επιτευχθεί ότι το σύστημα θέρμανσης / ψύξης λειτουργεί σε κατάσταση εντοπισμού (παρακολούθηση των αλλαγών της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα) και διατηρεί σταθερή την εσωτερική θερμοκρασία. Έτσι, γίνεται η παραδοχή μιας σταθερής θερμοκρασίας δωματίου για κάθε μια ξεχωριστή μέρα του χρόνου.

Η μοντελοποίηση της δυναμικής του τοίχου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα και πρέπει να χρησιμοποιηθεί αριθμητική προσομοίωση για να δώσει ποσοτικά αποτελέσματα. Για τον υπολογισμό της θέρμανσης ή ψύξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μια ώρα ως χρονικό βήμα. Ωστόσο τα ωριαία ποσά ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν και να υπολογιστούν με διαφορετική ακρίβεια (συνήθως χρησιμοποιείται ένα πολύ μικρότερο χρονικό βήμα από 1 ώρα), ανάλογα με την πολυπλοκότητα των διαδικασιών.

### 7.2.2 Μαθηματικό μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων που ακολουθήθηκε

Η μεταφορά θερμότητας μέσω εσωτερικού τοιχώματος θεωρείται ως ασταθής

θερμική αγωγιμότητα μέσω ενός στερεού σώματος. Ένας τοίχος αποτελείται από μερικά ισότροπα, ή ισοτροπικά ομογενή στρώματα. Σε κάθε στρώμα ενός τοιχώματος το πεδίο της θερμοκρασίας περιγράφεται από την μερική διαφορική εξίσωση (εξίσωση Fouriere Kirchhoff) με την ακόλουθη μορφή:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + \dot{Q}_{solar} \quad [7.2]$$

Μπορεί να υποθεθεί ότι δεν υπάρχει εσωτερική πηγή θερμότητας και η μεταφορά θερμότητας μέσω του τοίχου θεωρείται ως μονοδιάστατη, έτσι ώστε για κάθε στρώση τοίχου η εξίσωση αγωγής θερμότητας παίρνει τη μορφή:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T_{wi}(x,t)}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T_{wi}(x,t)}{\partial x_{wi}^2} \quad [7.3]$$

Η εξίσωση 7.3 μπορεί να ξαναγραφτεί λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοχωρητικότητα κάθε στρώσης  $i$  του τοιχώματος με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\rho_{wi} \cdot C_{p\ wi} \frac{\partial T_{wi}(x,t)}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T_{wi}(x,t)}{\partial x_{wi}^2} \quad [7.4]$$

Τώρα η αριστερή πλευρά της εξίσωσης 7.4 αντιπροσωπεύει τη θερμοχωρητικότητα ενός στρώματος (τοιχώματος) και η δεξιά πλευρά την ικανότητα αγωγής. Εάν το τοίχωμα έχει μερικά στρώματα, τότε η εξίσωση 7.4 μπορεί να γραφτεί για το πεδίο της θερμοκρασίας της κάθε υπό εξέταση στρώσης του τοίχου.

Για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη μεταφορά θερμότητας 7.2, 7.3 και 7.4 είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το όριο και οι αρχικές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη: τη συναγωγή από τον αέρα και την προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου προκύπτει από την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Οι ροές θερμότητας που ανταλλάσσονται στο όριο της επιφάνειας από τον εσωτερικό χώρο με συναγωγή και ηλιακή ακτινοβολία είναι ίση με τη ροή θερμότητας που

ανταλλάσσονται με αγωγή στον τοίχο. Για ένα τρισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας η οριακή κατάσταση ή συνθήκη σε εξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος είναι η ακόλουθη:

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w(x,t)}{\partial x_w} \Big|_{out} = h_{in} \cdot (T_{in}(t) - T_w(t)|_{out}) + \dot{q}_{solar}(t) \quad [7.5]$$

$$\dot{q}_{solar}(t) = a \cdot G_t(t) \quad [7.6]$$

Όπου  $a$ : το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφά ο τοίχος.

Υπάρχουν πολλές δυνατότητες για τον προσδιορισμό των συντελεστών συναγωγής μεταφοράς θερμότητας σε θερμοκρασία. Στη μελέτη που παρουσιάζεται χρησιμοποιούνται απλοποιημένες τιμές των συντελεστών, και έχουν ως εξής:

$$h_{in} = 8 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad [7.7]$$

Η στιγμιαία μέση ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου,  $G_T$ , αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που δέχεται το επίπεδο που μελετάται και στην περίπτωση του εσωτερικού τοίχου, κάθετο επίπεδο. Η στιγμιαία ολική μέση ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_T = G_b R_b + G_b \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad [7.8]$$

Για τον υπολογισμό της  $G_T$  είναι απαραίτητη η γνώση της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου,  $G_b$  και  $G_d$  αντίστοιχα, του λόγου άμεσης ακτινοβολία  $R_b$ , της ανακλαστικότητας του εδάφους  $\rho$  και της γωνίας  $\beta$ . Η μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου, έχει προκύψει με στατιστική επεξεργασία μετρήσεων πολλών ετών, για κάθε ώρα της ημέρας του τυπικού έτους στην περιοχή της Αθήνας.

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, που έρχεται απευθείας από τον ήλιο και προσπίπτει στη γη χωρίς να διασκορπιστεί μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή σε  $\text{kw/m}^2$  της άμεσης ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με  $G_b$ .

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $G_d$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη μετά από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.

Τέλος  $\rho$  είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους (κυμαίνεται από  $\rho=0.2$ , για συνηθισμένο έδαφος, έως  $0.7$  για χιονισμένο) και  $\beta$  είναι η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια του τοίχου με το οριζόντιο επίπεδο.

Για τον υπολογισμό της μέσης στιγμιαίας άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου  $G_b$  και  $G_d$  αντίστοιχα χρησιμοποιούμε τις σχέσεις που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$G_b = M_T + A_T \left( \frac{360}{365} D - P_T \right) \quad [7.9]$$

$$G_d = m_T + a_T \left( \frac{360}{365} D - p_T \right) \quad [7.10]$$

Η σταθερά  $D$  παίρνει τιμές από 1-365 ανάλογα με τη μέρα του έτους που μελετάμε, ενώ οι υπόλοιπες σταθερές  $M_T$ ,  $A_T$ ,  $P_T$ ,  $a_T$ ,  $m_T$ ,  $p_T$  λαμβάνονται από τον πίνακα για τις αντίστοιχες ώρες μελέτης

Time[t]	$M_T$ [kw/m <sup>2</sup> ]	$A_T$ [kw/m <sup>2</sup> ]	$P_T$ [°C]	$m_T$ [kw/m <sup>2</sup> ]	$a_T$ [kw/m <sup>2</sup> ]	$p_T$ [°C]
7.00	0.007	0.046	86.18	0.048	0.111	81.23
8.00	0.057	0.068	87.31	0.134	0.127	82.45
9.00	0.119	0.104	87.94	0.208	0.133	83.94
10.00	0.191	0.129	88.31	0.261	0.129	85.60
11.00	0.258	0.153	89.35	0.283	0.117	86.05
12.00	0.319	-0.181	-88.88	0.271	0.099	82.71
13.00	0.342	-0.194	-89.18	0.243	0.081	81.95
14.00	0.325	0.183	87.21	0.210	0.083	87.23
15.00	0.269	0.166	86.22	0.176	0.087	89.53
16.00	0.183	0.147	82.10	0.141	-0.085	-88.19
17.00	0.078	0.131	79.85	0.104	-0.079	-88.97
18.00	-0.025	0.114	77.36	0.051	0.091	86.79

**Πίνακας 7.1:** Σταθερές για τον υπολογισμό των  $G_b$  και  $G_d$





Στη περίπτωση μας, όπου μελετάμε κατακόρυφο τοίχο η κλίση της επιφάνειας είναι  $\beta=90^\circ$ . Άρα ο τελικός μας τύπος για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου είναι :

$$G_T = G_b R_b + G_b \left(\frac{1}{2}\right) + (G_b + G_d) \rho \left(\frac{1}{2}\right) \quad [7.11]$$

Για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ο λόγος άμεσης ακτινοβολίας  $R_b$  υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_b = \left(\frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}\right) \quad [7.12]$$

Πριν την περαιτέρω ανάλυση καλό θα ήταν να αναφερθούν οι παρακάτω ορισμοί:

- **Γωνία πρόπτωσης  $\theta$** , είναι η γωνία μεταξύ των προσπίπτουσων ηλιακών ακτίνων και της κάθετης στην επιφάνεια.
- **Γωνία ζενίθ  $\theta_z$** , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου.
- **Ηλιακή απόκλιση  $\delta$** , είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284+D)}{365}\right) \quad [7.13]$$

όπου D: είναι η ημέρα του χρόνου (1-365).

- **Ωριαία γωνία,  $\omega$** , είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τυπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ/\text{ώρα}$  ή  $\pi/12 \text{ rad}$  ανά ώρα. Υπολογίζεται από τη σχέση:

Σε μοίρες:

$$\omega = \pm 0.25 \cdot (\text{λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad [7.14]$$

Σε ακτίνια:

$$\omega = \pm \frac{\pi}{12 \cdot 60} \cdot (\text{λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad [7.15]$$

\*\*Για τις ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι χρησιμοποιείται το θετικό πρόσημο, ενώ το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι

- Αζιμούθιο επιφάνειας  $\gamma$ , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της κάθετης στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση.

Μετά την παράθεση των παραπάνω ορισμών ο υπολογισμός του λόγου άμεσης ακτινοβολίας  $R_b$  μπορεί να διεκπεραιωθεί με την εφαρμογή των σχέσεων για  $\beta=90^\circ$ :

$$\cos\theta = -\sin\delta \cos\theta \cos\gamma + \cos\delta \sin\varphi \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\delta \sin\omega \quad [7.16]$$

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad [7.17]$$

Όπου:

- $\delta$  : Ηλιακή απόκλιση,
- $\omega$  : Ωριαία γωνία,
- $\varphi$  : το γεωγραφικό πλάτος - για την περιοχή της Αθήνας είναι  $\varphi=37.97^\circ$  ή  $\varphi=0.6627$  rad

Εάν ένας τοίχος αποτελείται από διαφορετικά στρώματα κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά, τότε είναι αναγκαίο να διατυπωθούν οι οριακές συνθήκες σε κάθε μια οριακή επιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων του τοίχου. Μπορεί να υποθεθεί ότι οι ροές θερμότητας, που ανταλλάσσονται από την θερμική αγωγιμότητα κατά την οριακή επιφάνεια επαφής (μεταξύ δύο στρωμάτων), είναι ίσες μεταξύ τους, καθώς επίσης είναι ίσες και οι θερμοκρασίες στην οριακή επιφάνεια επαφής των δύο στρωμάτων. Οι εσωτερικές οριακές συνθήκες μεταξύ δύο στρωμάτων του τοίχου (ισοτροπικά και ομοιογενή υλικά) ( $j$ - ο αριθμός των διαφορετικών στρωμάτων) παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$-\lambda_{j-1} \left. \frac{\partial T_{j-1}}{\partial x} \right|_{x=\max,j-1} = -\lambda_j \left. \frac{\partial T_j}{\partial x} \right|_{x=\min,j} \quad [7.18]$$

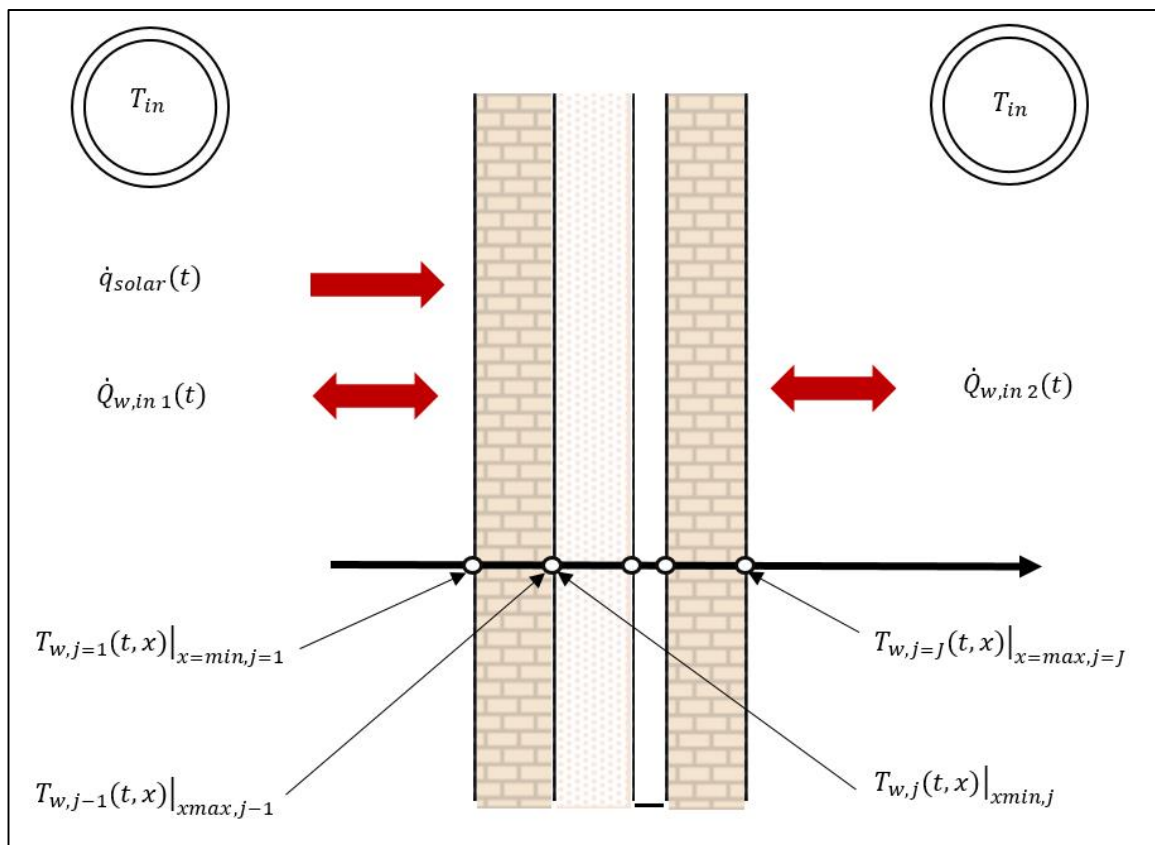
$$T_{j-1}(t) \Big|_{x=\max,j-1} = T_j(t) \Big|_{x=\min,j} \quad [7.19]$$

Ένα σύνηθες τοίχωμα περιέχει δύο ή τρεις στρώσεις. Ένα μονοδιάστατο μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εάν δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του τοίχου και άλλων στοιχείων που μπορεί να εμπίπτουν σε αυτόν, π.χ.

σωληνώσεις νερού ή πόρτα. Ως εκ τούτου, η οριακή επιφάνεια του τοίχου αντιμετωπίζεται ως αδιαβατική. Το πεδίο της θερμοκρασίας μπορεί να καθοριστεί λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες που εκφράζονται από τις εξισώσεις 7.5, 7.18 και 7.19 και την αρχική κατάσταση (π.χ. την κατανομή της θερμοκρασίας σε έναν τοίχο σε αρχικό πρώτο χρόνο). Έτσι ο συνολικός ρυθμός ροής θερμότητας από το τοίχωμα σε κάθε δωμάτιο μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{Q}_{in} = (\text{εμβαδόν τοίχου}) \cdot h_{in} \cdot (T_w(t) - T_{in}) \quad [7.20]$$

Το σχήμα 7.2 παρουσιάζει την κατάσταση που θεωρείται, από όλες τις ενεργειακές ροές. Παρουσιάζει, επίσης, τις θερμοκρασίες στις συνοριακές επιφάνειες. Αυτό το σχήμα είναι η βάση για τη διαμόρφωση των οριακών συνθηκών που περιγράφονται παραπάνω, και εκπροσωπεί μια ιδέα της μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός τοίχου.



**Σχήμα 7.2:** Οι οριακές συνθήκες στο σημείο επαφής δύο στρωμάτων

### 7.2.3 Ενσωμάτωση των PCM σε τοίχους

Η διαδικασία που εφαρμόζεται στα PCM επιτρέπει την αξιολόγηση της επιρροής του PCM σε ολόκληρο το ενεργειακό ισοζύγιο ενός δωματίου. Τα ενσωματωμένα PCM σε δομικά υλικά π.χ. σε ένα στρώμα των εσωτερικών ή εξωτερικών τοιχωμάτων (PCM σύνθετο στρώμα), περιλαμβάνει το στρώμα θερμικής ικανότητας ενός κτιρίου. Τα στρώματα του τοίχου θερμοκρασιακά περιγράφονται από την εξίσωση αγωγής θερμότητας 7.3. Οι οριακές συνθήκες περιγράφονται όπως αναφέρθηκε πιο πάνω από τις εξισώσεις 7.5, 7.18 και 7.19.

Η μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός τοιχώματος, θεωρείται ότι είναι μονοδιάστατη. Οι κύριες παράμετροι των δομικών υλικών είναι η θερμοχωρητικότητα, η πυκνότητα και η θερμική αγωγιμότητα και γίνεται η παραδοχή, ότι είναι ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία (όπως προαναφέρθηκε) εκτός από το στρώμα PCM. Κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης στην εξίσωση θερμότητας 7.4 χρησιμοποιείται η ενεργός θερμοχωρητικότητα. Αυτή η μέθοδος έχει μελετηθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η εξίσωση 7.4 μπορεί να ξαναγραφτεί στην εξής μορφή:

$$\rho_{pcm} \cdot C_{pcm}(T) \cdot \frac{\partial T_{pcm}(x,t)}{\partial t} = \lambda_{pcm} \cdot \frac{\partial^2 T_{pcm}(x,t)}{\partial x_{pcm}^2} \quad [7.21]$$

Οι υπολογισμοί γίνονται με ένα χρονικό βήμα  $dt$  και με ένα χωρικό βήμα  $\Delta x$ , το  $x$  είναι η συντεταγμένη κατά μήκος του πάχους του στρώματος που περιγράφει τη θέση των κόμβων υπολογισμού της θερμοκρασίας. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο πρώτος κόμβος βρίσκεται στη μέση ενός οριακού στρώματος αέρα και στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου, και ο τελευταίος κόμβος στην αντίστοιχη θέση στο άλλο συνοριακό χώρο.

### 7.2.4 Διακριτοποίηση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας

#### 7.2.4.1 Διακριτοποίηση του χώρου

Ο χώρος κατά την κατεύθυνση  $x$  διακριτοποιείται με  $N$  στο πλήθος αριθμητικών σημείων, ώστε να καλυφθεί ολόκληρο το μήκος  $L$  του τοίχου. Το  $L$  είναι το άθροισμα

των επιμέρους στρωμάτων του τοίχου [  $L = \sum(L_i)$  ]. Κάθε επιμέρους στρώμα  $L_i$  έχει την δυνατότητα να διακριτοποιηθεί με διαφορετικό αριθμό κόμβων και χωρικό βήμα  $\Delta x$ . Στα σημεία επαφής δύο στρωμάτων του τοίχου είναι τοποθετημένοι κόμβοι υπολογισμού θερμοκρασίας.

#### 7.2.4.2 Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων και οριακών συνθηκών

Χρησιμοποιώντας τη ανάλυση που έγινε παραπάνω, οι σχέσεις προς διακριτοποίηση είναι οι εξισώσεις 7.4, 7.5, 7.18 και 7.19. Για λόγους ευκολίας του αναγνώστη ξαναγράφονται παρα κάτω:

Η εξίσωση αγωγής θερμότητας 7.4

$$\rho_{wi} \cdot C_{p\ wi} \frac{\partial T_{wi}(x,t)}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T_{wi}(x,t)}{\partial x_{wi}^2} \quad [7.4]$$

Με την μορφή πεπερασμένων η χρονική παράγωγος διακριτοποιείται με εμπρός διαφορά,

$$\frac{\partial T_{wi}(x,t)}{\partial t} = \frac{T_{w,i}^{n+1} - T_{w,i}^n}{\Delta t} \quad [7.22]$$

όπου ο δείκτης  $n$  αναφέρεται στο χρόνο,

και η χωρική παράγωγος με κεντρική διαφορά δίνει:

$$\frac{\partial^2 T_{wi}(x,t)}{\partial x_{wi}^2} = \frac{T_{w,i-1}^{n+1} - 2 T_{w,i}^{n+1} + T_{w,i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad [7.23]$$

Η διακριτοποίηση της χρονικής παραγωγού με εμπρός διαφορά είναι συνεπής με την παραβολικότητα της χρονικής διάστασης και τη μεταφορά της πληροφορίας από ανάντη-κατάντη (από το χρονικό βήμα  $n$  στο  $n+1$ ). Το χαρακτηριστικό της χωρικής διακριτοποίησης είναι η χρήση τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής από τη χρονική στιγμή  $n+1$ , οι οποίες είναι άγνωστες (πεπλεγμένη μέθοδος). Με αντικατάσταση των αλγεβρικών εκφράσεων των παραγώγων στη διαφορική εξίσωση πεπερασμένων διαφορών, δίνεται η πιο κάτω εξίσωση:

$$\rho_{wi} \cdot C_{pwi} \frac{T_{w,i}^{n+1} - T_{w,i}^n}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{T_{w,i-1}^{n+1} - 2T_{w,i}^{n+1} + T_{w,i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad [7.24]$$

Η σχέση 7.24 εφαρμόζεται σε κάθε εσωτερικό κόμβο κάθε ξεχωριστού στρώματος του τοίχου δηλαδή για τιμές του  $i$  από 2 έως  $N1-1$ , από  $N1+1$  έως  $N2-1$  και ούτω καθεξής. Με άγνωστους τις θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή  $n+1$  η σχέση γράφεται ως

$$\left(\frac{-\lambda_j}{\Delta x_j^2}\right) T_{i-1}^{n+1} + \left(\frac{\rho_j c_{p,j}}{\Delta t} + \frac{2\lambda_j}{\Delta x_j^2}\right) T_i^{n+1} + \left(\frac{-\lambda_j}{\Delta x_j^2}\right) T_{i+1}^{n+1} = \left(\frac{\rho_j c_{p,j}}{\Delta t}\right) T_i^n \quad [7.25]$$

όπου ο δείκτης  $j$  αναφέρεται στα διαφορετικά στρώματα του τοίχου.

Για το στρώμα του PCM η διακριτοποιημένη σχέση 7.24 μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\left(\frac{-\lambda_{pcm}}{\Delta x^2}\right) T_{i-1}^{n+1} + \left(\frac{\rho_{pcm} \cdot c_{p,eff}}{\Delta t} + \frac{2\lambda_{pcm}}{\Delta x^2}\right) T_i^{n+1} + \left(\frac{-\lambda_{pcm}}{\Delta x^2}\right) T_{i+1}^{n+1} = \left(\frac{\rho_{pcm} \cdot c_{p,eff}}{\Delta t}\right) T_i^n \quad [7.26]$$

Όπου  $C_{p,eff}$  είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του.

Οι οριακές συνθήκες 7.5, 7.18, 7.19 :

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w(x,t)}{\partial x_w} \Big|_{out} = h_{in} \cdot (T_{in}(t) - T_w(t)|_{out}) + \dot{q}_{solar}(t) \quad [7.5]$$

$$-\lambda_{j-1} \frac{\partial T_{j-1}}{\partial x} \Big|_{x=max,j-1} = -\lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x} \Big|_{x=min,j} \quad [7.18]$$

$$T_{j-1}(t) \Big|_{x=max,j-1} = T_j(t) \Big|_{x=min,j} \quad [7.19]$$

Η οριακή συνθήκη στις εξωτερικές πλευρές του τοίχου διακριτοποιείται με εμπρός και πίσω διαφόριση αντίστοιχα ως εξής:

Για την πλευρά του τοίχου για  $x=0$ :

$$-\lambda_{j=1} \frac{T_{i=2}^{n+1} - T_{i=1}^{n+1}}{\Delta x_{j=1}} = h_{in}(T_{in} - T_{i=1}^{n+1}) + \dot{q}_{solar,j=1}^{n+1} \quad [7.27.1]$$

Με άγνωστους τις θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή  $n+1$  η σχέση γράφεται ως

$$\left(\frac{\lambda_{j=1}}{\Delta x_{j=1}^2} + h_{in}\right) T_{j=1}^{n+1} + \left(\frac{-\lambda_{j=1}}{\Delta x_{j=1}^2}\right) T_{i=2}^{n+1} = h_{in} T_{in} + \dot{q}_{solar,j=1}^{n+1} \quad [7.27.2]$$

Για την πλευρά του τοίχου για  $x=L$  :

$$-\lambda_{j=N} \frac{T_{i=N}^{n+1} - T_{i=N-1}^{n+1}}{\Delta x_{j=N}} = h_{in}(T_{in} - T_{i=N}^{n+1}) + \dot{q}_{solar,j=N}^{n+1} \quad [7.28.1]$$

Με άγνωστους τις θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή  $n+1$  η σχέση γράφεται ως

$$\left(\frac{-\lambda_{j=N}}{\Delta x_{j=N}^2}\right) T_{i=N-1}^{n+1} + \left(\frac{\lambda_{j=N}}{\Delta x_{j=N}^2} + h_{in}\right) T_{j=N}^{n+1} = h_{in} T_{in} + \dot{q}_{solar,j=N}^{n+1} \quad [7.28.2]$$

όπου  $\dot{q}_{solar,j}^{n+1}$  η ηλιακή ακτινοβολία κατακόρυφου επιπέδου κάθε πλευράς  $j$  που απορροφά ο τοίχος.

Έχοντας ως βάση τη συνθήκη που θέτει ίσες θερμοκρασίες στο κόμβο επαφής, οι οριακές συνθήκες στις θέσεις  $x$  του τοίχου που αλλάζει η στρώση (το υλικό) διακριτοποιούνται με εμπρός και πίσω διαφόριση.

Αν στη θέση επαφής  $x$  αντιστοιχεί ο κόμβος  $i=NJ$  τότε η διακριτοποίηση θα έχει ως εξής:

$$-\lambda_{j-1} \frac{T_{i=NJ}^{n+1} - T_{i=NJ-1}^{n+1}}{\Delta x_{j-1}} = -\lambda_j \frac{T_{i=NJ+1}^{n+1} - T_{i=NJ}^{n+1}}{\Delta x_{j=j}} \quad [7.29.1]$$

Με αγνώστους τις θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή  $n+1$  η σχέση γράφεται ως

$$\left(\frac{\lambda_{j-1}}{\Delta x_{j-1}}\right) T_{NJ-1}^{n+1} + \left(\frac{-\lambda_{j-1}}{\Delta x_{j-1}} + \frac{-\lambda_j}{\Delta x_j}\right) T_{NJ}^{n+1} + \left(\frac{\lambda_j}{\Delta x_j}\right) T_{NJ+1}^{n+1} = 0 \quad [7.29.2]$$

Η σχέση αυτή ισχύει σε κάθε κόμβο  $i$  που αλλάζει το υλικό του τοίχου.

Με την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων στους αντίστοιχους κόμβους προκύπτει σύστημα γραμμικών εξισώσεων τριδιαγώνιας μορφής, δηλαδή οι μη μηδενικοί συντελεστές του μητρώου των συντελεστών του συστήματος κείνται επί των τριών κεντρικών διαγωνίων. Η επίλυση αυτού του συστήματος γίνεται με την ιδιαίτερα οικονομική μέθοδο, από άποψη υπολογιστικού κόστους, με τον Αλγόριθμο Τριδιαγώνιου Μητρώου TDMA (TriDiagona Matrix Algorithm).

## 7.3 Προσομοίωση της δυναμικής ενός τοίχου

### 7.3.1 Μελέτες προσομοίωσης

Αριθμητική προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε εσωτερικούς τοίχους έχει εκτελεστεί για την περιοχή της Αθήνας και τις κλιματολογικές της συνθήκες. Με βάση το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει αναπτυχθεί υπολογιστικός κώδικας ικανός να αξιολογήσει πληθώρα διαφορετικών περιπτώσεων εσωτερικού τοίχου. Ο κώδικας έχει γραφτεί σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των φαινομένων δυναμικής μεταφοράς θερμότητας στο τοίχο. Είναι δυνατόν να αλλάξει η δομή του τοίχου (μέγεθος, αριθμό στρωμάτων και οι ιδιότητες τους), το πάχος, ο προσανατολισμός και παράλληλα η δυνατότητα φόρτισης από δύο κατευθύνσεις.

Τα απαραίτητα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή της Αθήνας έχουν ενσωματωθεί στο πρόγραμμα. Επίσης έχει γίνει ελεγχόμενη παραβολή μέσω b-splines για την εξομάλυνση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, αφού και τα στοιχεία και οι εμπειρικές εξισώσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 7.2.2, είναι τέτοια ώστε να δίνουν την ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ανά



ώρα.

Η μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου Gb και Gd που χρειάζονται για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που απορροφά ο τοίχος, προέκυψαν με λογιστική ανάλυση μετρήσεων που έγιναν για 20 χρόνια της ολικής ακτινοβολίας για την περιοχή της Αθήνας και προσεγγίζονται σε [kw/m<sup>2</sup>] για κάθε ώρα από τις 7:00 π.μ. μέχρι τις 6:00 μ.μ.

Κατά την αριθμητική προσομοίωση οι υπολογισμοί για κάθε μέρα επαναλαμβάνονται κατά μέσο όρο αρκετές φορές (συνήθως έξι) για να εξασφαλιστεί μια σταθερή λύση, γιατί κατά την εκκίνηση του προγράμματος υποτίθεται η κατανομή της θερμοκρασίας του. Προφανώς αν η αρχική κατανομή της θερμοκρασίας του τοίχου ήταν γνωστή για την υπό μελέτη μέρα η επαναληπτική διαδικασία θα ήταν αχρείαστη. Οι μελέτες προσομοίωσης έχουν πραγματοποιηθεί για διαφορετικές περιπτώσεις δομής τοίχου με το υπό εξέταση PCM να επιλέγεται ανάμεσα στα RT20, RT27, SP25A8.

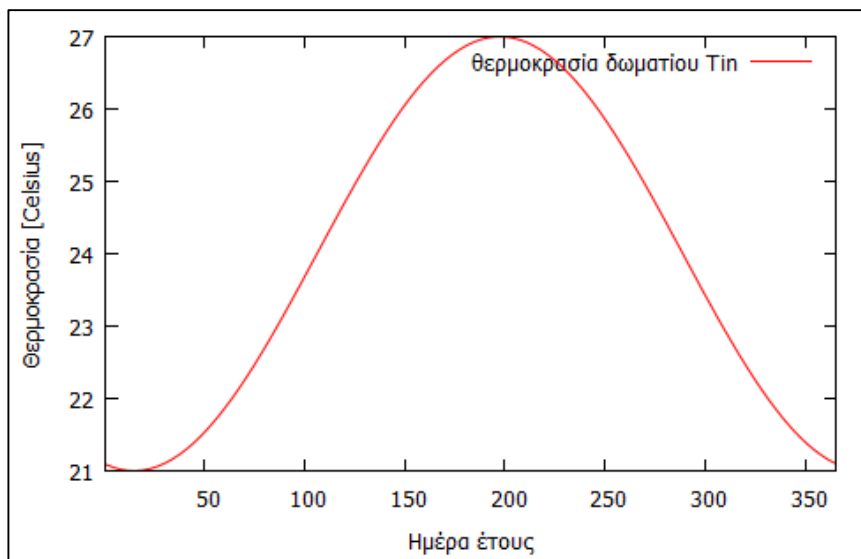
Η ανάλυση έχει γίνει για ένα πλήρες έτος, για να δειχθεί πώς οι υπό εξέταση τοίχοι επηρεάζουν την μεταφορά θερμότητας στο χώρο για την υποτιθέμενη θερμοκρασία που επικρατεί σε αυτόν με την βοήθεια κλιματισμού. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν δείχνουν ποια δομή είναι η πλέον ενδεδειγμένη για τις εξεταζόμενες κλιματιστικές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν την περιοχή.

Στο σημείο αυτό καλό θα ήταν να γίνει αναφορά στη προσέγγιση που έχει γίνει για την θερμοκρασία δωματίου. Η θερμοκρασία έχει ληφθεί με βάση τα όρια για θερμοκρασιακή άνεση στο δωμάτιο για τον άνθρωπο και με βάση την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από το κλιματιστικό με βάση αυτά. Τα όρια της θερμοκρασιακής άνεσης που λήφθηκαν είναι  $T_{in}=21^{\circ}\text{C}$  για τον χειμώνα και  $T_{in}=27^{\circ}\text{C}$  για το καλοκαίρι. Με βάση αυτά σχηματίστηκε η παρακάτω προσεγγιστική σχέση επιθυμητής θερμοκρασίας δωματίου:

$$T_{in} = \frac{21+27}{2} + \frac{27-21}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}D - 0.58219178\pi\right) \quad [7.30]$$

όπου D η ημέρα του έτους.

Η μορφή της θερμοκρασίας δωματίου συναρτήσει των ημερών του έτους που χρησιμοποιήθηκε ακολουθεί παρακάτω.



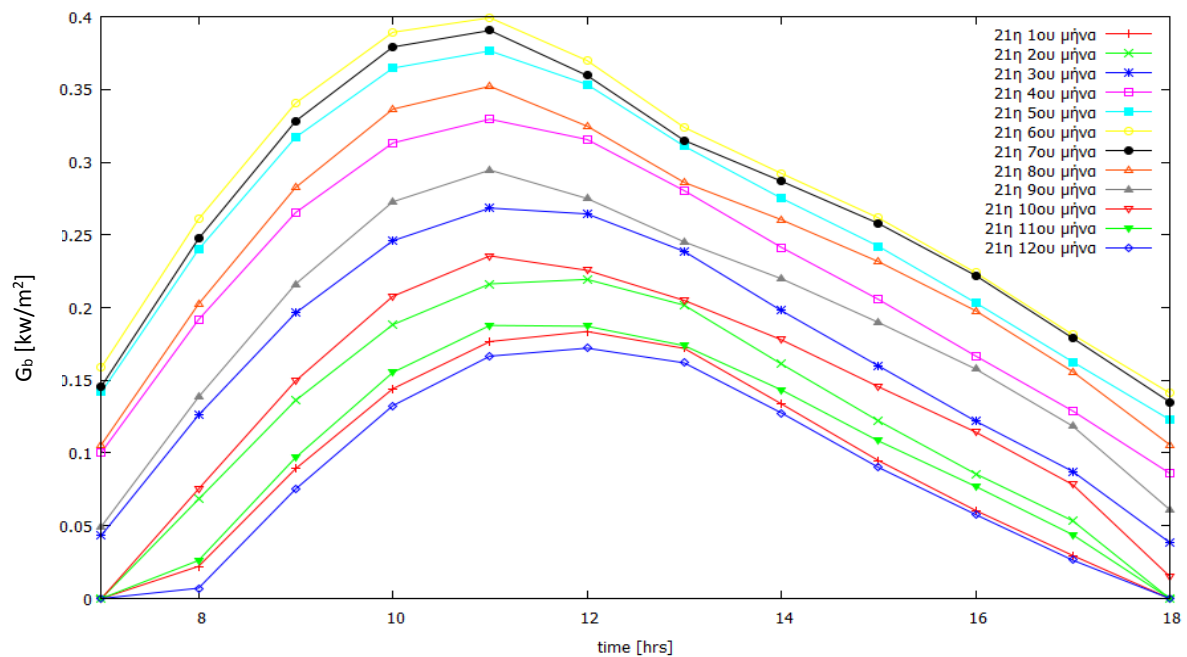
**Σχήμα 7.3:** Θερμοκρασία δωματίου συναρτήσει των ημερών του έτους.

## 7.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βασικής μελέτης

### 7.4.1 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους εσωτερικούς τοίχους

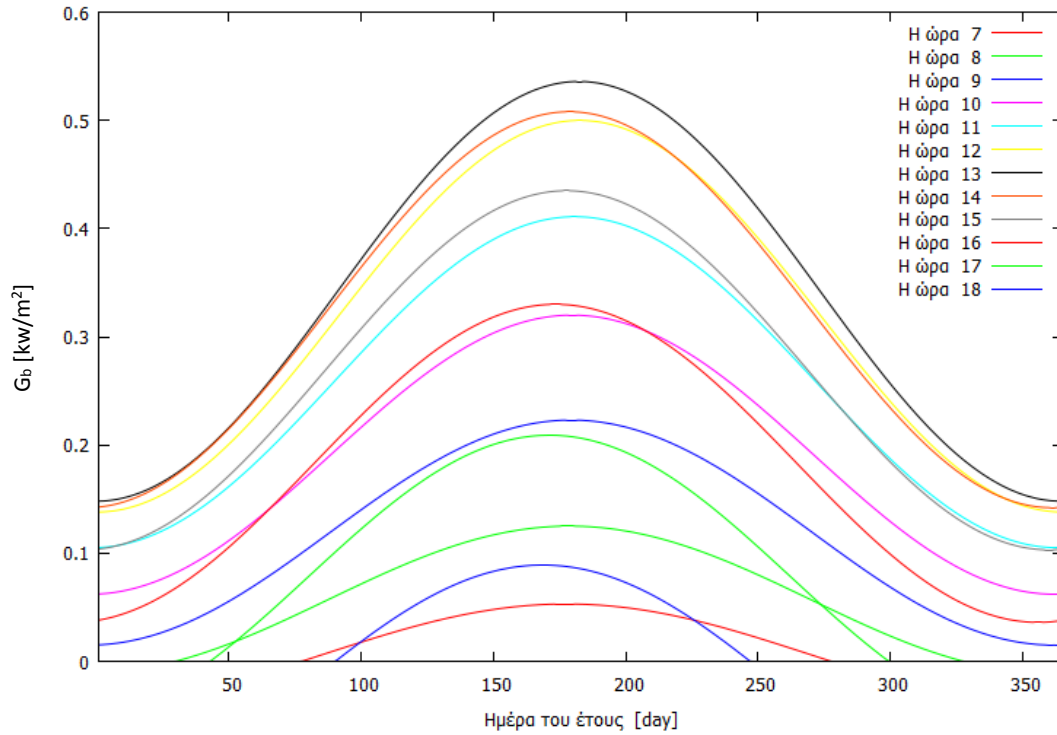
Υπολογισμός της μέσης στιγμιαίας άμεσης ακτινοβολίας οριζώντιου επιπέδου  $G_b$  εξίσωση 7.9 και της μέσης στιγμιαίας διάχυτης ακτινοβολίας οριζώντιου επιπέδου  $G_d$  εξίσωση 7.10.

Στο σχήμα 7.4 που ακολουθεί απεικονίζεται η μεταβολή της μέσης στιγμιαίας άμεσης ακτινοβολίας οριζώντιου επιπέδου  $G_b$  ( $\text{kw}/\text{m}^2$ ) για την 21<sup>η</sup> του κάθε μήνα.

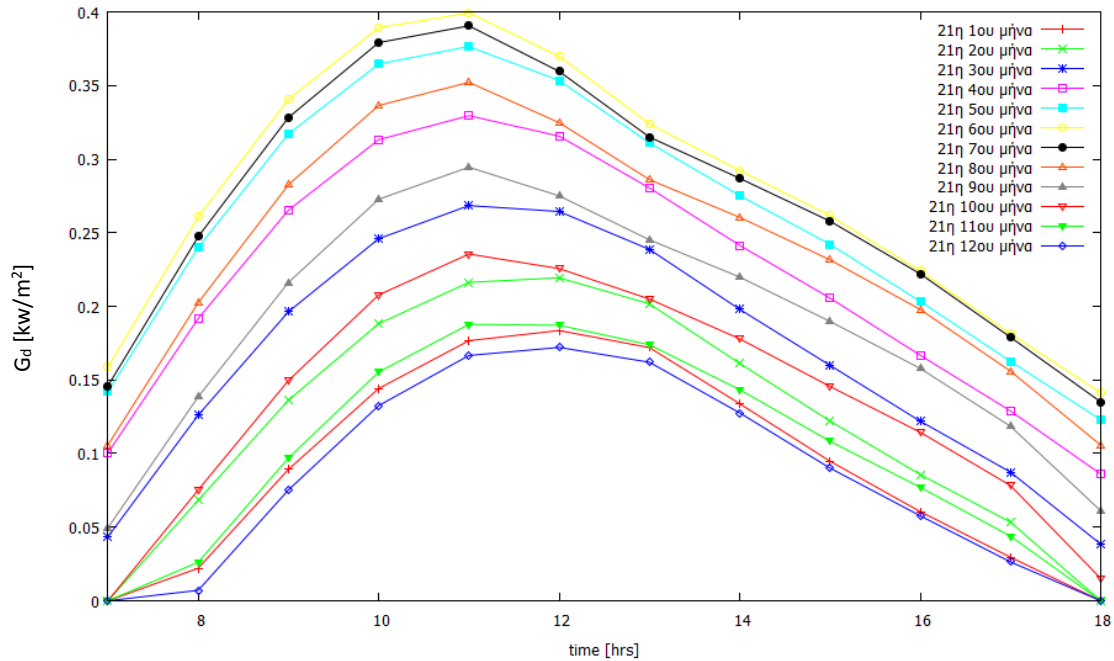


**Σχήμα 7.4:** Μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζώντιου επιπέδου  $G_b$  σε  $[\text{kw}/\text{m}^2]$  για την 21<sup>η</sup> κάθε μηνός του έτους για τις ώρες ηλιοφάνειας (7:00 - 18:00).

Η μέση στιγμιαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου  $G_b$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι της 18:00 δίνεται στο παρακάτω σχήμα 7.5.

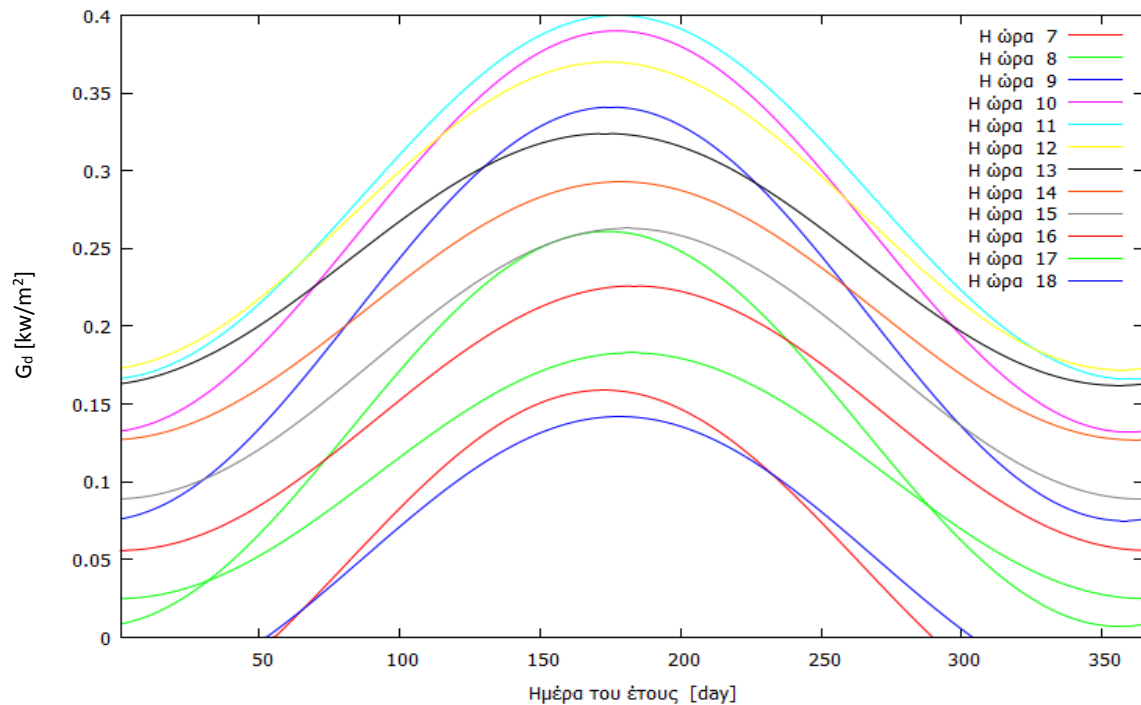


**Σχήμα 7.5:** Μεταβολή της μέσης στιγμιαίας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου  $G_b$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι τις 18:00.



**Σχήμα 7.6:** Μεταβολή της μέσης στιγμιαίας διάχυτης ακτινοβολίας οριζώντιου επιπέδου  $G_d$  σε  $[kw/m^2]$  για την 21<sup>η</sup> κάθε μηνός του έτους για τις ώρες ηλιοφάνειας (7:00 - 18:00).

Η μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζώντιου επιπέδου  $G_d$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι τις 18:00.



**Σχήμα 7.7:** Μεταβολή της μέσης στιγμιαίας διάχυτης ακτινοβολίας οριζώντιου επιπέδου  $G_d$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι τις 18:00

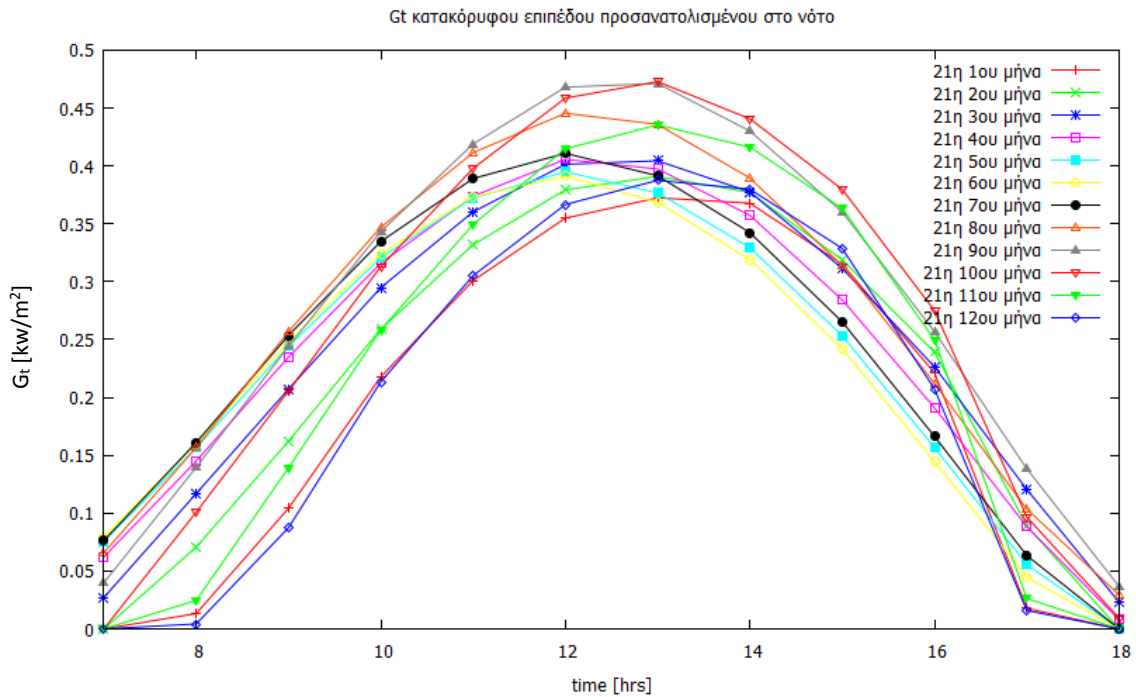


Ακολουθώντας με τη γνώση της μέσης στιγμιαίας άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου  $G_b$ , και της μέσης στιγμιαίας διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου  $G_d$ , υπολογίζεται η στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$  με βάση την εξίσωση 7.11.

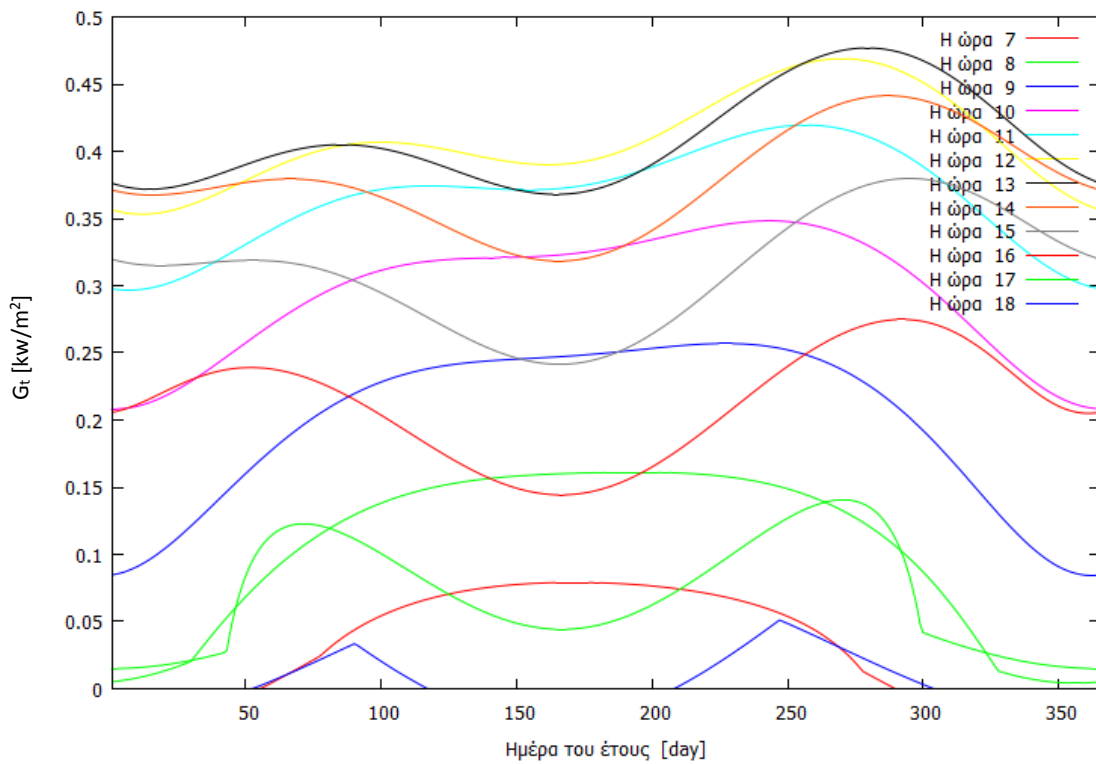
Για τον υπολογισμό της  $G_T$  σύμφωνα με την σχέση 7.11 χρειάζεται επίσης και ο υπολογισμός της ωριαίας γωνίας  $\omega$ , εξίσωση 7.14, καθώς επίσης και ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου  $R_b$  εξίσωση 7.12. Με τη γνώση αυτών και χρησιμοποιώντας τη σχέση 7.11 προκύπτει η στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου  $G_T$  για νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας  $G_t$  ( $\text{kW/m}^2$ ) στο επίπεδο και στον προσανατολισμό των προς ανάλυση εσωτερικών τοίχων. Η μεταβολή της  $G_t$  είναι συναρτήσει της ώρας της μέρας για την 21<sup>η</sup> κάθε μήνα του έτους καθώς επίσης δίνεται και ένα άλλο διάγραμμα της μεταβολής της  $G_t$  κατά τη διάρκεια του έτους για κάθε ώρα της ημέρας.

**Για νότια προσανατολισμένο κατακόρυφο επίπεδο:**

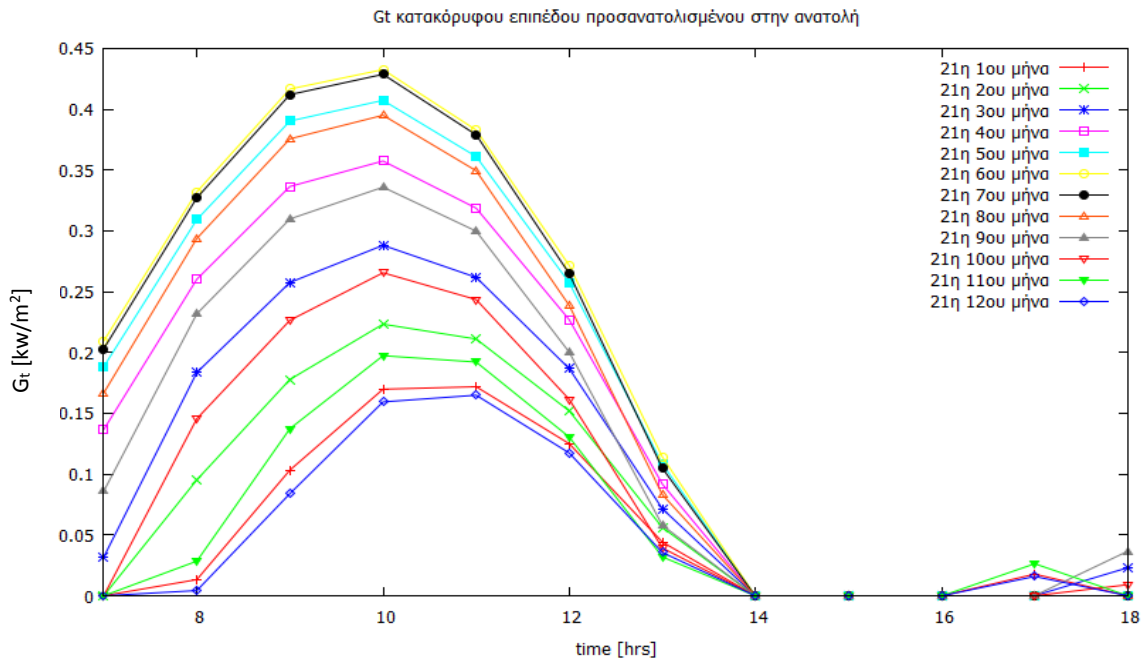


**Σχήμα 7.8:** Μεταβολή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  κατά τη διάρκεια της ημέρας.

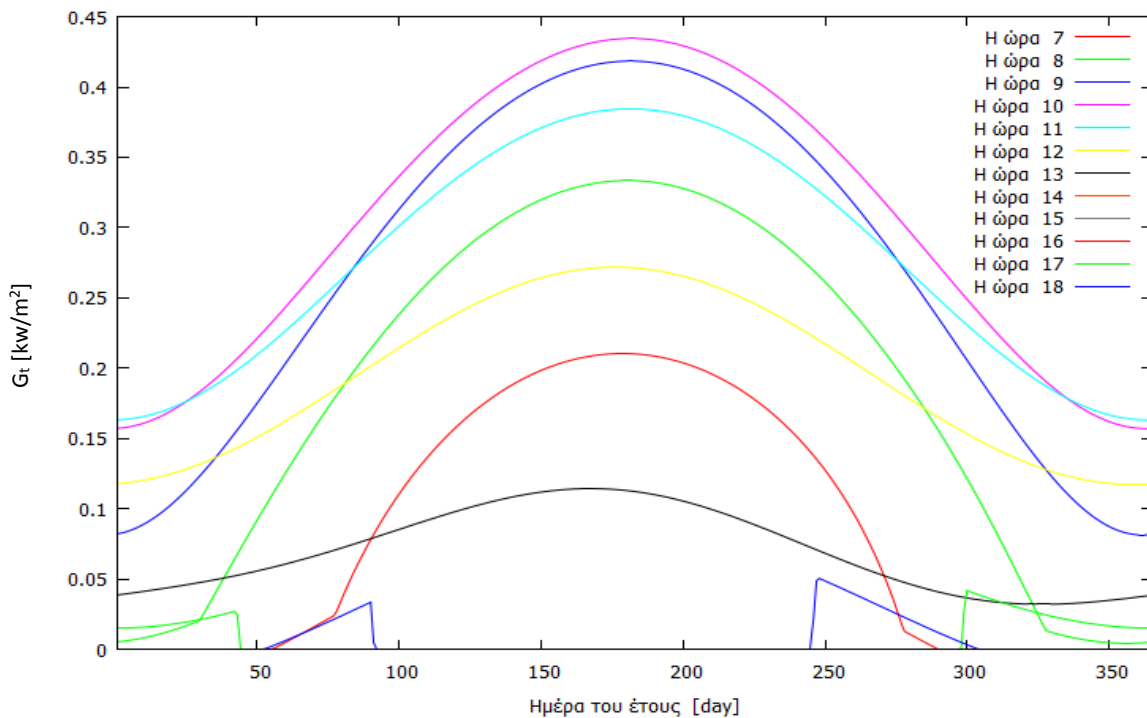


**Σχήμα 7.9:** Μεταβολή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι τις 18:00.

**Για ανατολικά προσανατολισμένο κατακόρυφο επίπεδο**



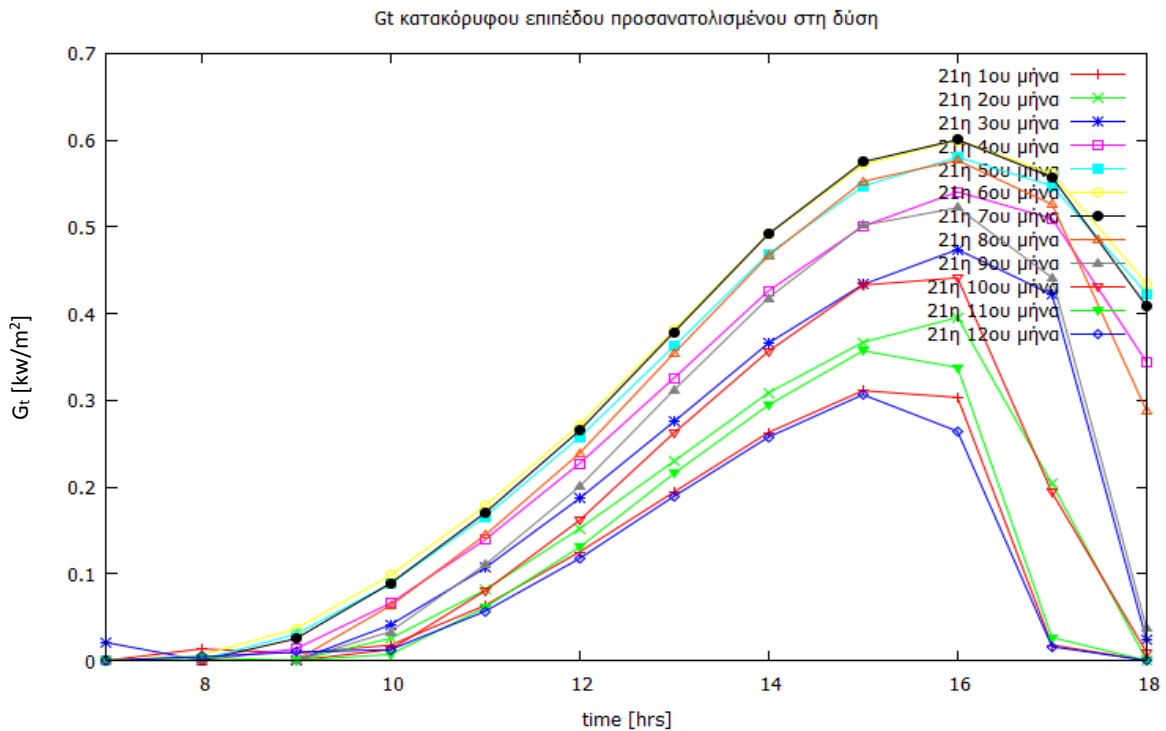
**Σχήμα 7.10:** Μεταβολή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  κατά τη διάρκεια της ημέρας.



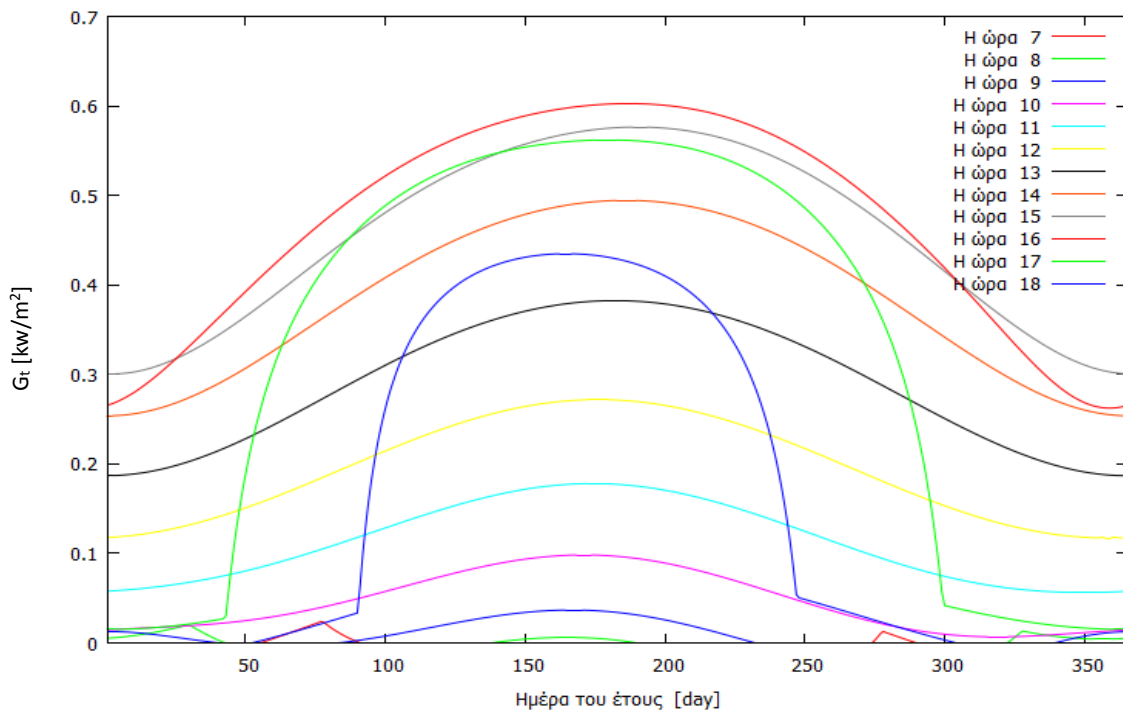
**Σχήμα 7.11:** Μεταβολή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι τις 18:00.



**Για δυτικά προσανατολισμένο κατακόρυφο επίπεδο**



**Σχήμα 7.12:** Μεταβολή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  κατά τη διάρκεια της ημέρας.



**Σχήμα 7.13:** Μεταβολή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$  κατά τη διάρκεια ενός έτους για κάθε ώρα από τις 7:00 μέχρι τις 18:00.

Στο σημείο αυτό θα ήταν καλό να αναφερθεί πως η τιμή της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_t$ , που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε βήμα υπολογισμού της θερμοκρασιακής κατανομής του τοίχου, υπολογίστηκε εκ νέου από παρεμβολή των ωριαίων της τιμών για την υπό μελέτη ημέρα του έτους. Η αριθμητική παρεμβολή έγινε με κυβικές b-splines.

#### 7.4.2 PCM σε εσωτερικούς τοίχους σπιτιών στην Αθήνα

Τα PCM που θα μελετηθούν είναι τα RT20, RT27, και SP25A8 της Rubitherm. Τα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών και των PCM παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.

Υλικό Μέγεθος	Σοβάς	Τούβλο	RT20	RT27	SP25A8
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1860.0	1690	880	880	1450
$K$ [w/mK]	1.2	0.9	0.2	0.2	0.6
$C_p$ [kJ/kgK]	0.835	0.653	$C_{p,eff}(T)^*$	$C_{p,eff}(T)^*$	$C_{p,eff}(T)^*$
$T_s$ [°C]	-	-	15.0	22.0	22.0
$T_l$ [°C]	-	-	26.0	31.0	32.0
$C_{ps}$ [kJ/kgK]	-	-	1.9	2.0	2.6
$C_{ps}$ [kJ/kgK]	-	-	2.5	2.3	2.7

**Πίνακας 7.2** : Χαρακτηριστικά υλικών

Όπου  $C_{p,eff}(T)$  η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας, σχέσεις οι οποίες δόθηκαν στην παράγραφο 5.6.

##### 7.4.2.1 Εσωτερικός τοίχος με PCM προσανατολισμένος στον νότο

Αρχικά θα γίνει η επιλογή του PCM ανάμεσα στα προαναφερθέντα έχοντας ως κριτήριο τη μέγιστη δυνατή αξιοποίησή του για την 21<sup>η</sup> του μήνα Ιανουαρίου. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για νότια προσανατολισμένο τοίχο, με και χωρίς στρώμα PCM στο εσωτερικό του για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

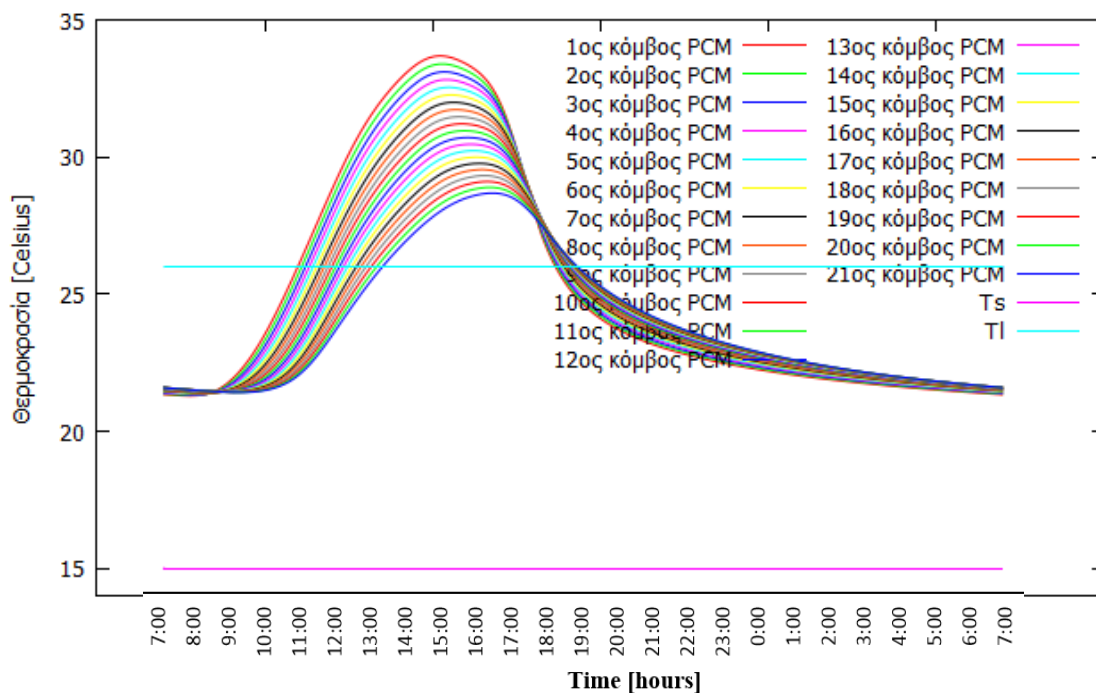
## Επιλογή κατάλληλου PCM ως στρώμα εσωτερικού τοίχου για τις υπό εξέταση συνθήκες

Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί αποτελείται, αρχίζοντας από την επιφάνεια που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, από στρώμα:

Σοβά [cm]	2
PCM [cm]	2
Τούβλο [cm]	10
Σοβά [cm]	2

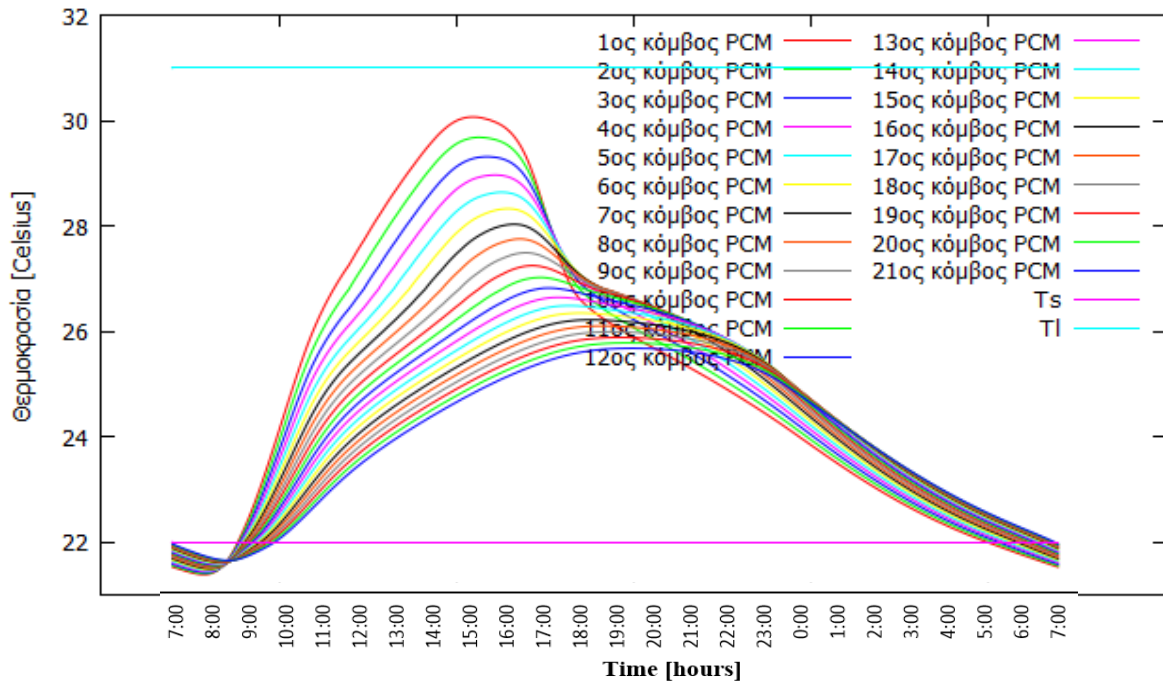
Για την επιλογή αυτή θα συγκριθούν οι καμπύλες θερμοκρασίας χρόνου του στρώματος PCM στο τοίχο.

### RT20



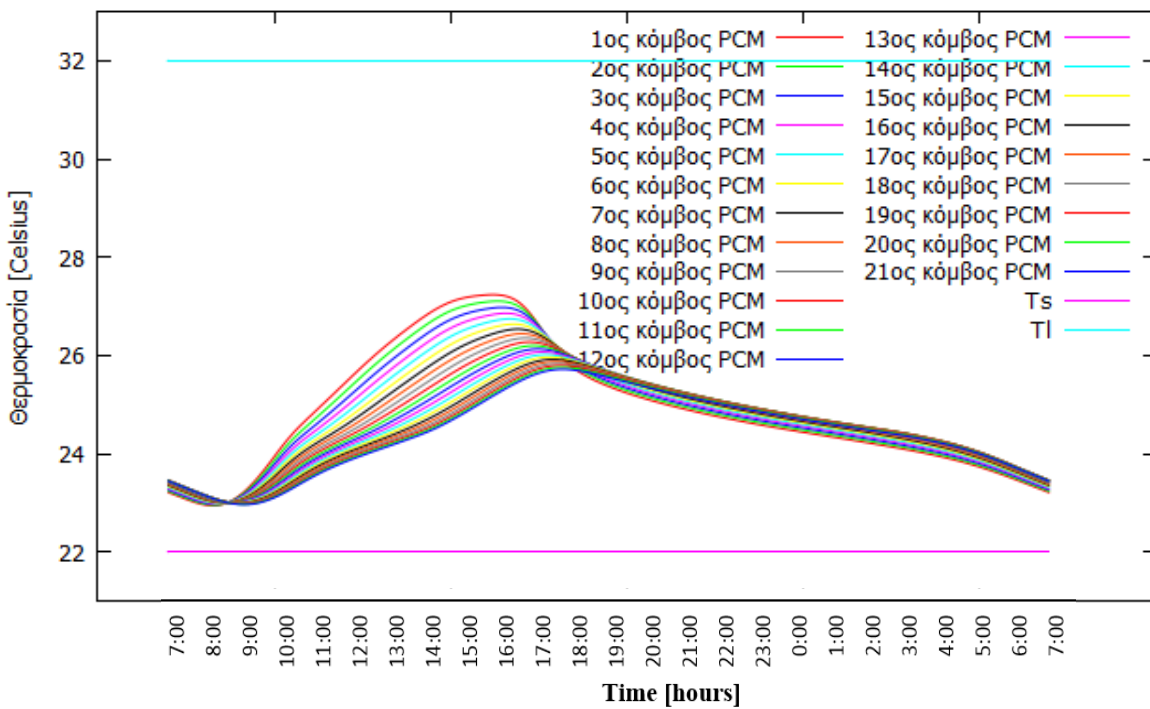
**Σχήμα 7.14:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης,  $T_s$ , και τήξης,  $T_l$ .

## RT27



**Σχήμα 7.15:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης,  $T_s$ , και τήξης,  $T_l$ .

## SP25A8



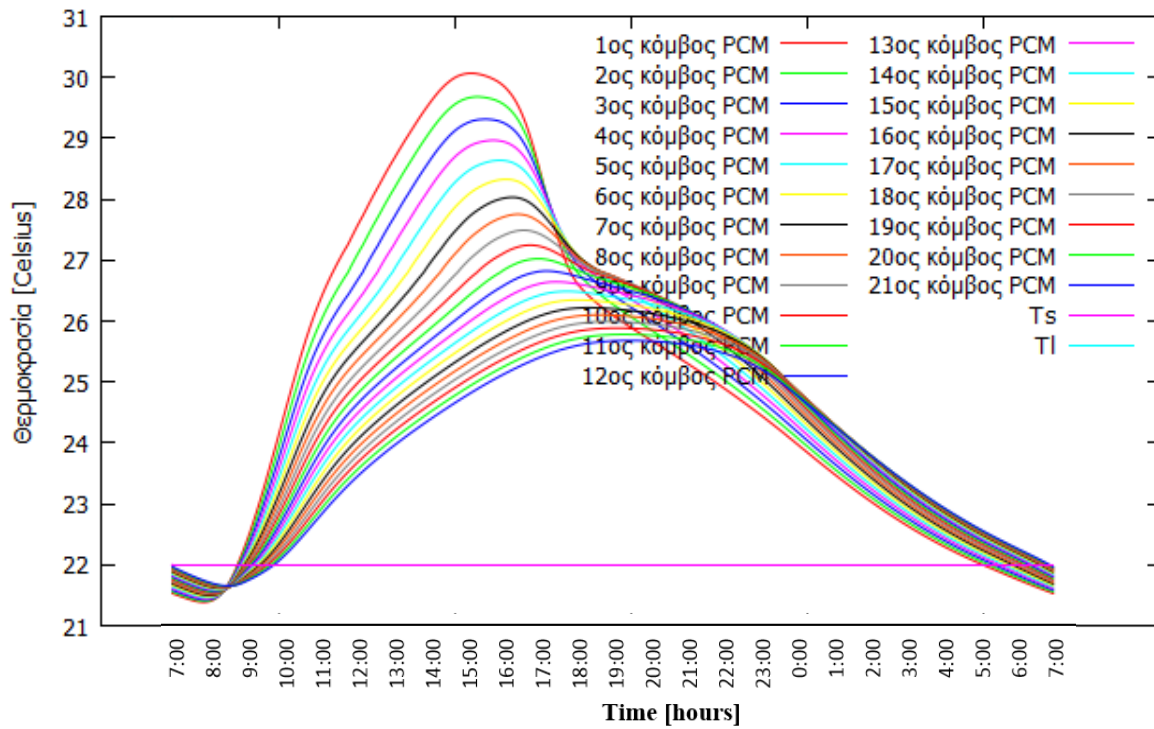
**Σχήμα 7.16:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης,  $T_s$ , και τήξης,  $T_l$ .

## Συμπεράσματα

Από τα τρία πιο πάνω γραφήματα είναι εμφανές πως η μεγαλύτερη αξιοποίηση του PCM γίνεται από το RT27. Το RT20 χρησιμοποιείται σε ένα μικρό ποσοστό από τη διφασική περιοχή μέχρι τη μετάβασή του στην υγρή φάση. Ενώ το SP25A8 φαίνεται να βρίσκεται μόνο στην διφασική περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας, αν και το θερμοκρασιακό εύρος είναι σχεδόν ίδιο με το RT27. Αυτό οφείλεται στο ότι η πυκνότητα του πρώτου είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα του RT27. Τέλος και στις τρεις περιπτώσεις παρατηρείται πως οι κόμβοι, που βρίσκονται σε κοντινότερη απόσταση στην επιφάνεια του τοίχου που δέχεται την ακτινοβολία, εμφανίζονται να έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της έντονης ηλιοφάνειας. Ακολούθως όμως λόγω της πρόσδοσης θερμότητας στο χώρο, η θερμοκρασία τους πέφτει σε χαμηλότερα επίπεδα, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο.

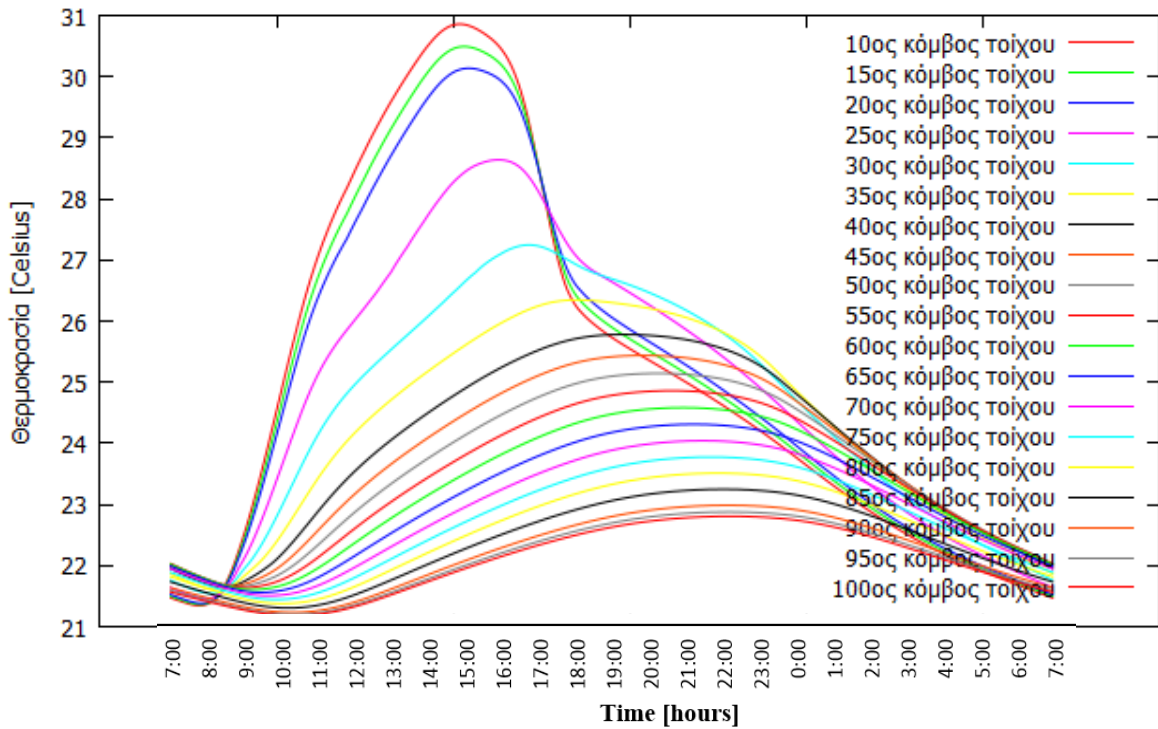
Με βάση το κριτήριο επιλογής που τέθηκε, για μέγιστη αξιοποίηση του PCM, η παράθεση των αποτελεσμάτων για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου θα γίνει στη συνέχεια μόνο για το RT27. Διευκρινίζεται ότι η επιλογή γίνεται με βάση τις επιδόσεις των PCM την υπό εξέταση μέρα.

## RT27



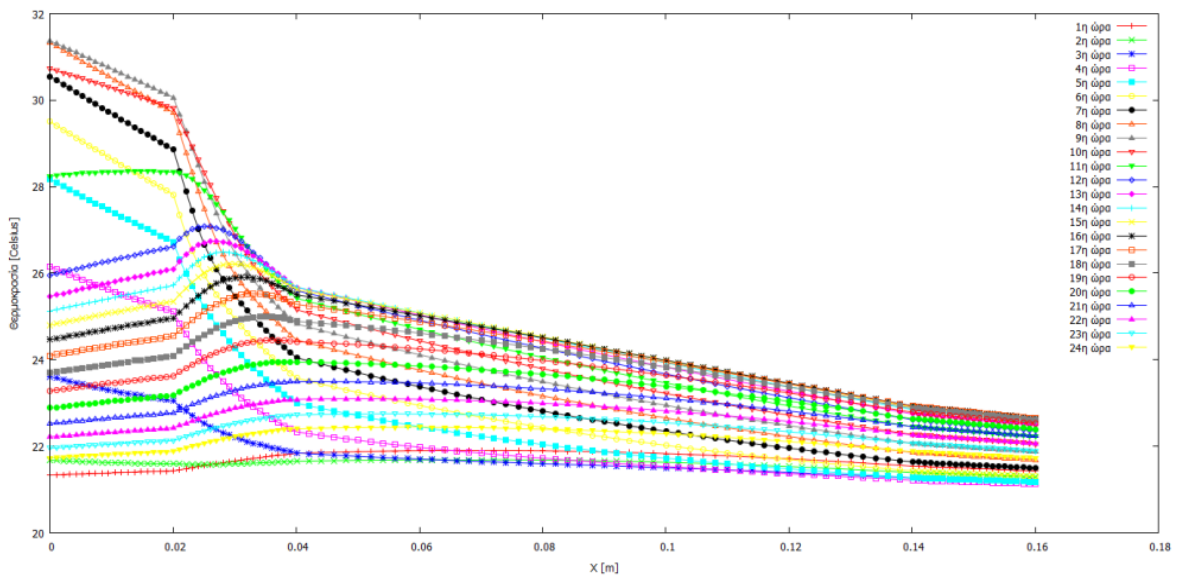
**Σχήμα 7.17:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης,  $T_s$ , και τήξης,  $T_l$ .

Ακολουθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων της διαστρωμάτωσης του τοίχου κατά τη διάρκεια του 24ώρου.



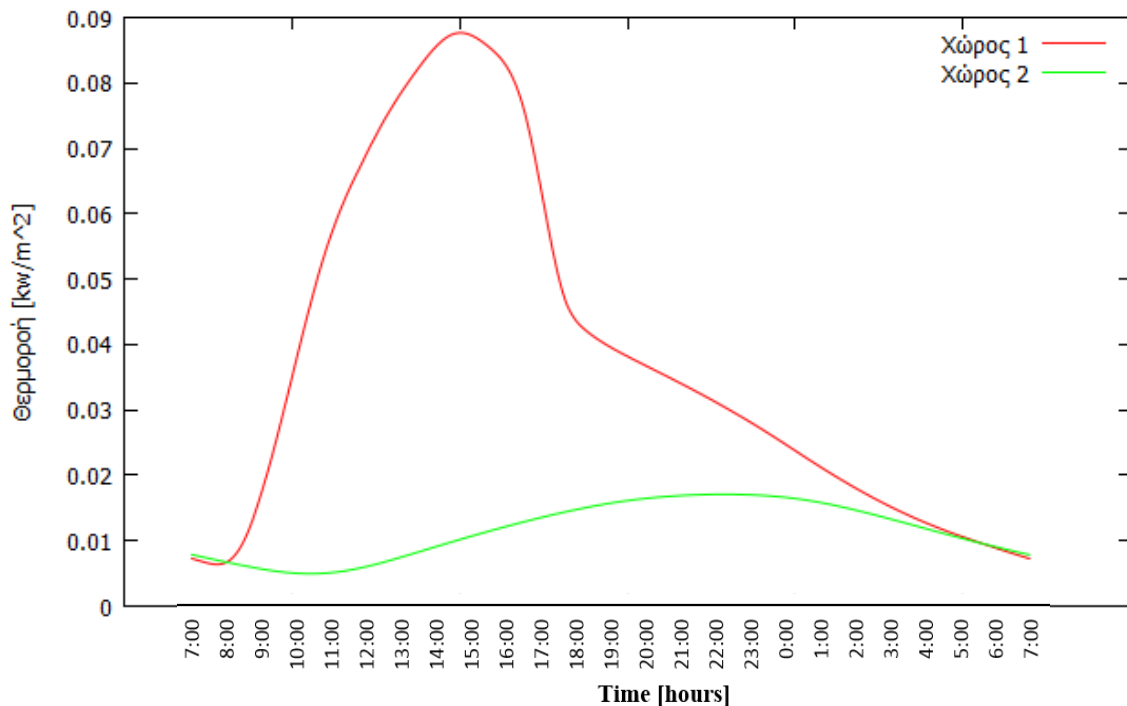
**Σχήμα 7. 18:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-40 PCM, 40-90 τούβλο, 90-110 σοβάς).

Το παρακάτω σχήμα 7.19 αναπαριστά την κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της τομής του τοίχου για κάθε ώρα.



**Σχήμα 7.19:** Κατανομή της θερμοκρασίας στο τοίχο για το μέσο κάθε ώρας του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30.

Επιπρόσθετα στα πιο πάνω γραφήματα, ενδιαφέρον είναι και το γράφημα της θερμορροής στους δυο χώρους που συνορεύει ο τοίχος.



**Σχήμα 7.20:** Θερμορροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

Το εμβαδόν κάτω από τη κάθε καμπύλη θερμορροή-χρόνος, ισοδυναμεί με την ενέργεια που δίνεται στο κάθε δωμάτιο ανά τετραγωνικό μέτρο. Για το κάθε δωμάτιο έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο του τραπεζιού.

- Στο δωμάτιο 1 όπου ακτινοβολεί ο ήλιος διαμέσου του υαλοπίνακα είναι:

$$3414.685 \text{ kJ/m}^2$$

- Στο δωμάτιο 2 είναι:

$$1016.820 \text{ kJ/m}^2$$

### Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

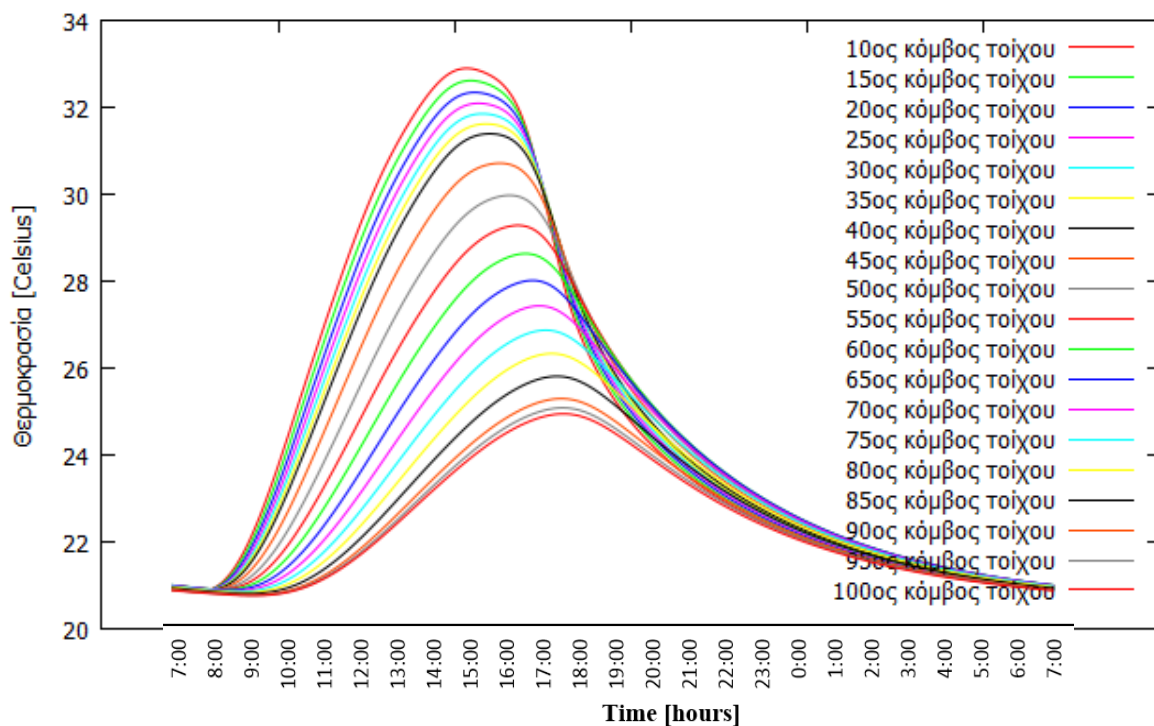
Στο γράφημα θερμοκρασίας-χρόνου των κόμβων που αναπαριστούν τον τοίχο, παρατηρείται γύρω στις 18:00 καμπή στη μεταβολή της θερμοκρασίας των πρώτων εξ αυτών, όπου η κλίση των καμπύλων θερμοκρασίας-χρόνου μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται με την εμφάνιση μέγιστης θερμοκρασίας στο χρονικό αυτό



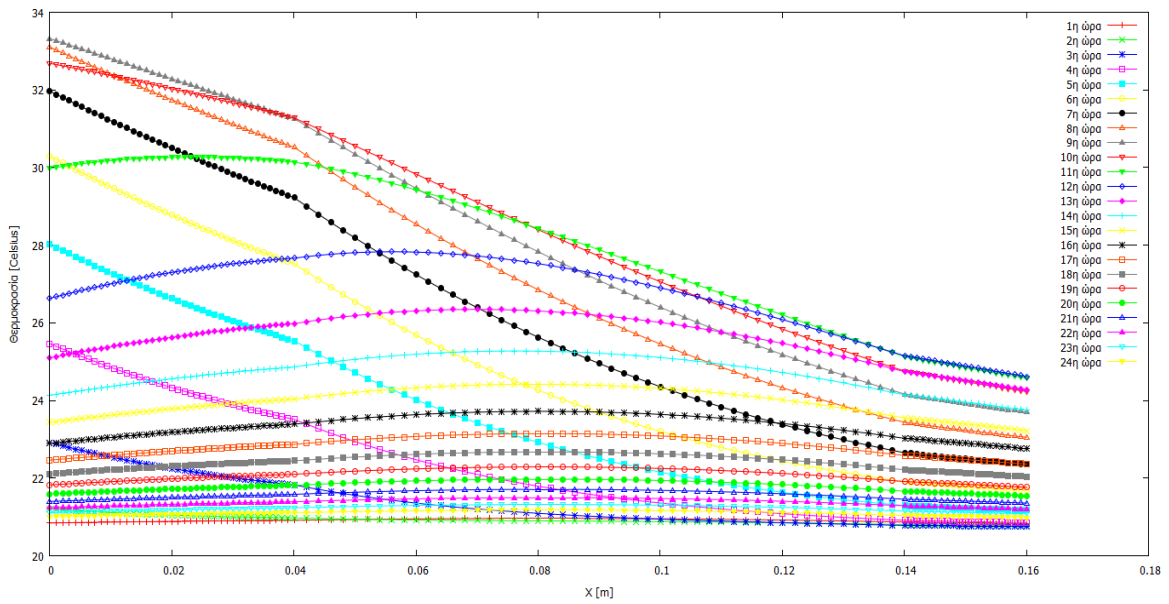
διάστημα των υπόλοιπων κόμβων. Η καμπή αυτή παρατηρείται και στο διάγραμμα της θερμορροής. Επιπλέον στο διάγραμμα θερμοκρασίας – απόστασης, είναι εμφανείς οι θέσεις αλλαγής στρώματος από την ασυνέχεια της πρώτης παραγώγου. Ακόμη, το σύνολο των καμπύλων του τελευταίου δίνει την εικόνα της κατανομής της θερμοκρασίας τόσο στη φόρτιση, όσο και κατά την αποφόρτιση του PCM.

#### 7.4.2.1.1 Σύγκριση με πρότυπο, συνήθη τοίχο

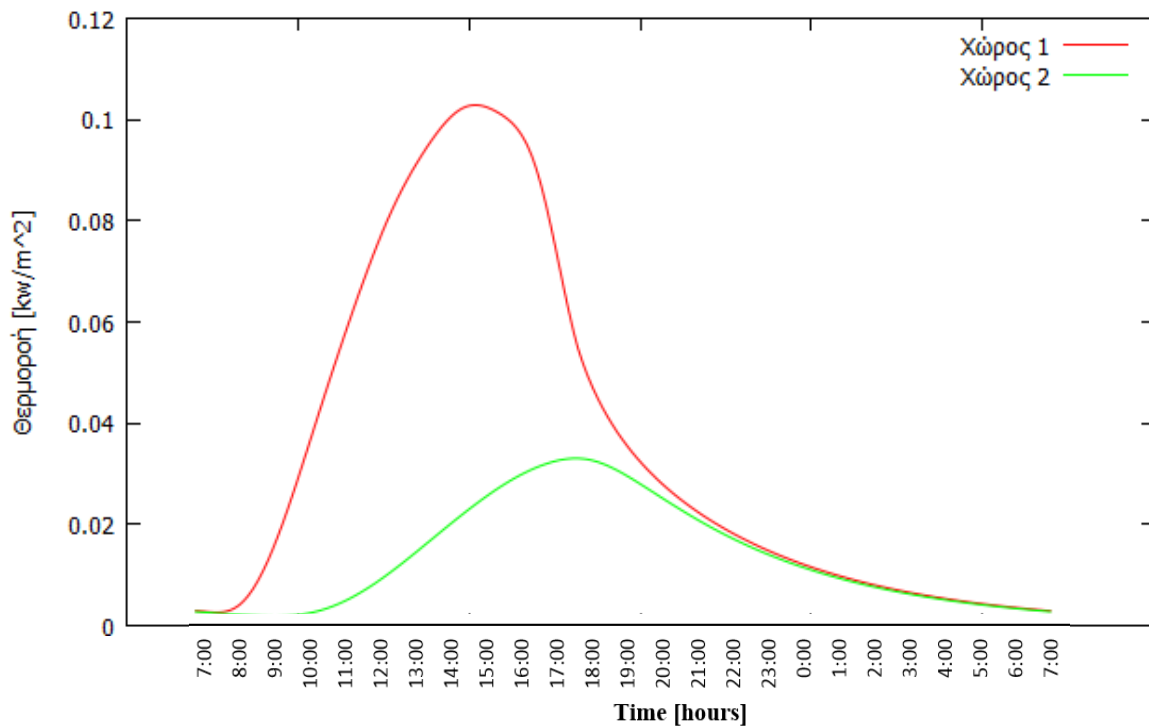
Η ενεργειακή προσφορά ενός τοίχου με στρώμα PCM στο εσωτερικό του γίνεται αντιληπτή αν συγκριθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες με ένα συνήθη, κοινό τοίχο. Ένας τοίχος με τις ίδιες διαστάσεις χωρίς στρώμα PCM για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου έχει τις εξής επιδόσεις:



**Σχήμα 7.21:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-40 PCM, 40-90 τούβλο, 90-110 σοβάς).



**Σχήμα 7.22:** Κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για το μέσο κάθε ώρας του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30.

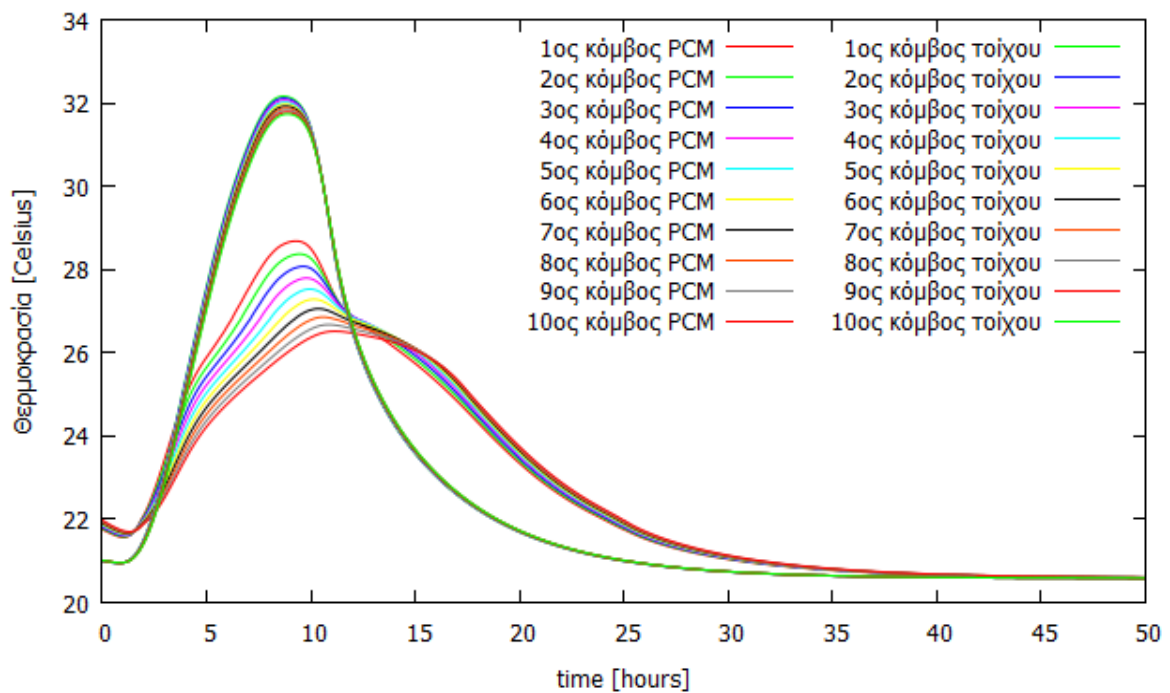


**Σχήμα 7.23:** Θερμορροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

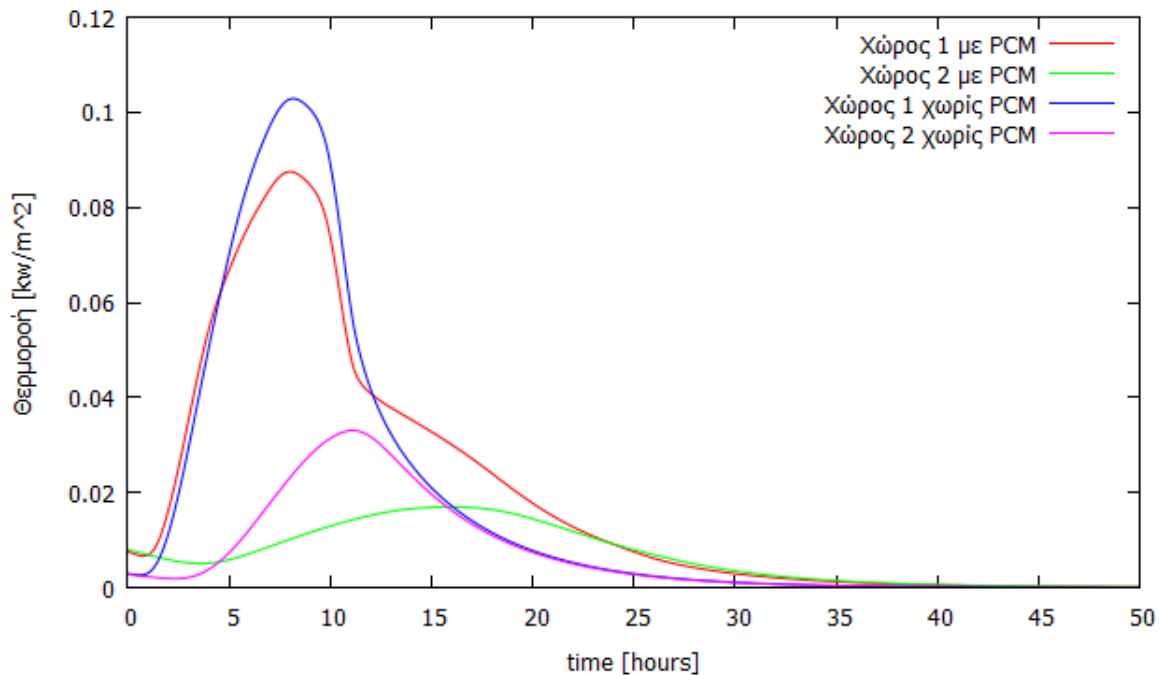
Η ενέργεια που δίνεται στο κάθε δωμάτιο ανά τετραγωνικό μέτρο αντιστοιχεί:

- Για το δωμάτιο 1 είναι  $3237.175 \text{ kJ/m}^2$
- Για το δωμάτιο 2 είναι  $1226.661 \text{ kJ/m}^2$

Για την κατανόηση της ενεργειακής αξίας του PCM θα εξεταστεί ένα 48ωρο, με ηλιοφάνεια το 1<sup>ο</sup> 24ωρο και με πλήρη συννεφιά το 2<sup>ο</sup>.



**Σχήμα 7.24:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας 10 ενδιάμεσων κόμβων τόσο του PCM όσο και του τοίχου των ίδιων αντίστοιχων θέσεων κατά τη διάρκεια των ημερών 21 και 22 Ιανουαρίου με την πρώτη μόνο να έχει ηλιοφάνεια.



**Σχήμα 7.25:** Θερμοροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος κατά τη διάρκεια των ημερών 21 και 22 Ιανουαρίου με την πρώτη μόνο να έχει ηλιοφάνεια.

Μετά από υπολογισμούς συγκεντρώθηκε η πρόσδοση ενέργειας του PCM στο κάθε δωμάτιο ανά τετραγωνικό μέτρο μετά από 3 μέρες χωρίς ήλιο για απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας 50%.

Ημερομηνία Ιανουαρίου	Κατάσταση Ημέρας	Τοίχος με PCM		Τοίχος χωρίς PCM	
		Δωμάτιο 1	Δωμάτιο 2	Δωμάτιο 1	Δωμάτιο 2
21	Ηλιοφάνεια	3412,836106	1016,014	3237,175	1226,661
22	Συννεφιά	144,6872711	169,3597	52,68604	50,15216
23	Συννεφιά	1,8153478	2,18413	0,382038	0,363665
24	Συννεφιά	2,32E-02	2,79E-02	2,77E-03	2,64E-03

**Πίνακας 3:** Πρόσδοση ενέργειας του PCM ανά τετραγωνικό μέτρο στο κάθε δωμάτιο μετά από 3 ημέρες χωρίς ήλιο.

## Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

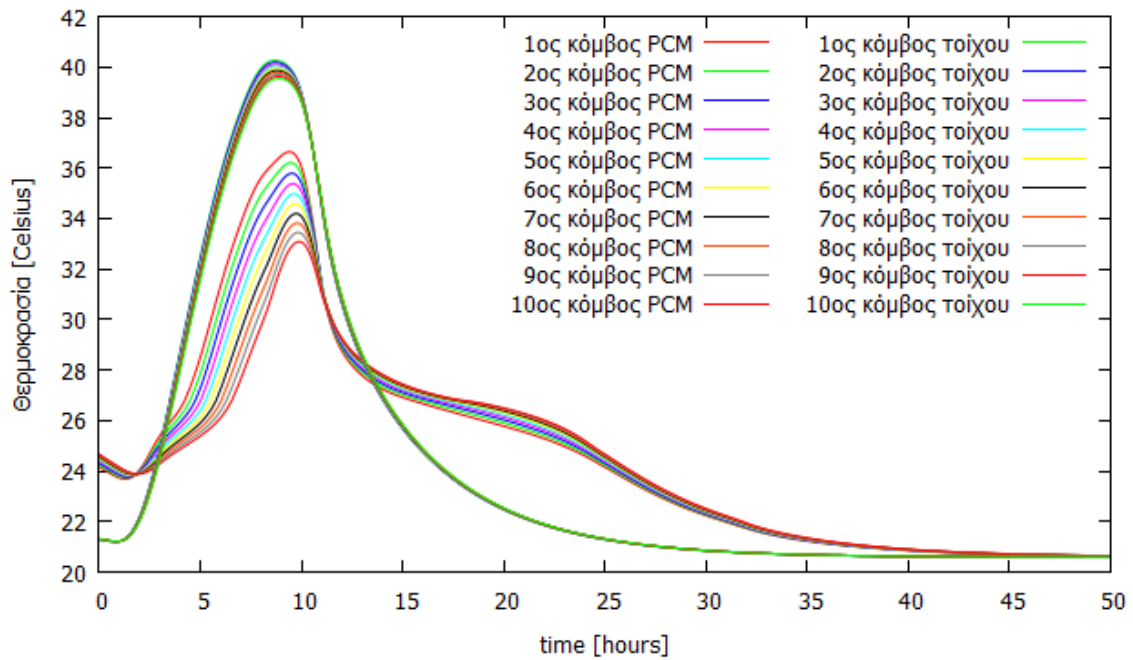
Από τα πιο πάνω γραφήματα είναι εμφανές πως ο τοίχος με PCM έχει καλύτερη θερμική απόδοση από τον τοίχο χωρίς PCM. Ο τοίχος χωρίς PCM μπορεί να εμφανίζει μεγαλύτερα μέγιστα θερμοκρασίας τις αντίστοιχες ώρες, αλλά δεν έχει την ικανότητα να διατηρήσει τη θερμική αυτή ενέργεια, σε αντίθεση με τον τοίχο που στο εσωτερικό του έχει PCM. Επιπλέον με τη βοήθεια του PCM οι θερμοκρασίες των εξωτερικών επιφανειών του τοίχου, που έρχονται σε επαφή με τα δυο δωμάτια, μεταβάλλονται σε πιο στενά, θερμοκρασιακά όρια, ενώ παράλληλα διατηρούν τη θερμοκρασία τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Στο πίνακα 7.3 αναγράφεται η συνολική πρόσδοση ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο σε κάθε δωμάτιο και για κάθε περίπτωση για τις ημέρες 21, 22, 23 και 24 Ιανουαρίου. Από τον πίνακα αυτό παρατηρείται πως στο πρώτο δωμάτιο και τις 4 ημέρες, η πρόσδοση ενέργειας είναι μεγαλύτερη, ενώ η ενέργεια που προσδίδει ο τοίχος τις ημέρες 22, 23 και 24 Ιανουαρίου, με μηδενική ηλιοφάνεια, είναι περίπου τριπλάσια και στα δύο δωμάτια σε σχέση πάντα με τον τοίχο χωρίς PCM.

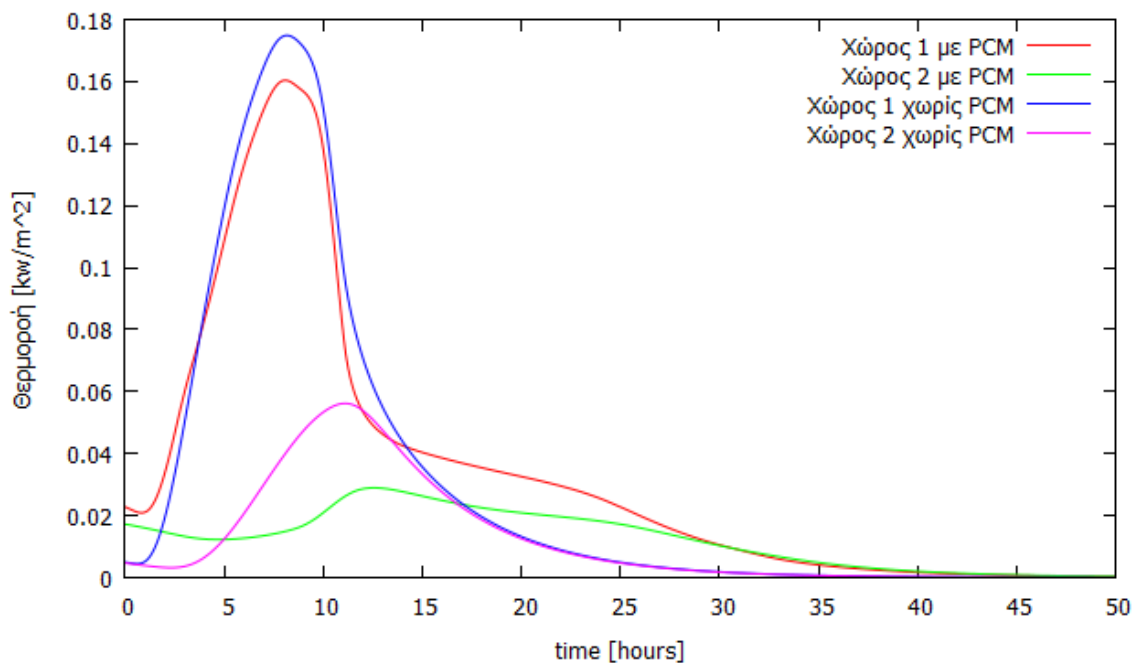
Στις 21 του μηνός τα υπολογισμένα στοιχεία δείχνουν ότι η συνολική ενέργεια που προσδίδεται στο 2<sup>ο</sup> δωμάτιο, στην περίπτωση τοίχου με PCM, είναι μικρότερη σε σχέση με τοίχο χωρίς PCM. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός πως το κύριο υλικό θερμικής αποθήκευσης, PCM, βρίσκεται τοποθετημένο πολύ πιο κοντά στο 1<sup>ο</sup> δωμάτιο.

Τέλος με βάση τα στοιχεία του πίνακα 7.3 αξίζει να επισημανθεί ο λόγος, για τον οποίο η ενέργεια που προσδίδεται στο χώρο 1 είναι μικρότερη από αυτή που προσδίδεται στο χώρο 2 για τις ημέρες 21, 22, 23 και 24, στην περίπτωση τοίχου με PCM. Ο λόγος είναι πως από μία χρονική στιγμή και μετά, μέγιστη θερμοκρασία στον τοίχο εμφανίζει το τούβλο, και σε συνδυασμό με τη μικρότερη θερμική αντίσταση κατά τη μετάδοση της θερμότητας προς το 2<sup>ο</sup> δωμάτιο, η πρόσδοση ενέργειας σε αυτό είναι μεγαλύτερη. Σε αυτό το σημείο είναι ξεκάθαρη πλέον η ενεργειακή αξία του PCM για το κτίριο.

Στην περίπτωση που ο τοίχος θεωρηθεί ότι έχει περισσότερη απορροφητικότητα - 85% σε σχέση με την τιμή που θωρήθηκε πριν-50%, τα γραφήματα θα εξελίσσονταν ως:



**Σχήμα 7.26:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας 10 ενδιάμεσων κόμβων τόσο του PCM όσο και του τοίχου των ιδίων αντιστοιχων θέσεων κατά την διάρκεια των ημερών 21 και 22 Ιανουαρίου με την πρώτη μόνο να έχει ηλιοφάνεια.



**Σχήμα 7.27:** Θερμορροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος κατά τη διάρκεια των ημερών 21 και 22 Ιανουαρίου με την πρώτη μόνο να έχει ηλιοφάνεια.

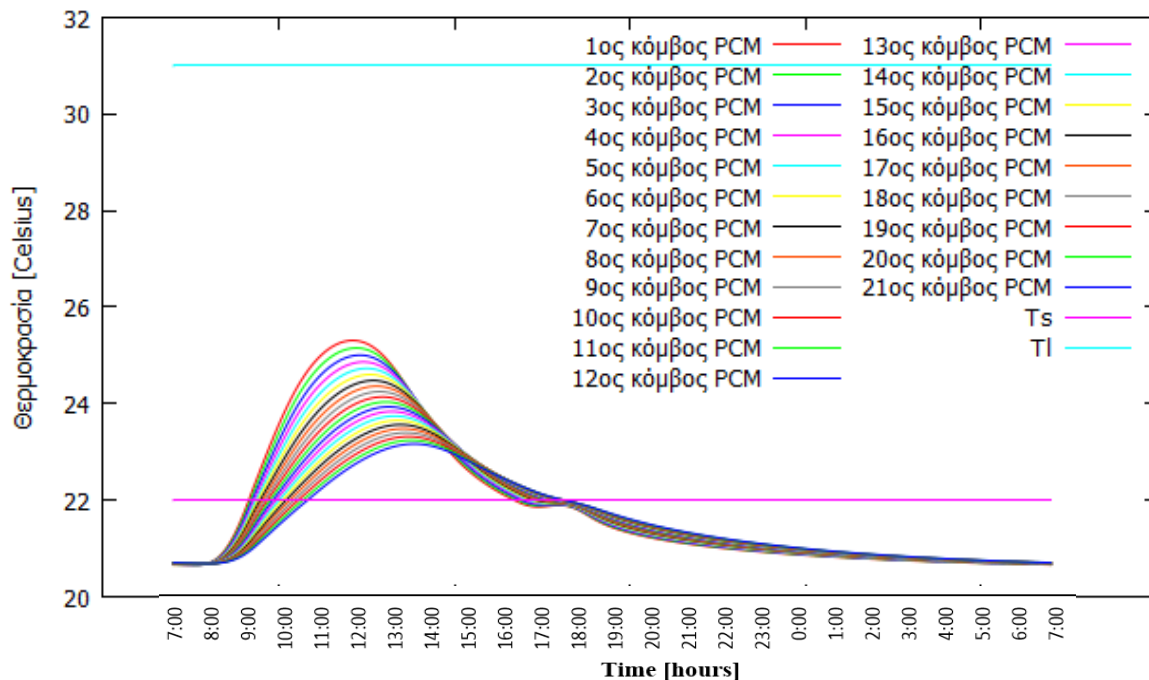
## Συμπεράσματα

Στην περίπτωση μεγαλύτερου συντελεστή απορροφητικότητας ηλιακής ακτινοβολίας, 85%, παρατηρείται εντονότερα η διαφορά ανάμεσα στο συνήθη τοίχο και στον τοίχο με PCM, σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση με 50% απορροφητικότητα.

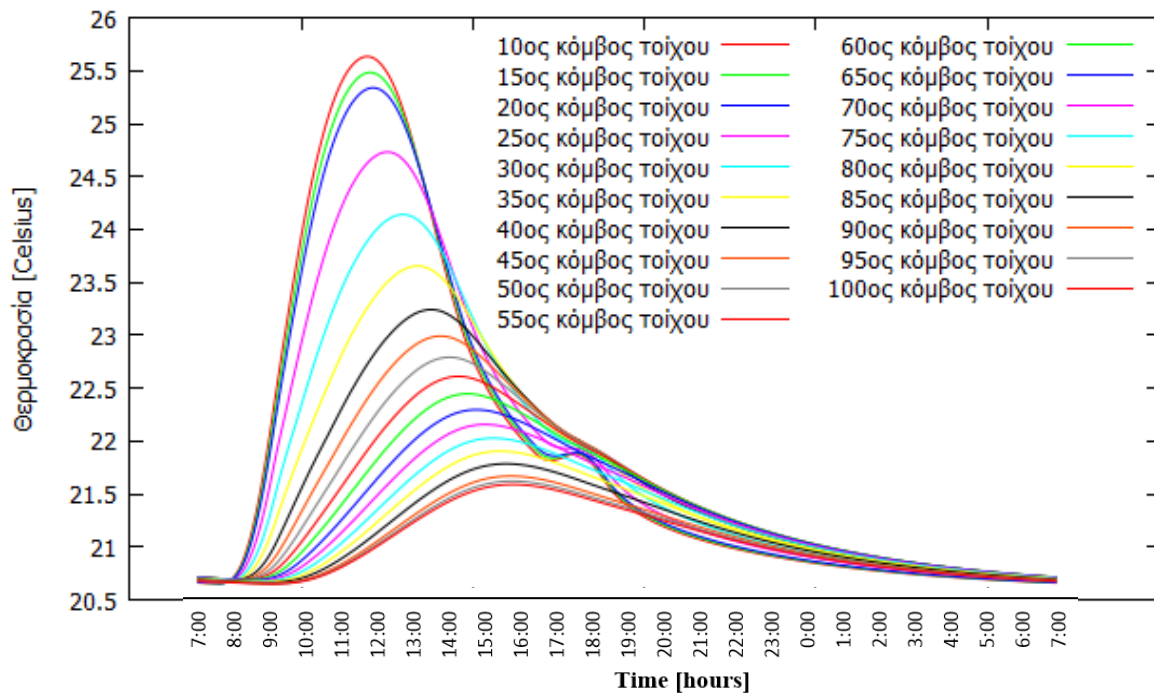
### 7.4.2.2 Εσωτερικός τοίχος με προσανατολισμό στην ανατολή

Οι υπολογισμοί γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα με εσωτερικό τοίχο στραμμένο στην ανατολή απέναντι από μεγάλο υαλοπίνακα. Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί αποτελείται, αρχίζοντας από την επιφάνεια που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, από τα εξής στρώματα:

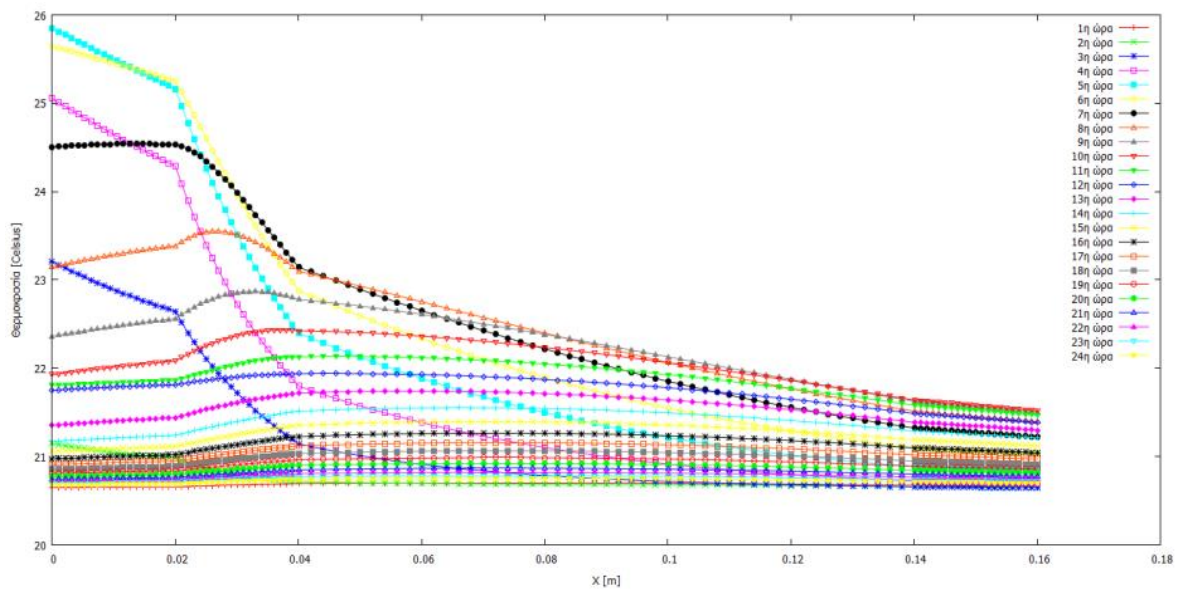
Σοβά [cm]	2
PCM RT27 [cm]	2
Τούβλο [cm]	10
Σοβά [cm]	2



**Σχήμα 7.28:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.

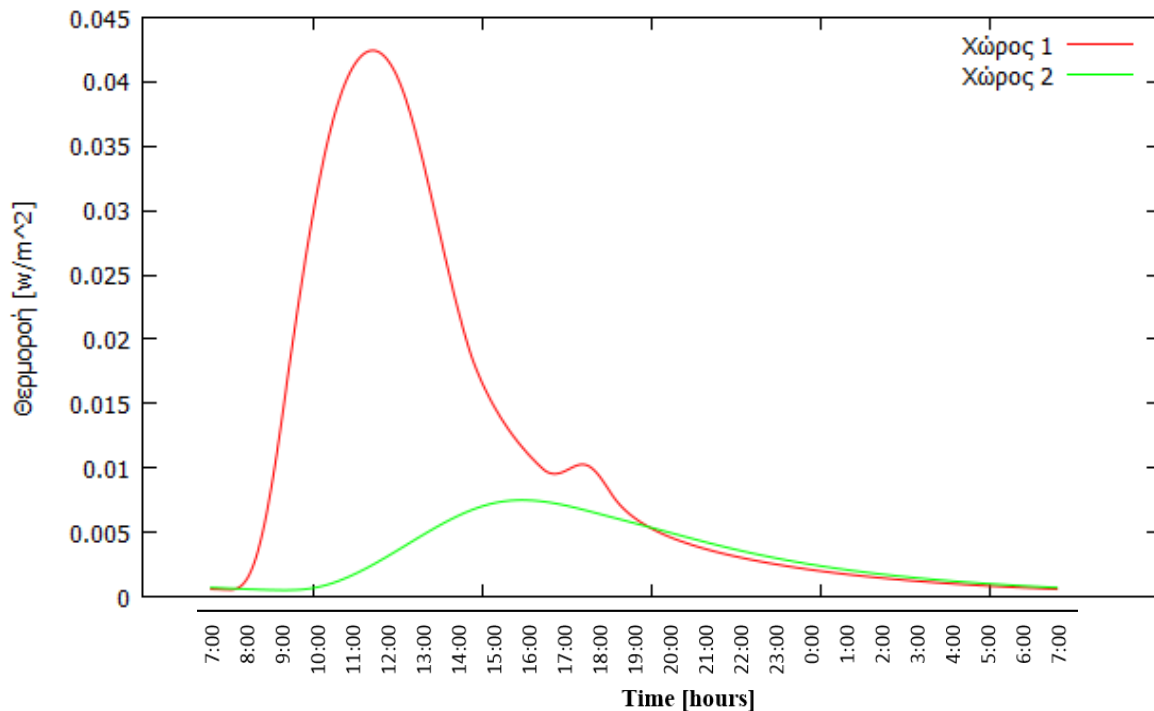


**Σχήμα 7.29:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-40 PCM, 40-90 τούβλο, 90-110 σοβάς).



**Σχήμα 7.30:** Κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για το μέσο, κάθε ώρα του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30.





**Σχήμα 7.31:** Θερμοροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

### Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Στην περίπτωση προσανατολισμένου ανατολικά τοίχου, ο τοίχος φαίνεται να έχει λιγότερη απόδοση σε σχέση με τον νότιο προσανατολισμένο τοίχο. Αρχικά είναι ξεκάθαρο πώς το PCM αξιοποιείται σε πολύ λιγότερο βαθμό. Ακόμη η πρόσδοση θερμότητας κατά τη διάρκεια του 24ώρου είναι σαφώς πιο χαμηλή. Επιπρόσθετα στο γράφημα θερμοκρασίας-χρόνου των κόμβων που αναπαριστούν τον τοίχο, παρατηρείται γύρω στις 17:00 τοπικό ελάχιστο και ακολούθως τοπικό μέγιστο της θερμοκρασίας των πρώτων εξ αυτών. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται λόγω της τάσης για θερμική ισορροπία.

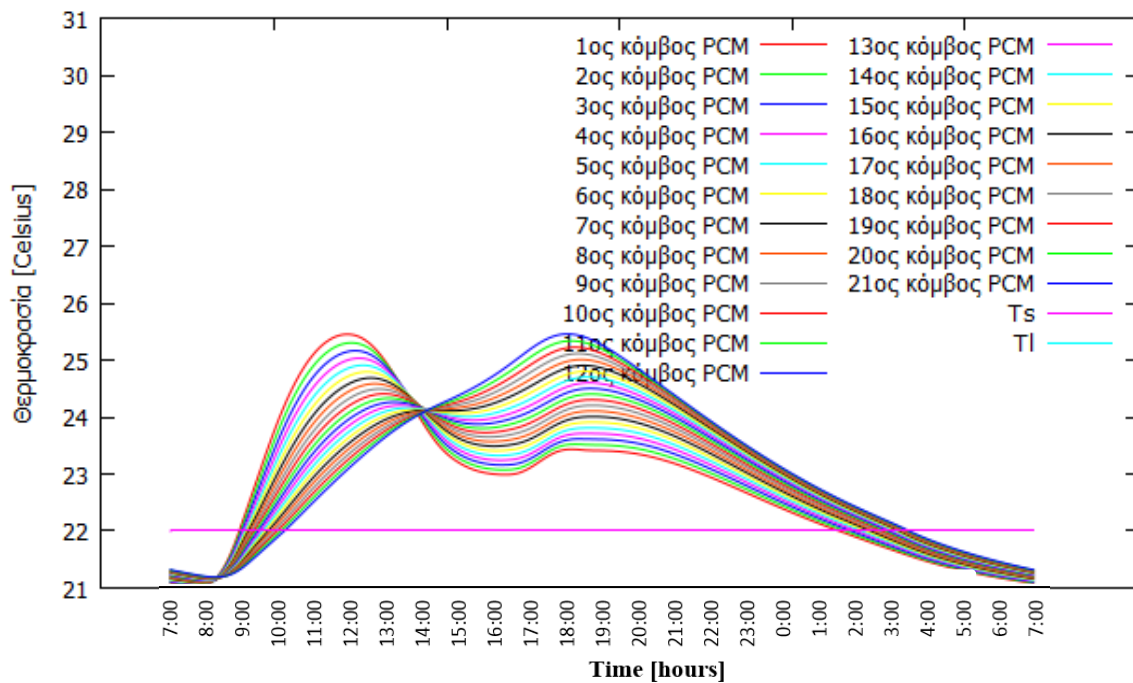
#### 7.4.2.3 Εσωτερικός τοίχος με προσανατολισμό στην Ανατολή-Δύση

##### Χρήση μιας στρώσης PCM στην Ανατολική Πλευρά

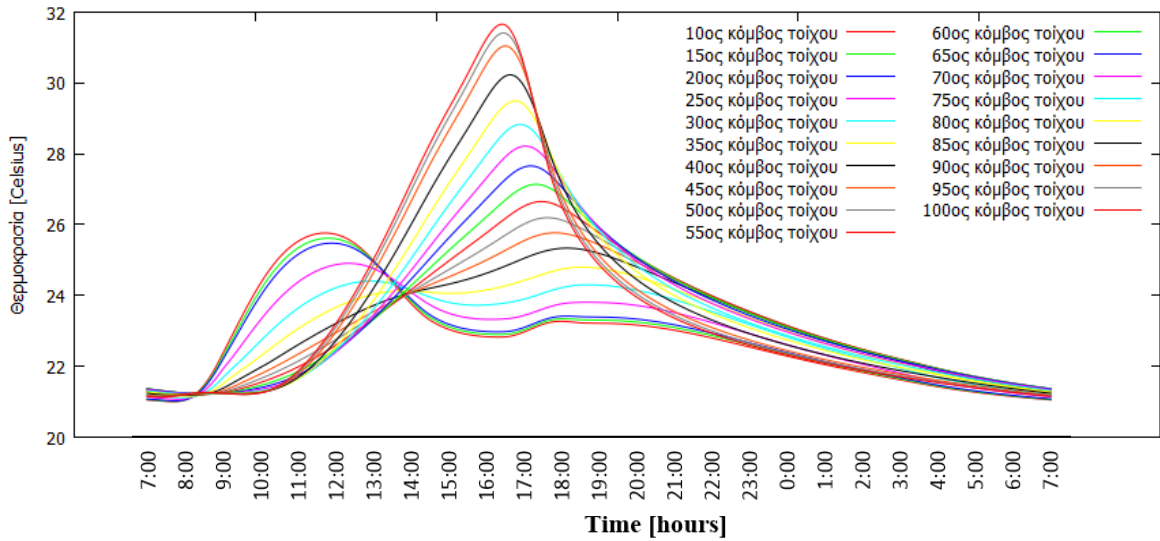
Οι υπολογισμοί γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα με εσωτερικό τοίχο με μία στρώση PCM, κάθετο στην κατεύθυνση του νότου απέναντι από ανατολικό και δυτικό

υαλοπίνακα. Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί αποτελείται αρχίζοντας από την επιφάνεια που είναι στραμμένη στη ανατολή από:

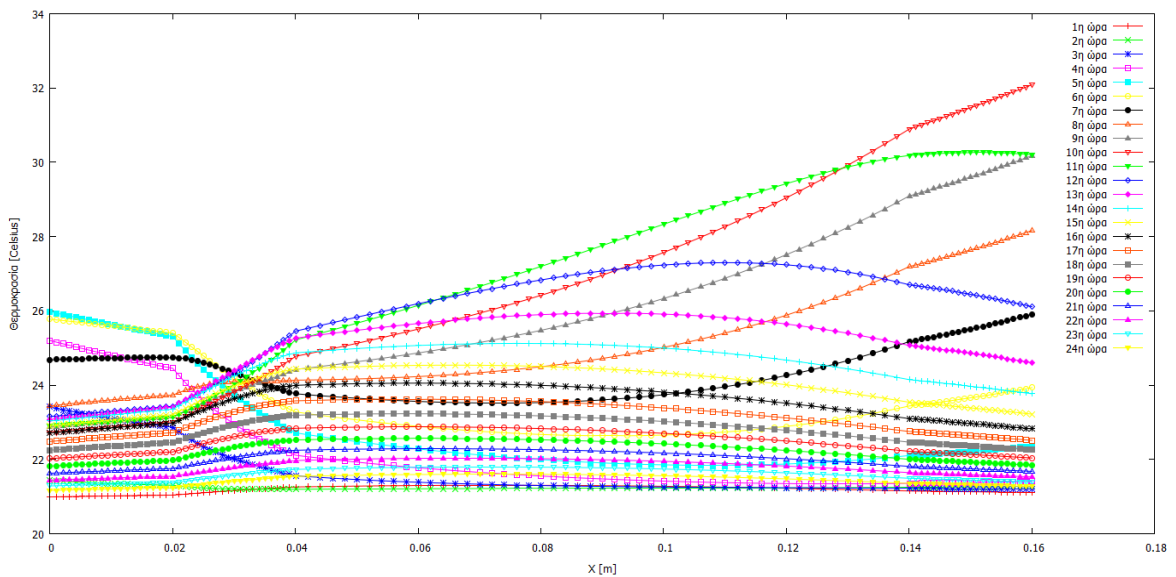
Σοβά [cm]	2
PCM RT27 [cm]	2
Τούβλο [cm]	10
Σοβά [cm]	2



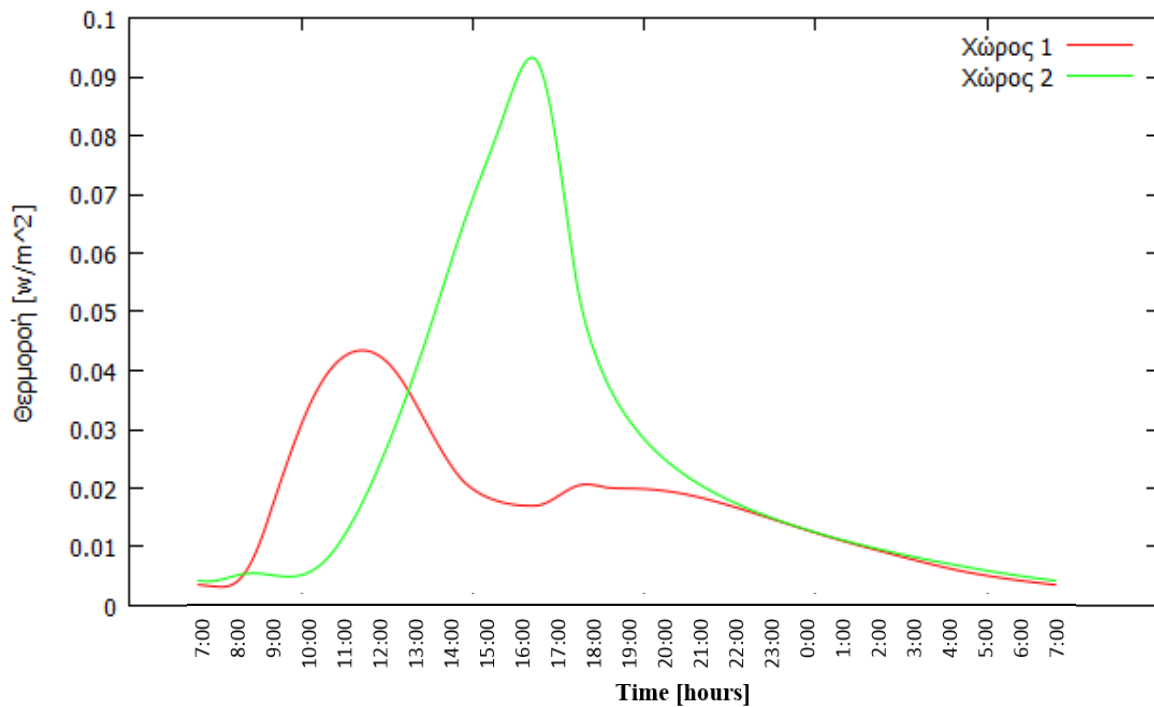
**Σχήμα 7.32:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.



**Σχήμα 7.33:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-40 PCM, 40-90 τούβλο, 90-110 σοβάς).



**Σχήμα 7. 34:** Κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για το μέσο, κάθε ώρα του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30



**Σχήμα 7.35:** Θερμοροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

### Συμπεράσματα

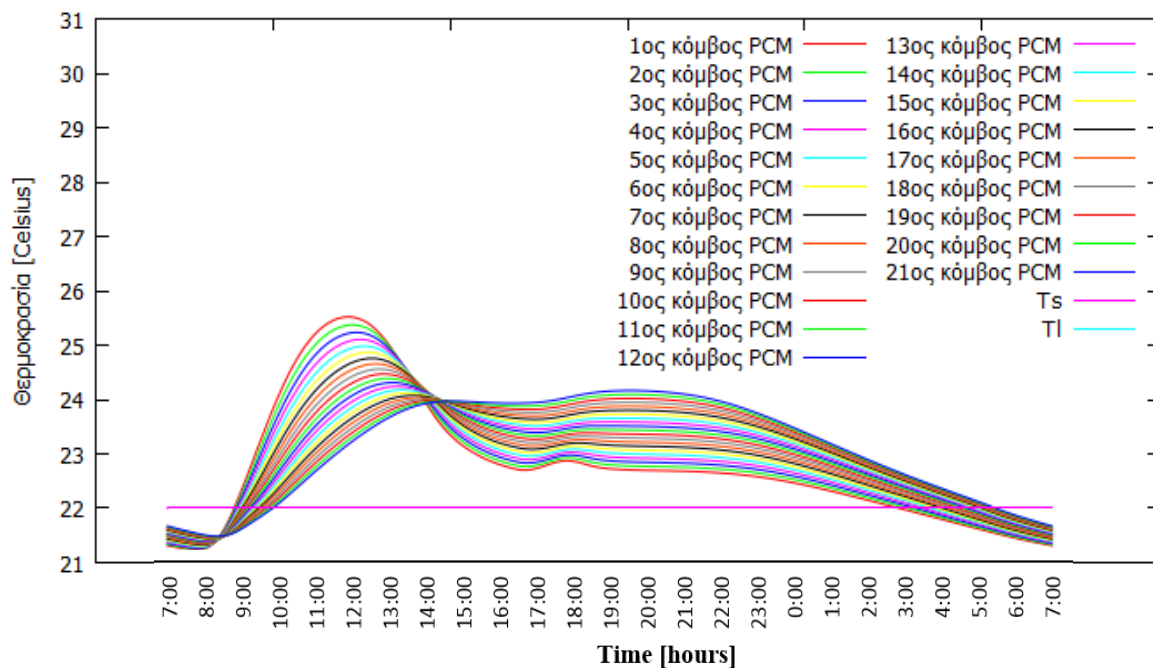
Στην περίπτωση αυτή ο τοίχος έχει και πάλι λιγότερη απόδοση σε σχέση με το νότια προσανατολισμένο τοίχο, αλλά όπως αναμενόταν, σε σύγκριση με την περίπτωση ενός υαλοπίνακα η πρόσδοση θερμότητας είναι μεγαλύτερη. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM διατηρείται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στη διασκή περιοχή. Οι ανατολικοί κόμβοι, τόσο του PCM όσο και του τοίχου, εμφανίζουν πρώτοι τοπικό μέγιστο. Με την μείωση όμως της ακτινοβολίας από τον ανατολικό υαλοπίνακα και ταυτόχρονη αύξηση από το δυτικό, με ήδη αυξημένη θερμοκρασία, ολικό μέγιστο παρουσιάζουν οι δυτικοί κόμβοι. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως οι περιπτώσεις αυτές, ακτινοβολίας στον ίδιο τοίχο από ανατολικό και δυτικό υαλοπίνακα, είναι σπάνιες λόγω αρχιτεκτονικής των κτιρίων.

### Χρήση δύο στρώσεων PCM στην Ανατολική και Δυτική Πλευρά

Οι υπολογισμοί γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα για εσωτερικό τοίχο με 2 στρώσεις PCM, κάθετο στην κατεύθυνση του νότου, απέναντι από ανατολικό και δυτικό υαλοπίνακα. Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί, αποτελείται αρχίζοντας από την επιφάνεια στραμμένη στη ανατολή από:

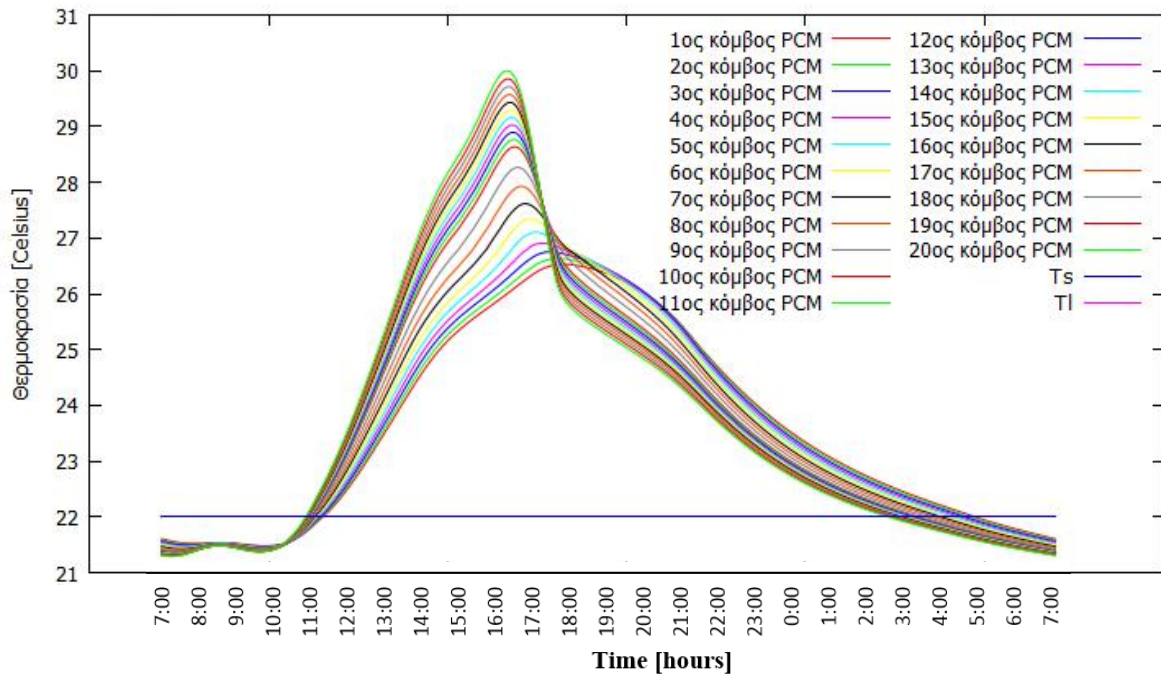
Ανατολή	
Σοβά [cm]	2
PCM RT27 [cm]	2
Τούβλο [cm]	10
PCM RT27 [cm]	1
Σοβά [cm]	1
Δύση	

#### Ανατολικό PCM

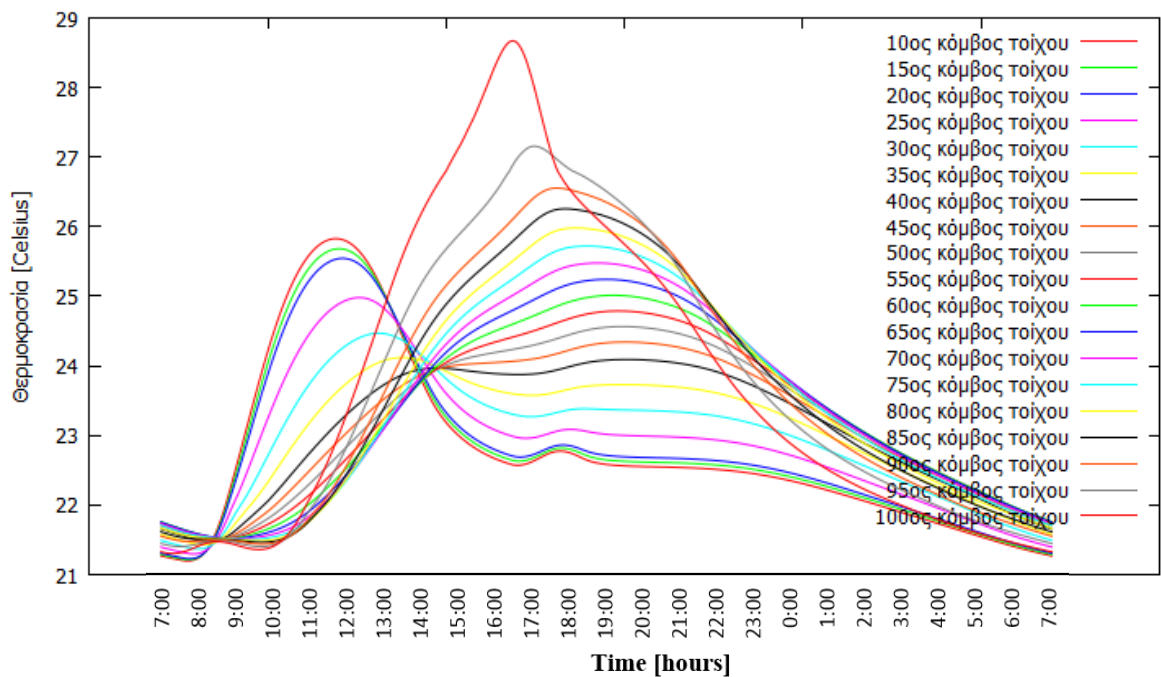


**Σχήμα 7.36:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.

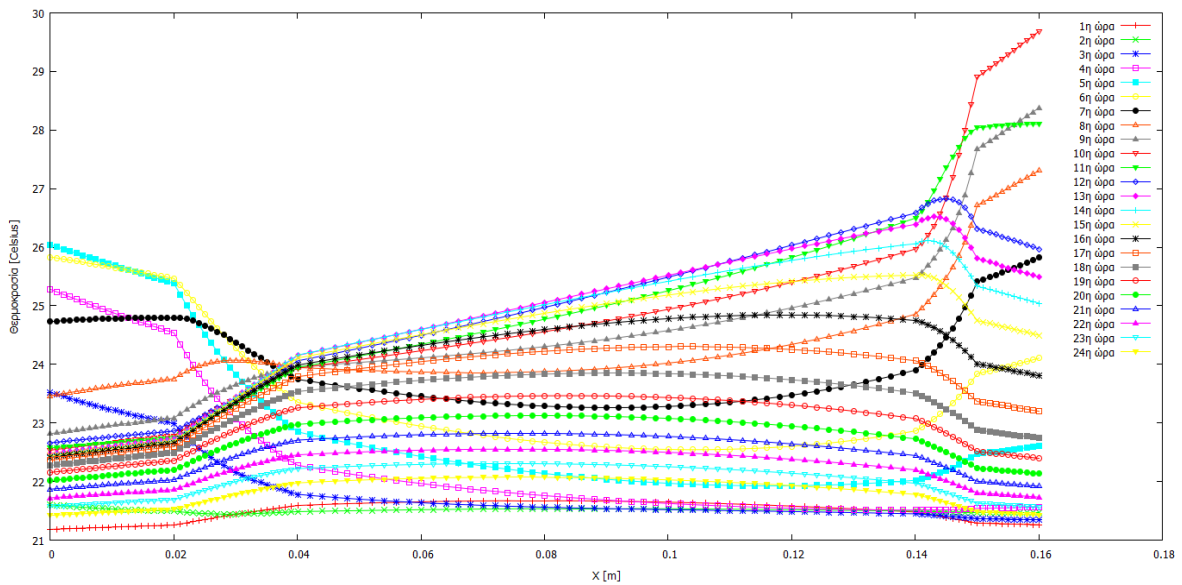
### Δυτικό PCM



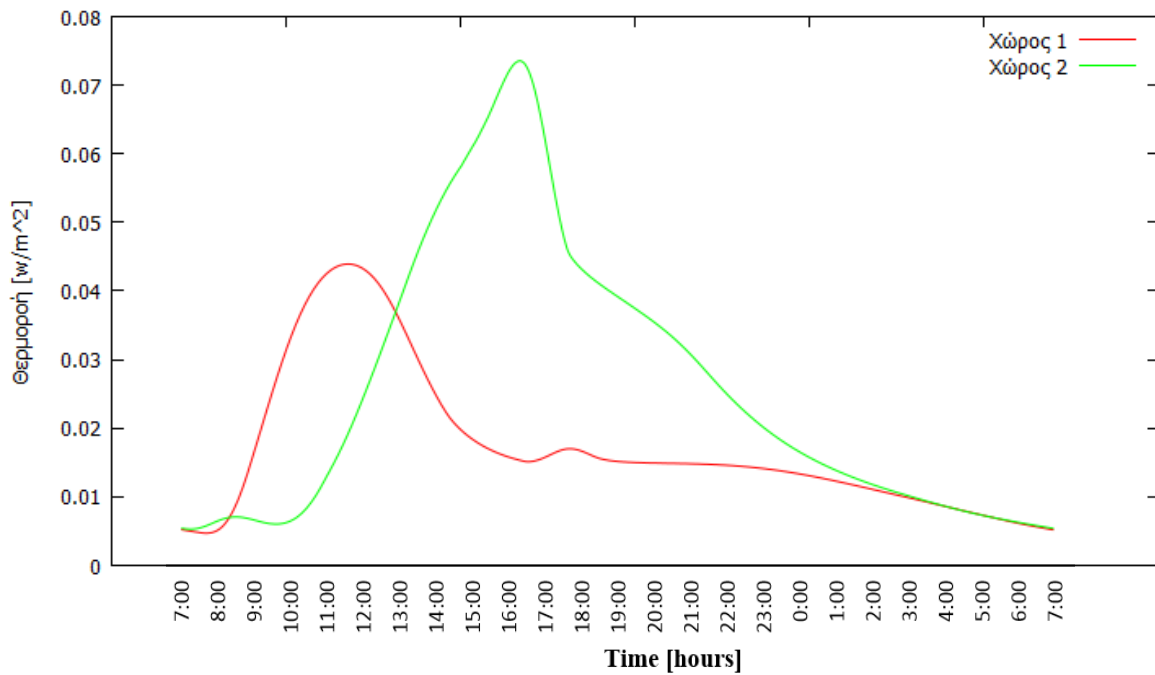
**Σχήμα 7.37:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.



**Σχήμα 7.38:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-10 σοβάς, 10-30 PCM, 30-80 τούβλο, 80-100 PCM, 100-110 σοβάς).



**Σχήμα 7.39:** Κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για το μέσο, κάθε ώρα του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30



**Σχήμα 7.40:** Θερμοροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

## Συμπεράσματα

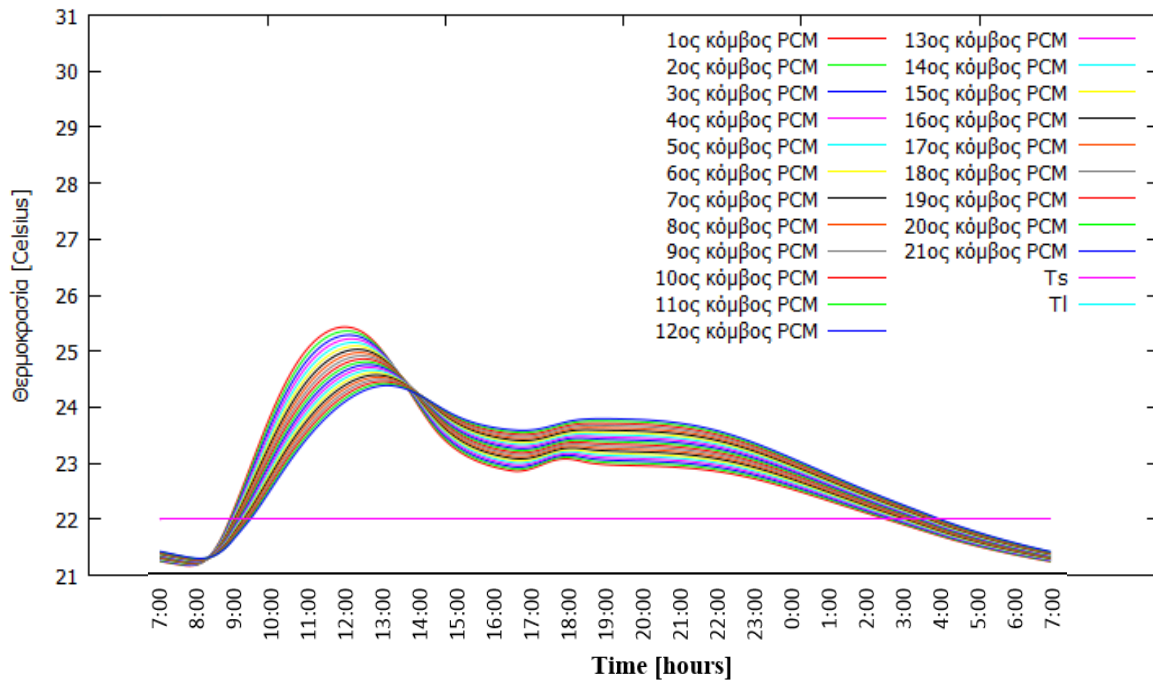
Στην περίπτωση αυτή η ύπαρξη του δυτικού PCM δεν επιτρέπει στους δυτικούς κόμβους του ανατολικού PCM να εμφανίσουν ολικό μέγιστο στο στρώμα αυτό. Επιπλέον ενδιαφέρον σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει το ποσοστό αξιοποίησης του δυτικού 2<sup>ου</sup> στρώματος PCM. Από το σχήμα 7.37 οι θερμοκρασίες του PCM πλησιάζουν την θερμοκρασία τήξης του. Μια σύγκριση στο σημείο αυτό με την αξιοποίηση του PCM σε νότια προσανατολισμένο τοίχο δε θα ήταν σωστή αφού και το πάχος PCM του τελευταίου είναι διπλάσιο.

## Χρήση δύο στρώσεων PCM στην Ανατολική και Δυτική Πλευρά σε συμμετρική διάταξη

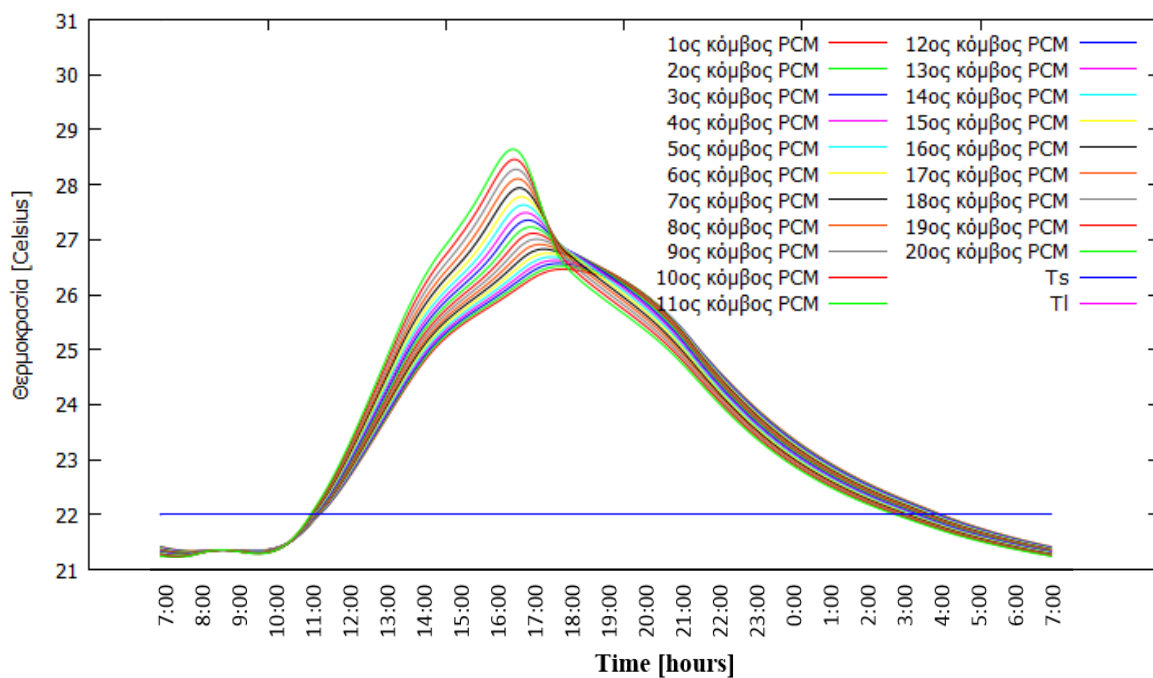
Οι υπολογισμοί γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα με εσωτερικό τοίχο με 2 στρώσεις PCM, κάθετο στην κατεύθυνση του νότου απέναντί από ανατολικό και δυτικό υαλοπίνακα. Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί, αποτελείται αρχίζοντας από την επιφάνεια στραμμένη στη ανατολή από:

Ανατολή	
Σοβά [cm]	2
PCM RT27 [cm]	1
Τούβλο [cm]	10
PCM RT27 [cm]	1
Σοβά [cm]	2
Δύση	

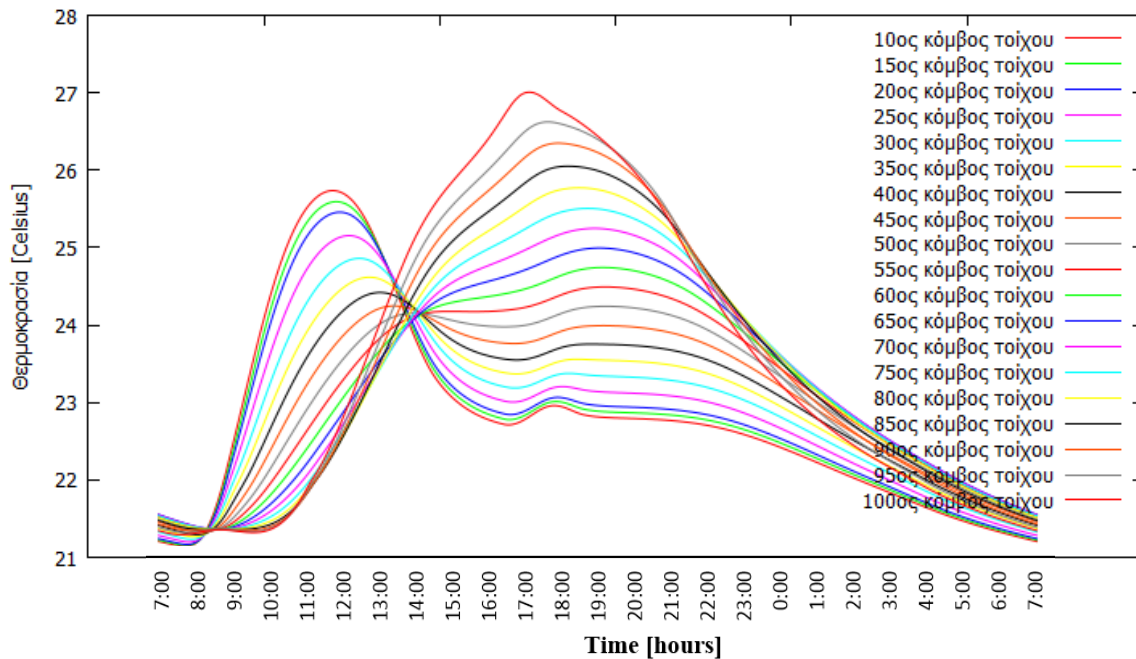


**Ανατολικό PCM**

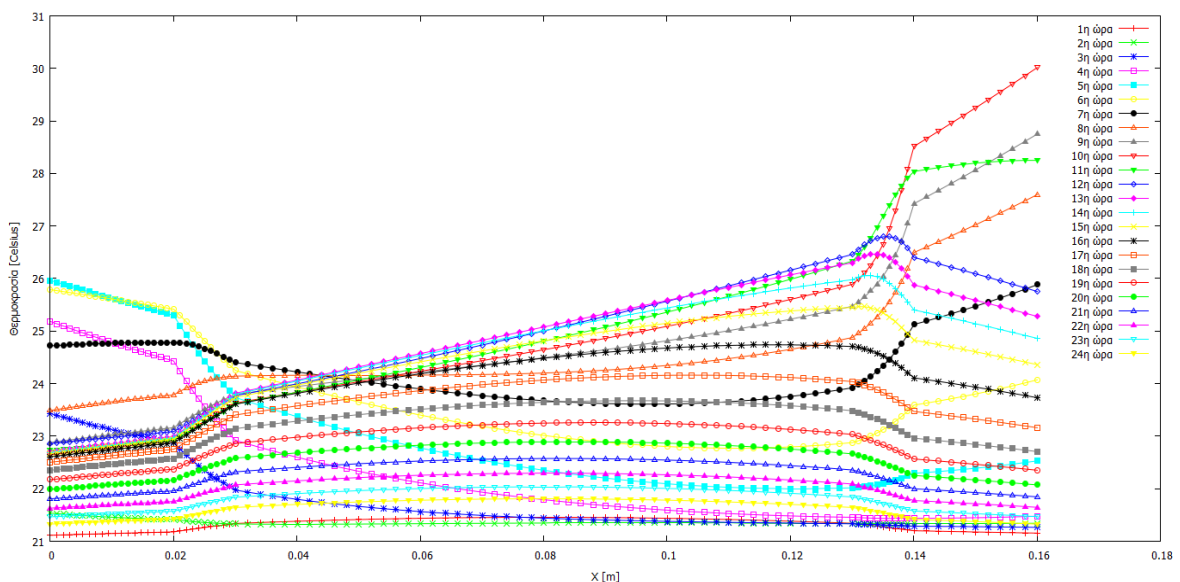
**Σχήμα 7.41:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.

**Δυτικό PCM**

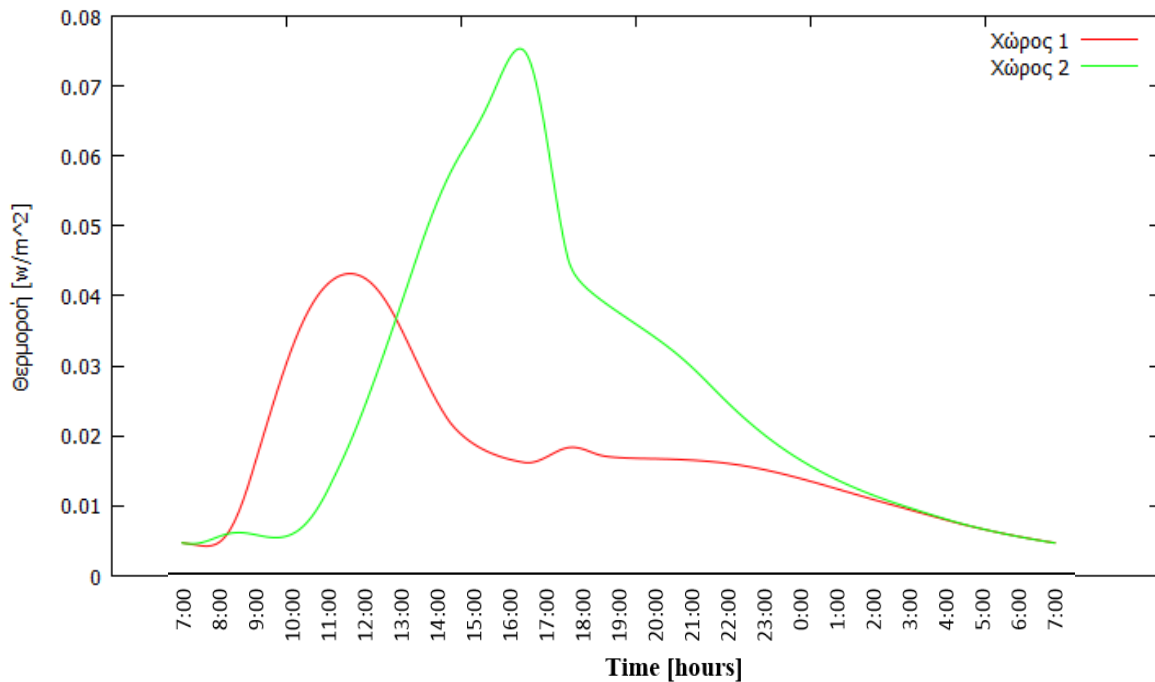
**Σχήμα 7.42:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.



**Σχήμα 7.43:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-10 σοβάς, 10-30 PCM, 30-80 τούβλο, 80-100 PCM, 100-110 σοβάς).



**Σχήμα 7.44:** Κατανομή της θερμοκρασίας στο τοίχο για το μέσο, κάθε ώρα του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30



**Σχήμα 7.45:** Θερμοροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

### Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

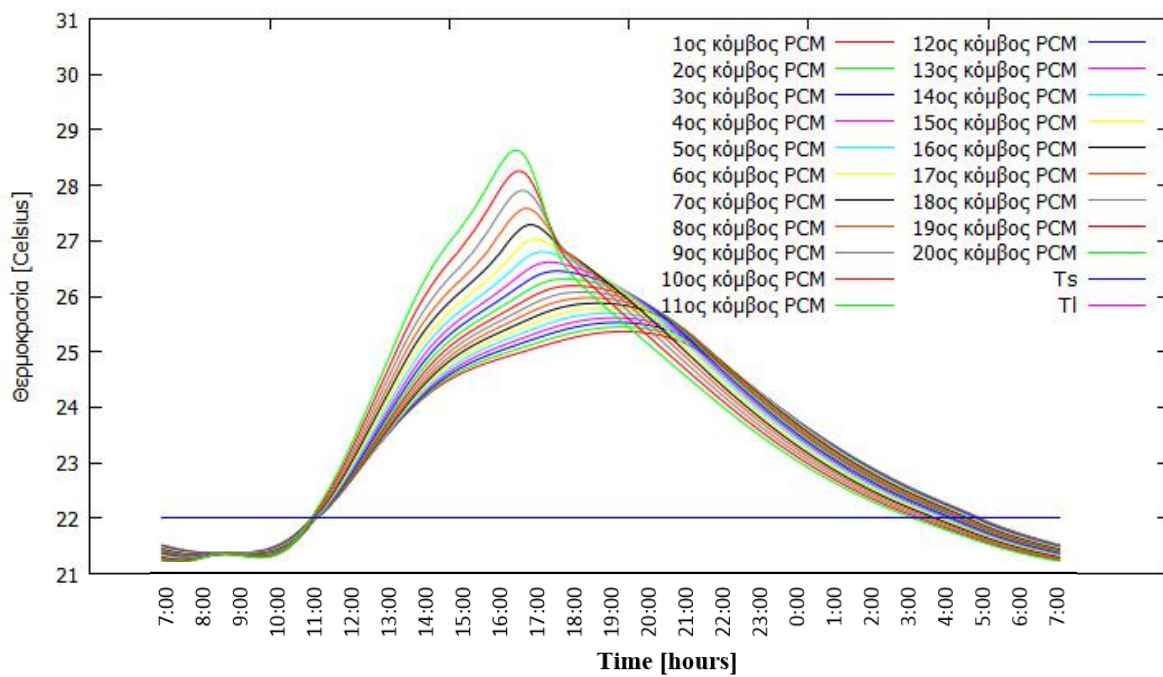
Με 2 εκατοστά πάχους σοβά έναντι του ενός εκατοστού της προηγούμενης περίπτωσης, η αξιοποίηση του PCM είναι ξεκάθαρα μικρότερη από το νότια προσανατολισμένο τοίχο.

### Χρήση μιας στρώσης PCM στην Δυτική Πλευρά

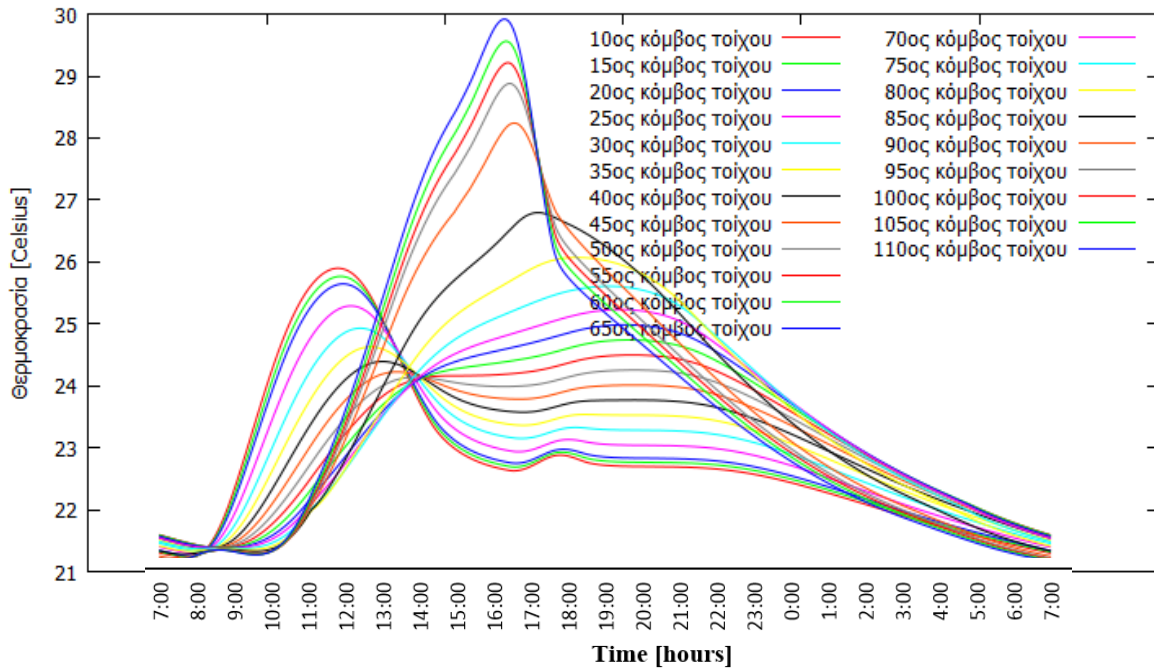
Οι υπολογισμοί γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα με εσωτερικό τοίχο με μια στρώση PCM, κάθετο στην κατεύθυνση του νότου απέναντι από ανατολικό και δυτικό υαλοπίνακα. Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί, αποτελείται αρχίζοντας από την επιφάνεια τη στραμμένη στην ανατολή, από:

Ανατολή

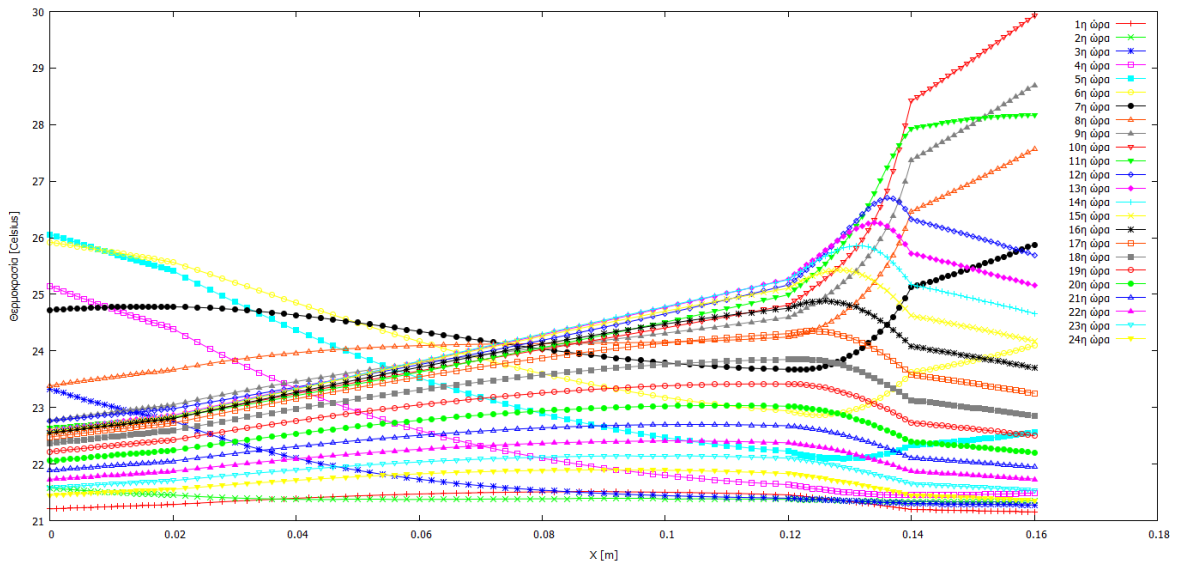
Σοβά [cm]	2
Τούβλο [cm]	10
PCM RT27 [cm]	1
Σοβά [cm]	1
Δύση	



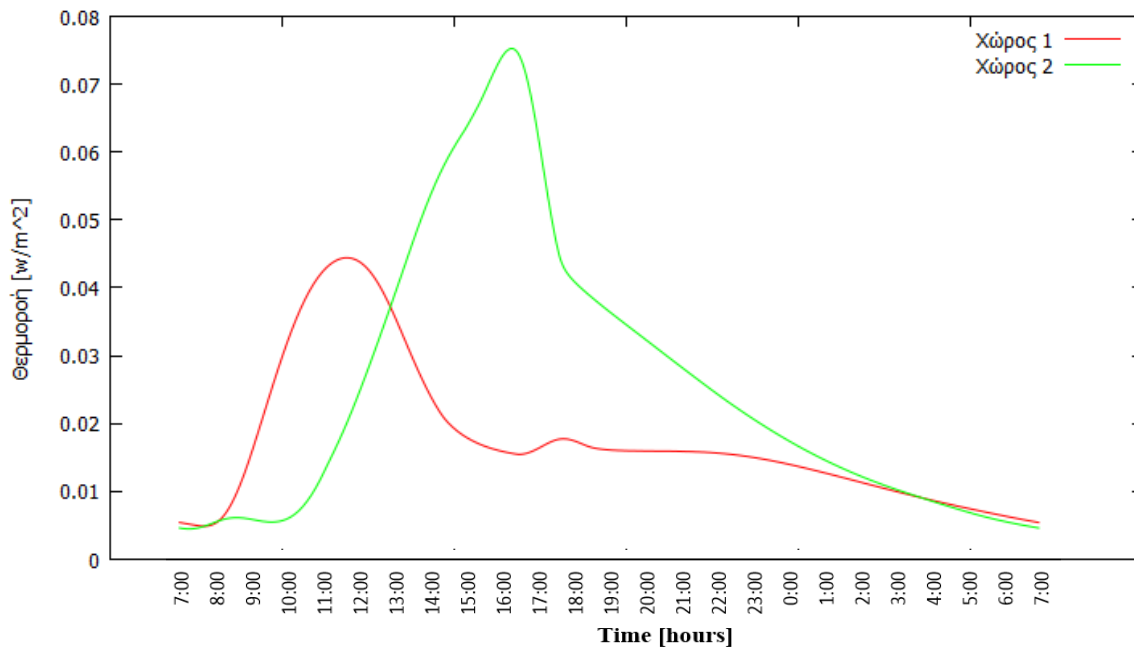
**Σχήμα 7.46:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.



**Σχήμα 7.47:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-80 τούβλο, 80-100 PCM, 100-120 σοβάς).



**Σχήμα 7.48:** Κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για το μέσο, κάθε ώρα του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30



**Σχήμα 7.49:** Θερμοροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

#### Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

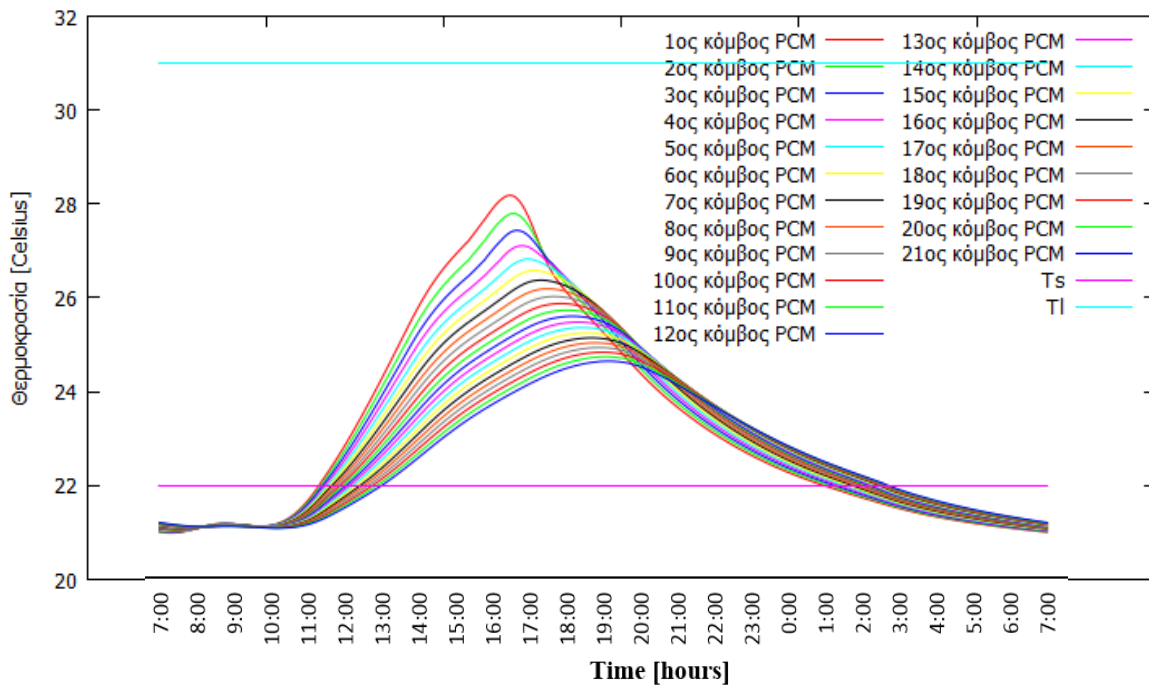
Η περίπτωση αυτή δε χρήζει καινούριων παρατηρήσεων και συμπερασμάτων από τις προηγούμενες.

#### 7.4.2.4 Εσωτερικός τοίχος με προσανατολισμό στη Δύση

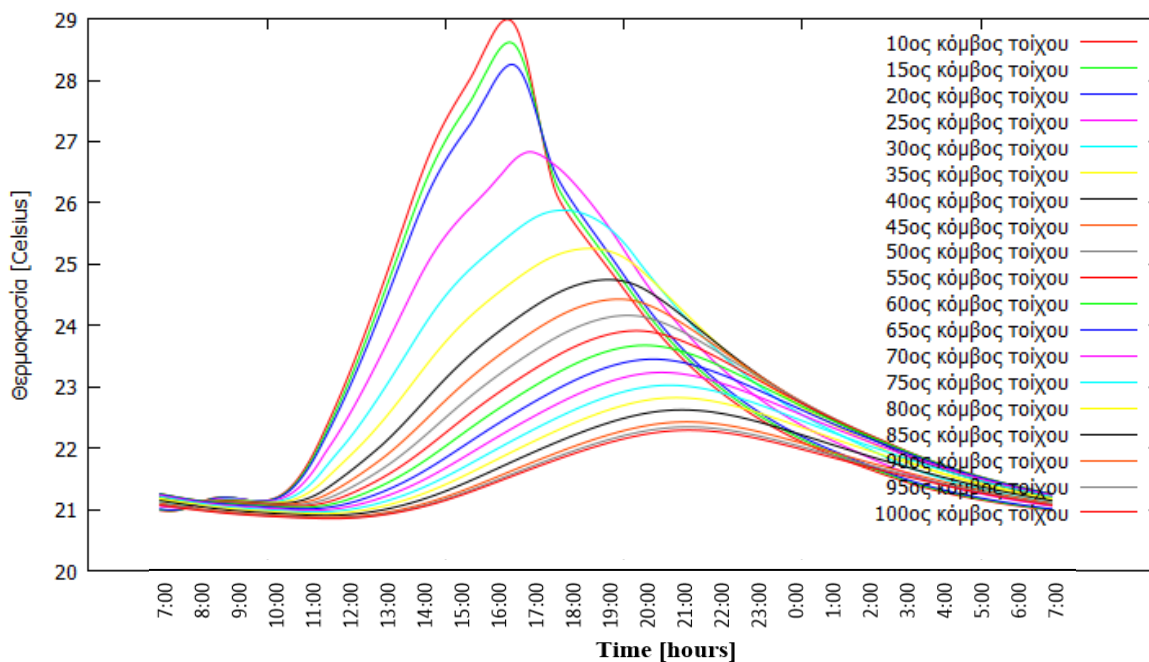
Οι υπολογισμοί γίνονται για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα με εσωτερικό τοίχο με μια στρώση PCM, κάθετο στην κατεύθυνση του νότου απέναντι από δυτικό υαλοπίνακα. Η διατομή του τοίχου που θα μελετηθεί αποτελείται, αρχίζοντας από την επιφάνεια που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, από στρώμα:

##### Δύση

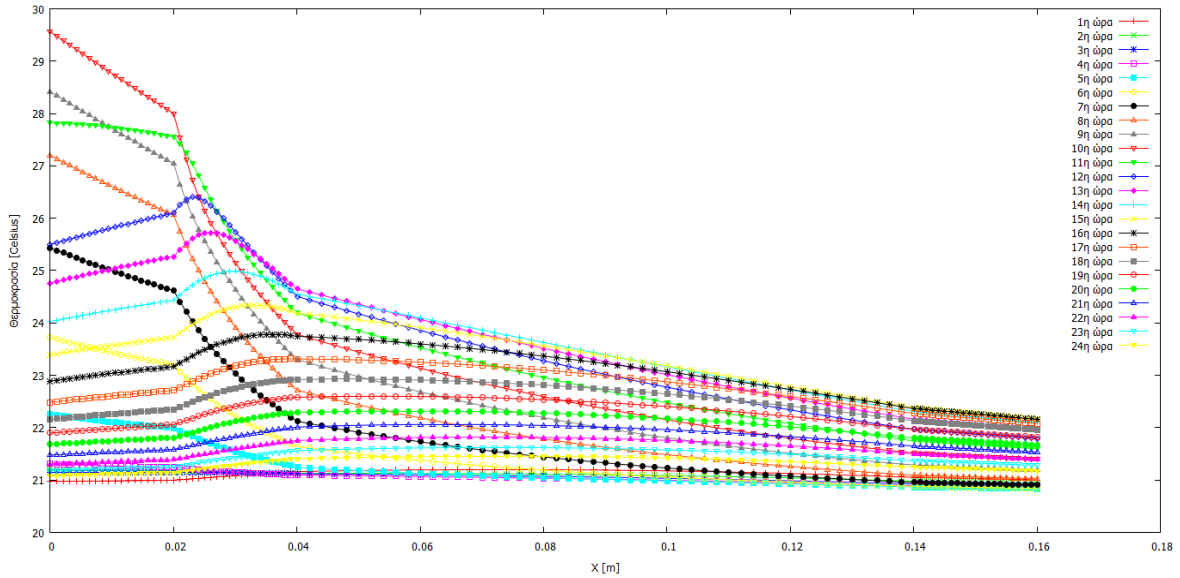
Σοβά [cm]	2
PCM RT27 [cm]	2
Τούβλο [cm]	10
Σοβά [cm]	2



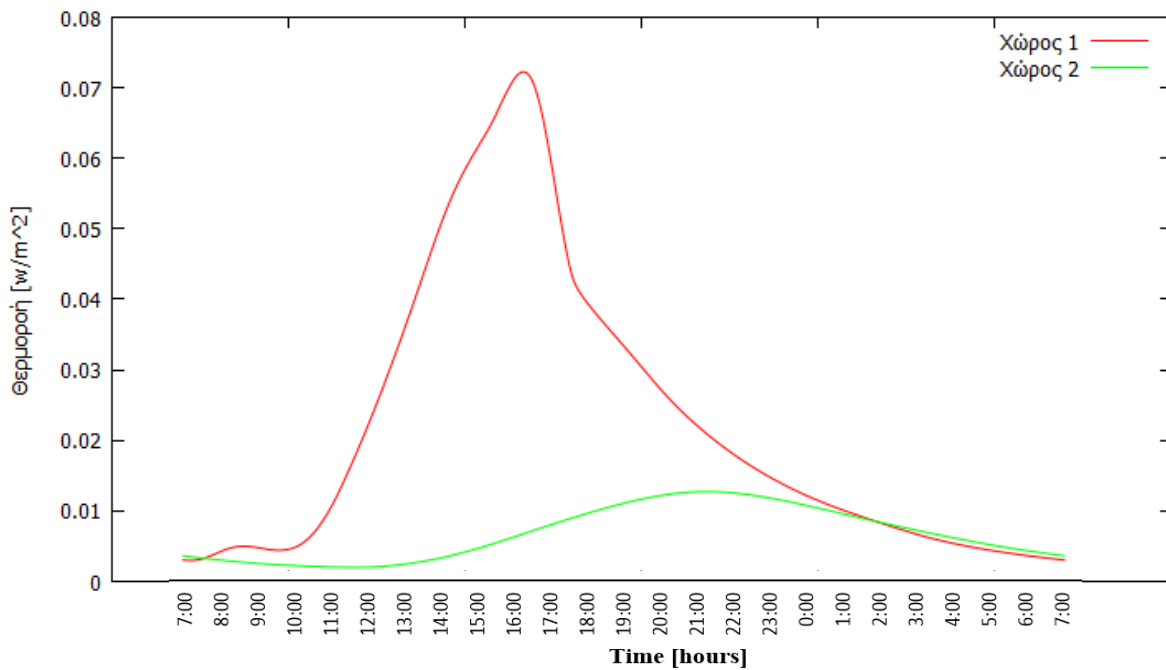
**Σχήμα 7.50:** Η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια του 24ώρου με εμφανή τη θερμοκρασία στερεοποίησης και τήξης.



**Σχήμα 7.51:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας χαρακτηριστικών κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-40 PCM, 40-90 τούβλο, 90-110 σοβάς).



**Σχήμα 7.52:** Κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για το μέσο, κάθε ώρα του 24ώρου με αρχή την ώρα 7:30.



**Σχήμα 7.53:** Θερμορροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.



## Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Η περίπτωση αυτή δε χρήζει καινούριων παρατηρήσεων και συμπερασμάτων από τις προηγούμενες.

Οι περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν, παρουσιάζουν ενδιαφέρον και μπορούν να τεθούν προς βελτιστοποίηση. Όπως ήταν αναμενόμενο όμως ο προσανατολισμένος στο νότο τοίχος παρουσιάζει την καλύτερη θερμική συμπεριφορά για τις συνθήκες που μελετήθηκαν.

### 7.4.3 Βελτιστοποίηση με στόχο την πλήρη αξιοποίηση του PCM

Με τον όρο πλήρη αξιοποίηση του PCM εννοείται η πλήρως εκμετάλλευση του φαινομένου της αλλαγής φάσης του PCM. Η μετάβαση δηλαδή από την πλήρως στερεά κατάσταση στην καθαρά υγρή έχει ως επακόλουθο τη μέγιστη αποθήκευση λανθάνουσας ενέργειας του υλικού. Η υλοποίηση της βελτιστοποίησης θα γίνει με χρήση του λογισμικού EASY v2.0. (Evolutionary Algorithm System) η οποία είναι μια ευέλικτη πλατφόρμα βελτιστοποίησης που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ.

Η βελτιστοποίηση θα γίνει με στόχο την πλήρη αξιοποίηση του PCM. Για το σκοπό αυτό έχουν γίνει κάποιες παραδοχές.

1. Η θερμική αγωγιμότητα του PCM δεν είναι η πραγματική τιμή του, αλλά θα αναζητηθεί η πλησιέστερη αυτή δυνατή στην πραγματική τιμή για τη μέγιστη αξιοποίηση του PCM. Η παραδοχή αυτή δεν είναι καθόλου τυχαία, για το λόγο ότι η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη σε αυτό ξένων υλικών, με την κατάλληλη θερμική αγωγιμότητα.
2. Η πυκνότητα του PCM θεωρείται σταθερή και ίση με αυτή του PCM, πράγμα που στην περίπτωση διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας που εκφράζεται και ως προσθήκη στο μείγμα ξένων σωμάτων δεν ισχύει.
3. Η απορροφητικότητα του τοίχου θα τεθεί και αυτή προς αναζήτηση για το σκοπό αυτό, δεδομένου πάντα ότι μεταβάλλεται στα επιτρεπτά και εφικτά για υλοποίηση όρια.

Επιπλέον το πάχος των στρωμάτων του PCM και του σοβά στην νότια πλευρά του

τοίχου δεν είναι ορισμένα, αντίθετα και αυτά αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού, οι τιμές των οποίων θα προκύψουν ώστε να εξυπηρετούν καλύτερα το στόχο του προβλήματος. Οι τιμές αυτές ακολουθούν πιστά τα πραγματικά δεδομένα.

Συνοψίζοντας για την επίτευξη του προβλήματος τέθηκαν οι εξής μεταβλητές σχεδιασμού με τα όριά τους.

Μεταβλητές σχεδιασμού	Κάτω όριο μεταβλητής σχεδιασμού	Άνω όριο μεταβλητής σχεδιασμού
Πάχος σοβά [cm]	1	2.5
Πάχος PCM [cm]	1	2.5
Θερμική αγωγιμότητα [w/mK]	0.2	2
Απορροφητικότητα επιφάνειας του τοίχου	0.4	0.8

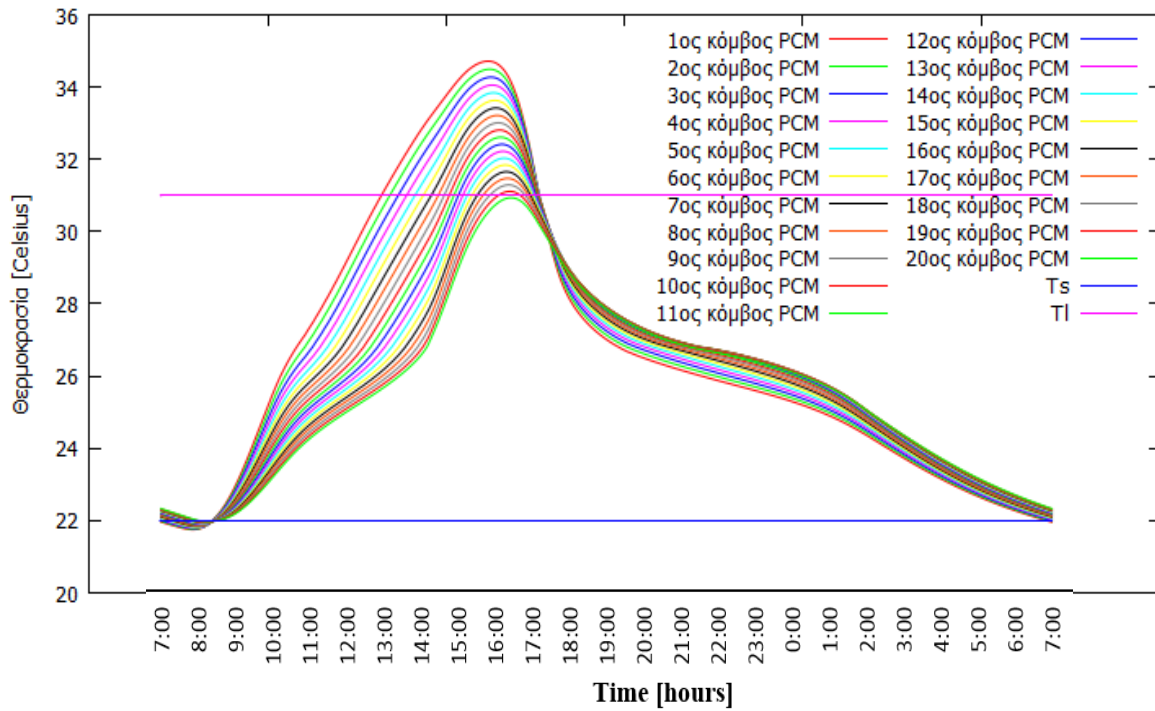
**Πίνακας 7.4:** Μεταβλητές σχεδιασμού με τα όρια τους.

Οι συνθήκες της μέρας που μελετάται είναι η 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Η θερμοκρασία δωματίου επιβάλλεται να είναι κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του PCM ώστε να είναι δυνατός και επιτεύξιμος ο στόχος για πλήρη αξιοποίηση του PCM.

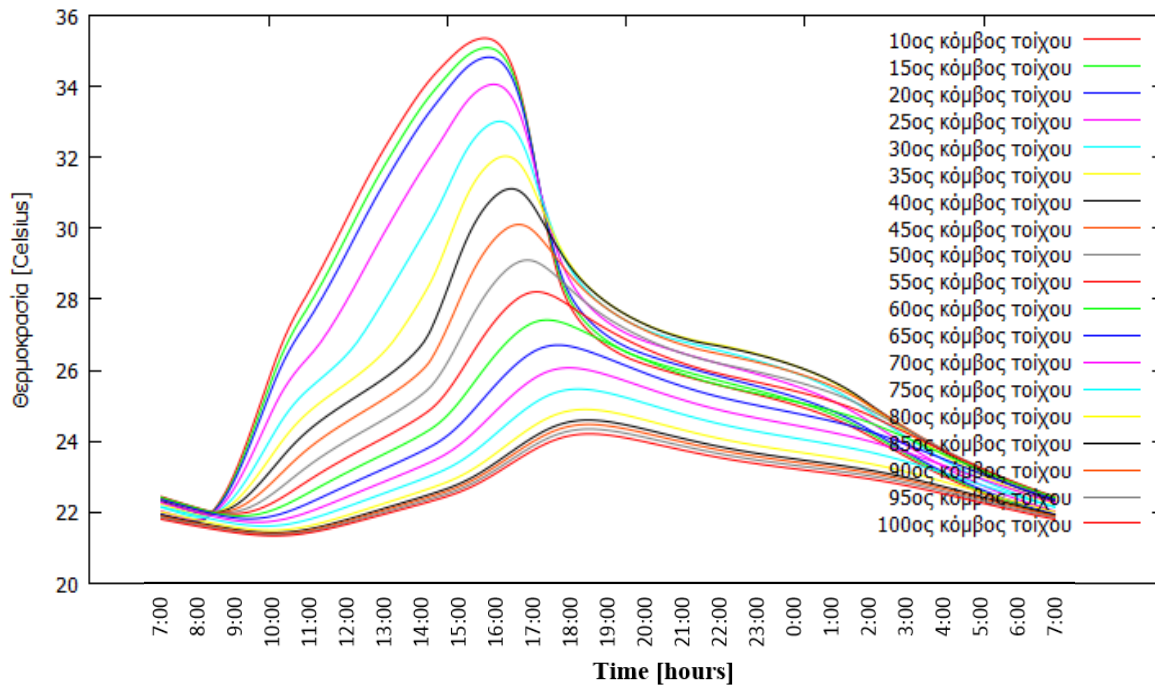
Μετά τη βελτιστοποίηση έχουν βγει τα εξής αποτελέσματα στις τιμές μεταβλητών σχεδιασμού:

Μεταβλητές σχεδιασμού	Τιμές Βελτιστοποίησης
Πάχος σοβά [cm]	1.6
Πάχος PCM [cm]	1.4
Θερμική αγωγιμότητα [w/mK]	0.242
Απορροφητικότητα επιφάνειας του τοίχου	0.684

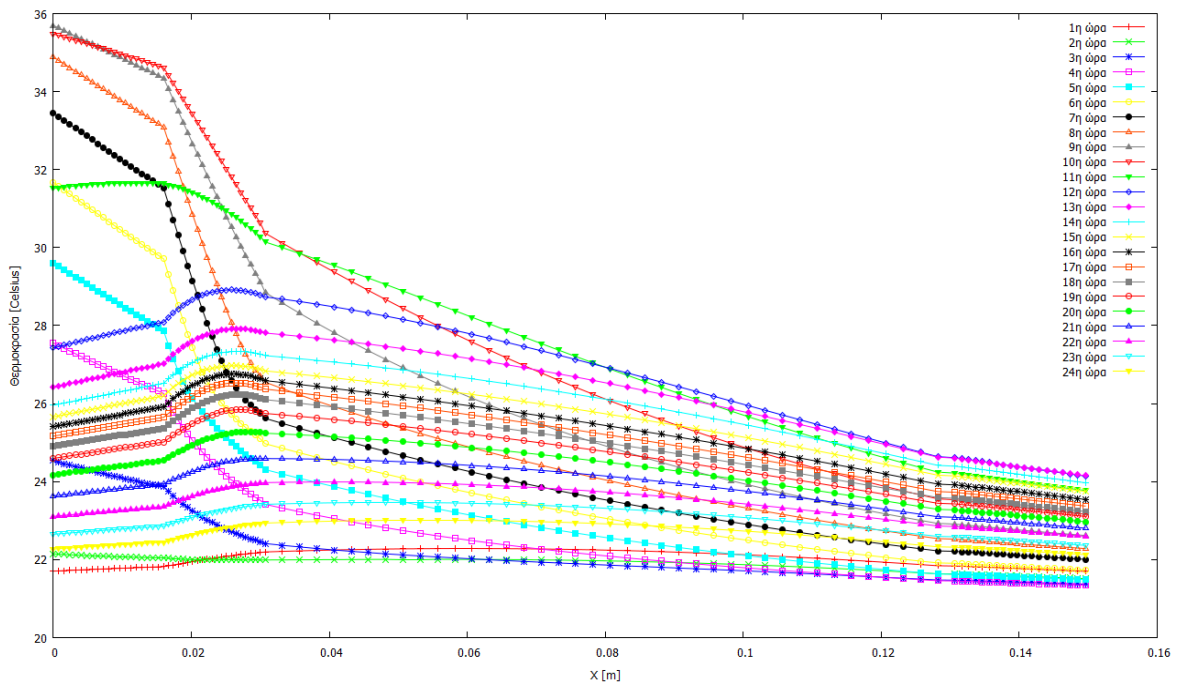
**Πίνακας 7.5:** Μεταβλητές σχεδιασμού μετά τη βελτιστοποίηση.



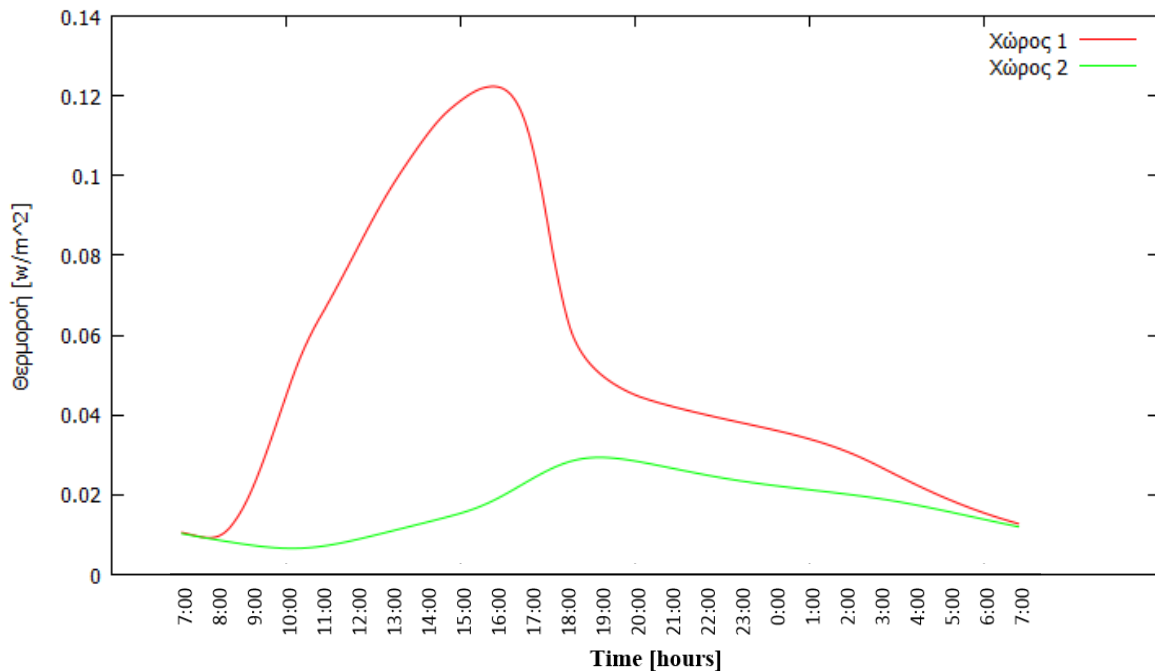
**Σχήμα 7.54:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας κάθε κόμβου του PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας με εμφανή τα όρια θερμοκρασιών στερεάς και υγρής φάσης αντίστοιχα



**Σχήμα 7.55:** Η διακύμανση της θερμοκρασίας κάποιων κόμβων του τοίχου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. ( κόμβοι : 1-20 σοβάς, 20-40 PCM, 40-90 τούβλο, 90-120 σοβάς).



**Σχήμα 7.56:** Η κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για κάθε ώρα του 24ώρου.

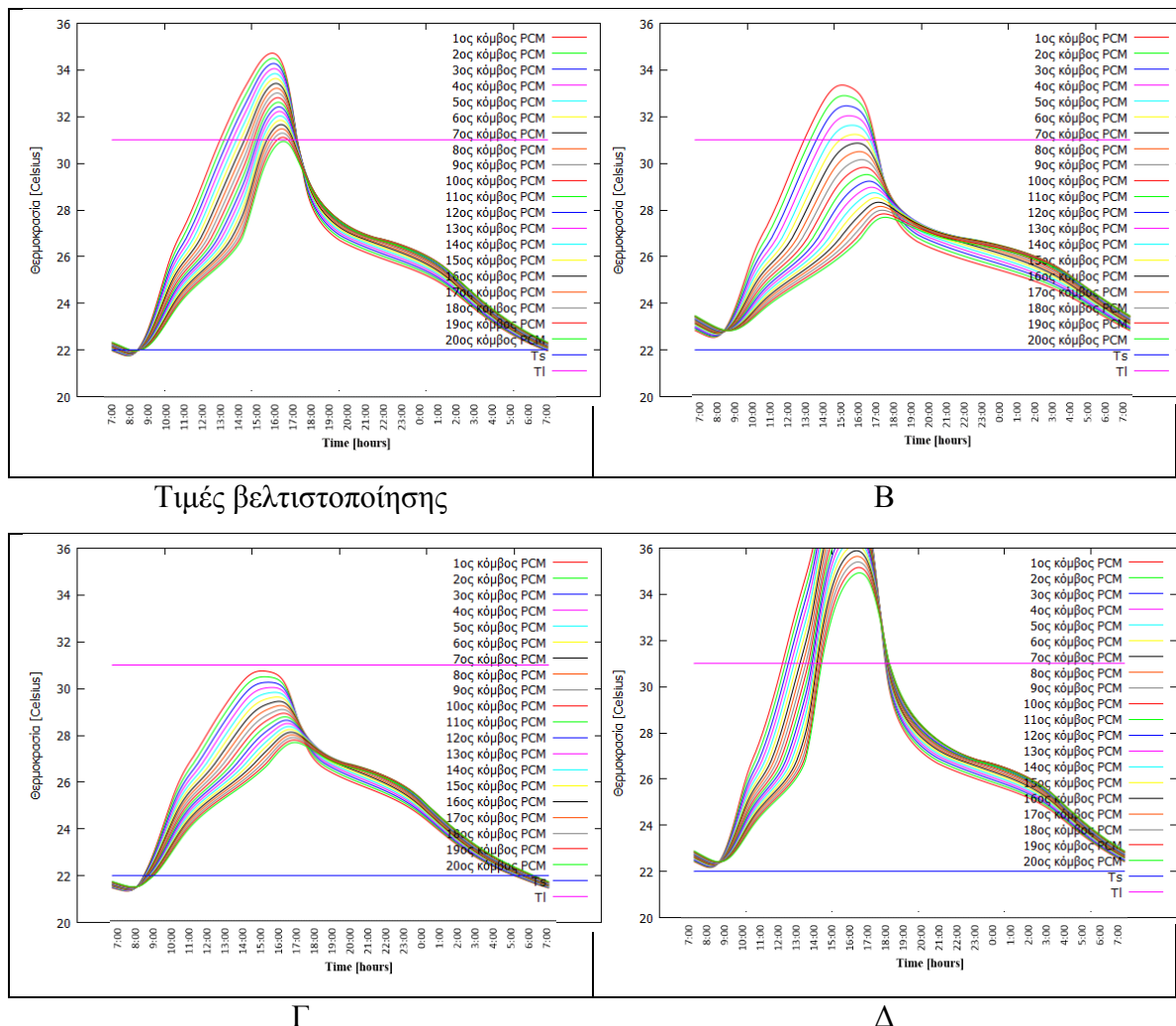


**Σχήμα 7.57:** Θερμορροή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 2 χώρους που συνορεύει ο τοίχος.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της βέλτιστης λύσης με άλλων περιπτώσεων παρατίθεται παρακάτω:

Μεταβλητές σχεδιασμού	Τιμές βελτιστοποίησης	Τιμές υπολογισμού β	Τιμές υπολογισμού γ	Τιμές υπολογισμού δ
Πάχος σοβά [cm]	1.6	2.0	1.6	1.6
Πάχος PCM [cm]	1.4	2.0	1.4	1.4
Θερμική αγωγιμότητα [w/mK]	0.242	0.2	0.242	0.242
Απορροφητικότητα επιφάνειας του τοίχου	0.684	0.684	0.55	0.85

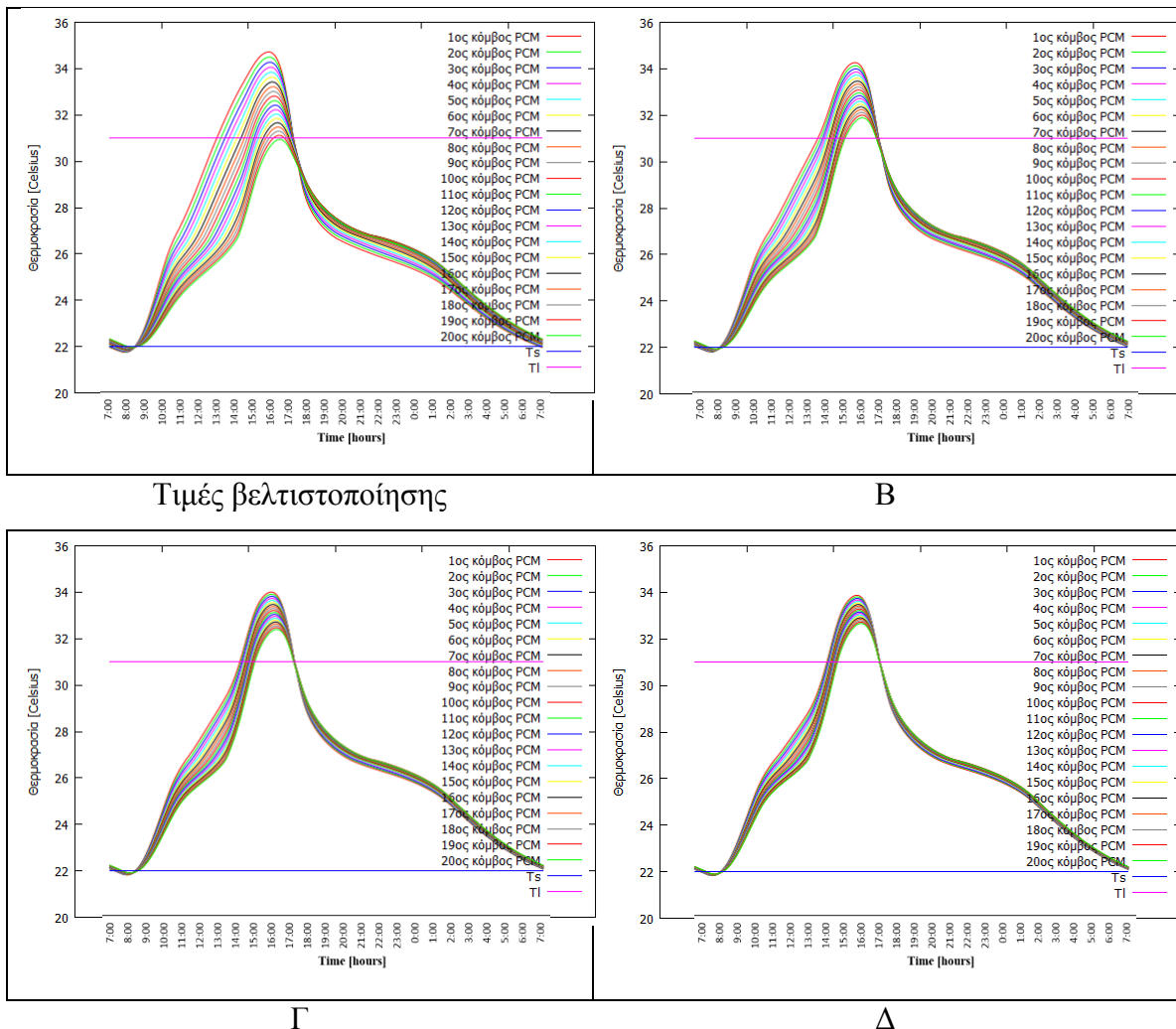
**Πίνακας 7.6:** Μεταβλητές σχεδιασμού βελτιστοποίησης και τριών άλλων παραπλήσιων περιπτώσεων.



**Σχήμα 7.58:** Αποτελέσματα πίνακα 7.6

Μεταβλητές σχεδιασμού	Τιμές βελτιστοποίησης	Τιμές υπολογισμού β	Τιμές υπολογισμού γ	Τιμές υπολογισμού δ
Πάχος σοβά [cm]	1.6	1.6	1.6	1.6
Πάχος PCM [cm]	1.4	1.4	1.4	1.4
Θερμική αγωγιμότητα [w/mK]	0.2	0.4	0.6	0.8
Απορροφητικότητα επιφάνειας του τοίχου	0.684	0.684	0.684	0.684

**Πίνακας 7.7:** Μεταβλητές σχεδιασμού βελτιστοποίησης και τριών άλλων περιπτώσεων με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα.



**Σχήμα 7.59:** Αποτελέσματα πίνακα 7.7

## Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Οι τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού, που προέκυψαν μετά τη βελτιστοποίηση, έδειξαν όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.54, την επίτευξη του στόχου που τέθηκε. Στο σχήμα αυτό είναι φανερό πως όλοι οι κόμβοι του PCM περνάνε από τη στερεά στην υγρή περιοχή και αντίστροφα. Αυτό πρακτικά ισοδυναμεί με μέγιστη αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας αλλαγής φάσης από τη στερεά κατάσταση στην υγρή. Οι τιμές των παραμέτρων που τέθηκαν προς βελτιστοποίηση έδειξαν, για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου, την ανάγκη μείωσης του πάχους στρώματος του σοβά και του PCM και την αύξηση του συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας. Η θερμική αγωγιμότητα, με στόχο την όσο το δυνατό μικρότερη μεταβολή της, προέκυψε να έχει αυξηθεί πολύ λιγότερο από όσο αναμενόταν, σε επίπεδα τα οποία δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Το μικρότερο πάχος σοβά τοποθετεί το στρώμα PCM πιο κοντά στη επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία, και άρα σε επαφή με κόμβο υψηλότερης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης. Αυτό δίνει την ευκαιρία τόσο για επαρκή φόρτιση όσο και για αποφόρτιση. Το μικρότερο δε πάχος PCM δίνει την δυνατότητα και στο τελευταίο κόμβο του PCM να αποκτήσει θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία τήξης. Τέλος, ο συντελεστής ηλιακής απορροφητικότητας είναι τέτοιος, ώστε η θερμοκρασία του PCM, μεταβάλλεται από τη θερμοκρασία στερεοποίησης μέχρι τη θερμοκρασία τήξης και όχι κάπου ενδιάμεσα. Στο σχήμα 7.58 παριστάνεται η συμπεριφορά του στρώματος PCM με τις βέλτιστες τιμές που έχουν βρεθεί σε σύγκριση με τις τιμές των περιπτώσεων Β, Γ και Δ του πίνακα 7.6. Οι τιμές της περίπτωσης Β είναι ίδιες με τις βέλτιστες τιμές, εκτός από τα πάχη σοβά και PCM που τίθενται ίσα με τις τιμές πριν από τη βελτιστοποίηση. Στις περιπτώσεις Γ και Δ το μόνο που αλλάζει από τις βέλτιστες τιμές είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας, που τίθεται ίσος με 0.55 και 0.85 αντίστοιχα. Η σύγκριση έδειξε για την περίπτωση Β πως κανένας κόμβος δεν περνάει στην στερεά φάση και μόνο μερικοί καταφέρνουν να περάσουν στην υγρή φάση. Για τη περίπτωση Γ, το PCM περνάει μόνο από τη στερεά στη διφασική περιοχή ενώ στη περίπτωση Δ το PCM περνάει από τη διφασική στην υγρή περιοχή. Αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει και το σχήμα 7.59 όπου συγκρίνονται οι βέλτιστες τιμές, όταν μεταβάλλεται ανοδικά μόνο η θερμική αγωγιμότητα του PCM. Η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM του προσδίδει μεγαλύτερη αποθηκευτική δύναμη. Με σταθερή θερμοκρασία δωματίου κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης



του PCM, η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας μετατοπίζει μόνο τη μέγιστη θερμοκρασία του PCM προς τα πάνω. Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να βοηθήσει στην προσπάθεια μετάβασης PCM στην υγρή περιοχή κάτω από δεδομένες συνθήκες και διαστάσεις, κρατώντας σχεδόν σταθερή την κατώτατη θερμοκρασία του.





## Βιβλιογραφία 7<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

1. Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο, Αθήνα, 2011
2. Dorota A. Chwieduk "Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries", Energy 59 301-313, (2013)