



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ
ΝΗΣΙΔΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΜΒΛΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΥ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΨΥΧΡΑ
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΔΡΟΣΙΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ**

ΒΑΛΙΜΗΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
1064506

Επιβλέπουσα:
Μιχαλακάκου Παναγιώτα, Καθηγήτρια

Σπουδαστική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, Ιούνιος 2023

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Βαλιμήτης Δημήτριος

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος
ii

© 2023 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της σπουδαστικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμών του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας και των μεθόδων άμβλυνσης αυτού με έμφαση στα ψυχρά υλικά και τον παθητικό δροσισμό κτιρίων

Βαλιμήτης Δημήτριος

Τις τελευταίες δεκαετίες η έκταση της κλιματικής αλλαγής γίνεται ξεκάθαρη στην άνοδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Η κλιματική αλλαγή συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ), όπου στις αστικές περιοχές παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα σε συνδυασμό με αυτήν από την κλιματική αλλαγή. Δεδομένης της αύξησης της θερμικής δυσφορίας, τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους, υπάρχει μια τάση αύξησης της χρήσης ενεργητικών τρόπων δροσισμού κτιρίων. Έτσι αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας τους καλοκαιρινούς μήνες καθώς και προστίθεται περισσότερη θερμότητα στο ήδη θερμικά κορεσμένο αστικό περιβάλλον. Επομένως, οι κύριοι μηχανισμοί της ΑΘΝ πρέπει να μελετηθούν και να τεκμηριωθούν, μελετώντας την κατάλληλη βιβλιογραφία. Οι πιο διαδεδομένοι είναι η αστικοποίηση, ο ανεπαρκής πολεοδομικός σχεδιασμός και η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας στις αστικές περιοχές. Το επόμενο βήμα είναι η μελέτη και η τεκμηρίωση των στρατηγικών άμβλυνσης του φαινομένου ΥΗΙ, τόσο στις τρέχουσες όσο και μελλοντικές αστικές κατασκευές. Αυτά μπορεί να είναι η αύξηση της πράσινης βλάστησης, η αύξηση της παρουσίας νερού και η χρήση καινοτόμων υλικών και πρακτικών στον αστικό σχεδιασμό. Η χρήση ψυχρών υλικών σε στέγες και πεζοδρόμια μπορεί να μειώσει σημαντικά την επιφανειακή θερμοκρασία. Ενώ η χρήση της παθητικής ψύξης των κτιρίων με τη χρήση νυχτερινών και ημερήσιων ψυκτών ακτινοβολίας είναι αρκετά υποσχόμενος.

Λέξεις Κλειδιά

Αστική Θερμική Νησίδα (ΑΘΝ), κλιματική αλλαγή, μέθοδοι άμβλυνσης της ΑΘΝ, ψυχρά υλικά, ψυχρές οροφές, παθητικός δροσισμός κτιρίων

ABSTRACT

**A Literature review on the urban heat island effect and mitigation strategies
mainly focused on cool materials and passive cooling of buildings****Valimitis Dimitrios**

Over the last decades the effect of climate change can be seen in the rising global temperatures. Climate change is a big contributor to the urban heat island (UHI) phenomenon, where in urban areas there is an air temperature increase in conjunction with the one from climate change. Given the severe thermal discomfort, both indoors and outdoors, due to this phenomenon there is a trend of increasing the use of active cooling of buildings using ventilation and air-conditioning. This creates a two-fold problem, it increases energy consumption in the summer months as well as it adds more heat to the already saturated urban environment. Thus the main mechanisms of the UHI need to be studied and documented, this can be done by studying the appropriate literature. The most prevalent causes of UHI are urbanisation, inadequate urban planning and ever increasing energy consumption in urban areas. The next step is to study and document the mitigation strategies of the UHI phenomenon, both current and prospect. These can be increasing green vegetation , increasing water presence and using innovative cool materials and practices in urban design. The use of cool material in roofs and pavements can reduce the surface temperature significantly, thus offsetting the heating effect of conventional ones (which is one of the main contributors to UHI). While the use of passive cooling of buildings using nocturnal and diurnal radiators has also shown promising results.

Keywords

Urban heat island effect (UHI), climate change, UHI mitigation strategies, cool materials, cool roofs, passive cooling of buildings

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΨΑ [55]	30
---	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΕΙΚΟΝΩΝ

ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 1.ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΉ ΜΈΣΑ ΚΑΙ ΓΥΡΩ ΑΠΌ ΜΙΑ ΑΣΤΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΝΗΣΪΔΑ [2].	4
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΉ ΑΠΕΙΚΌΝΙΣΗ ΠΑΡΑΓΌΝΤΩΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΪΑΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΈΝΟΥ ΤΗΣ ΑΘΝ [13].	6
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΧΡΉΣΗΣ ΨΥΧΡΏΝ ΥΛΙΚΏΝ [27].	14
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 4. ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΪ ΤΥΠΟΙ ΥΛΙΚΏΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΉΣ ΟΡΟΦΏΝ (ΓΕΝΈΕΣ).	16
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 5. ΦΩΤΟΓΡΑΦΪΕΣ ΣΤΟ ΟΡΑΤΟ (Α) ΚΑΙ ΣΤΟ ΥΠΈΡΥΘΡΟ (Β) ΦΆΣΜΑ ΓΙΑ 4 ΕΠΙΛΕΓΜΈΝΕΣ ΕΠΙΚΑΛΨΕΙΣ ΑΠΟ ΤΙΣ 15 ΣΥΝΟΛΙΚΆ.	18
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 6. ΤΡΌΠΟΙ ΠΑΘΗΤΙΚΌΥ ΔΡΟΣΙΣΜΌΥ ΚΤΙΡΪΩΝ ΜΈΣΩ ΦΥΣΙΚΏΝ ΔΙΕΡΓΑΣΪΩΝ.	24
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΉ ΑΠΕΙΚΌΝΙΣΗ ΕΝΌΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΈΡΑ-ΕΔΆΦΟΥΣ (1). ΔΪΆΦΟΡΕΣ ΓΕΩΜΤΕΡΪΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΆΞΕΙΣ ΣΩΛΗΝΏΝ ΣΤΟ ΈΔΑΦΟΣ (2) [52].	26
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 8, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΉ ΑΠΕΙΚΌΝΙΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΈΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΆΣ ΘΕΡΜΌΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΉ ΕΠΪΦΆΝΕΙΑ.	29
ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ 9. ΣΧΗΜΑΤΙΚΉ ΑΝΑΠΑΡΆΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΑΛΨΗΣ ΦΩΤΟΝΙΚΉΣ ΝΑΝΟΔΟΜΪΗΣ ΚΑΙ Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΉ ΔΪΆΤΑΞΗ ΑΥΤΉΣ [40]	32

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΕΙΚΟΝΩΝ	xiv
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
A.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	3
A.1 Η Αστική θερμική νησίδα (ΑΘΝ)	3
A.1.1 Ορισμός και διαχρονική σημασία	3
A.1.2 Παράγοντες δημιουργίας του φαινομένου της ΑΘΝ	6
A.1.2.1 Αστικοποίηση, Αστική Εξάπλωση & Υπερπληθυσμός	7
A.1.2.2 Αστικός σχεδιασμός	8
A.1.2.3 Αύξηση των ενεργειακών αναγκών θέρμανσης και ψύξης	9
A.1.3 Μέθοδοι άμβλυνσης του φαινομένου της ΑΘΝ	9
A.1.3.1 Βλάστηση	9
A.1.3.2 Σκίαση λόγω δέντρων	10
A.1.3.3 Διαπερατά υλικά	10
A.1.3.4 Υδάτινες επιφάνειες	10
A.1.3.5 Πράσινες οροφές-Χρήση ψυχρών υλικών.	11
A.2 Ψυχρά υλικά	13
A.2.1 Ψυχρές οροφές	15
A.2.2 Ψυχρές επικαλύψεις	18
A.3 Παθητικός δροσισμός κτιρίων	21
A.3.1 Πλεονεκτήματα παθητικού δροσισμού κτιρίων	22
A.3.2 Μέθοδοι παθητικού δροσισμού κτιρίων	23
A.3.3 Παθητικός δροσισμός κτιρίων με χρήση εναλλακτών θερμότητας αέρα-εδάφους	26
A.3.4 Παθητικός δροσισμός κτιρίων με χρήση ψυκτών ακτινοβολίας	27
A.4 Παθητικός δροσισμός κτιρίων με χρήση ψυκτών ακτινοβολίας- εφαρμογές σε κτίρια	29
A.4.1 Νυκτερινοί ψύκτες ακτινοβολίας	29
A.4.2 Ημερήσιοι ψύκτες ακτινοβολίας	31
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών	
Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος	
xvi	

A.5 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	33
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	35

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την καθηγήτρια Μιχαλακάκου Παναγιώτα του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών για την υποστήριξη της στην εκπόνηση της εργασίας ,ως επιβλέπουσα αυτής.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου και την οικογένειά μου , που με στήριξαν ηθικά, συναισθηματικά και οικονομικά τόσο κατά την εκπόνηση της εργασίας όσο και κατά τα πέντε χρόνια των σπουδών μου στην Πάτρα.

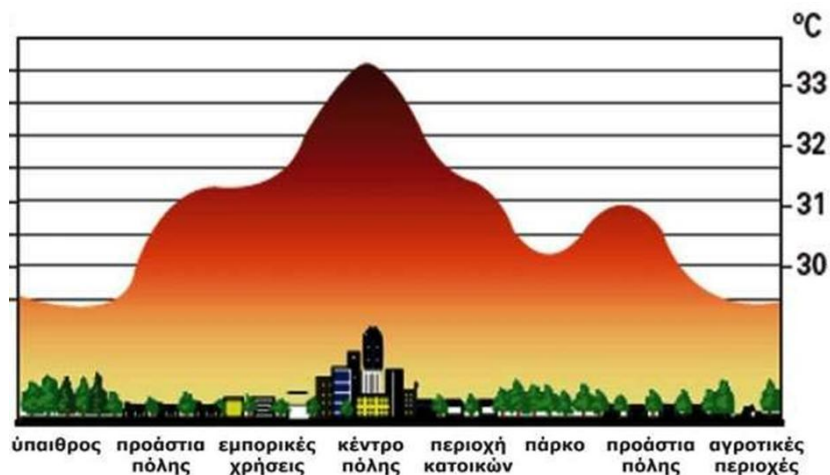
Α.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Α.1 Η Αστική θερμική νησίδα (ΑΘΝ)

Α.1.1 Ορισμός και διαχρονική σημασία

Ήδη από το 1820 οι σύγχρονοι της εποχής επιστήμονες, που μελετούσαν το αστικό περιβάλλον, είχαν παρατηρήσει την διαφορετική συγκριτικά θερμοκρασία μεταξύ ενός αστικού κέντρου και της εξοχής. Όπως αναφέρει ο Luke Howard : «η νύχτα είναι 3.7 βαθμούς πιο ζεστή ενώ η μέρα 0.34 πιο ψυχρή στο Λονδίνο, από ότι στην εξοχή». Σύμφωνα με τον Landsberg [1] είναι μια από τις πρώτες αναγνωρίσεις του φαινομένου που ύστερα θα ονομαστεί Αστική Θερμική Νησίδα (ΑΘΝ), ήτοι στα αγγλικά Urban Heat Island (UHI). Ο Howard, όπως και αρκετοί μετά από αυτόν θα αποδώσει το φαινόμενο στην εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων, χωρίς όμως να γίνεται συστηματική προσπάθεια συστηματικής καταγραφής δεδομένων αλλά ούτε και επεξήγησης του φαινομένου ως προς την μεταφορά θερμότητας. Θα περάσουν εκατοντάδες ακόμα χρόνια, όταν και έπειτα από το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου η μαζική αστικοποίηση σε συνδυασμό με την εκθετική αύξηση της βιομηχανίας θα οδηγήσει σε πληθώρα ερευνών για το μικρο-κλίμα των αστικών περιοχών. Η ανάγκη για τέτοιου τύπου έρευνες ήταν άμεση, καθώς μαζί με την αύξηση του πληθυσμού και της βιομηχανικής παραγωγής επήλθαν ραγδαίες αυξήσεις στα αερολύματα, δυσχερής ορατότητα καθώς και άλλες σοβαρές περιβαλλοντικές μεταβολές [1].

Ως αστική θερμική νησίδα (ΑΘΝ), λοιπόν θεωρείται το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσα σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές είναι υψηλότερη από αυτήν μη αστικών περιοχών (Διάγραμμα 1), που βρίσκονται γεωγραφικά κοντά σε αυτές [2]. Αυτό έχει ως επίδραση τις διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των δύο , δηλαδή οι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας τους καλοκαιρινούς μήνες και την μείωση της τους χειμερινούς. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε κάθε αστική περιοχή (ασχέτως μεγέθους) [[1], [3]].ενώ αν και οι παράγοντες που την υποκινούν είναι πάρα πολλοί, θεωρείται ως μια από τις πιο έντονες εκδηλώσεις της αστικοποίησης [[2],[3]]



Διάγραμμα 1.Θερμοκρασιακή κατανομή μέσα και γύρω από μια αστική θερμική νησίδα [2].

Η συνηθισμένη έκφραση της ΑΘΝ, η οποία ονομάζεται ένταση της ΑΘΝ(urban heat island intensity), σε όρους θερμοκρασιακής διαφοράς αστικής με την περιαστικής ζώνης είναι θετική, ήτοι υψηλότερη θερμοκρασία της αστικής απ' ότι η περιαστική. Έχουν παρατηρηθεί βέβαια και αρνητικές θερμοκρασιακές διαφορές με το φαινόμενο να ονομάζεται εκ νέου σε Αστική Ψυχρή Νησίδα(ΑΨΝ-cool island) [[4]-[13]].

Το ισοζύγιο ενέργειας για μια επίπεδη, οριζόντια και ομογενή επιφάνεια συνδυάζοντας και την ανθρωπογενή θέρμανση προτείνεται ως [[12],[13]]:

$$a_s Q + a_s q + a_L L + Q_F = \varepsilon \sigma T_0^4 + h_c(T_0 - T_A) + k \frac{dT_0}{dz} \Big|_{z=0} + \lambda E \quad \# [1]$$

Όπου: a_s, a_L : είναι οι συντελεστές απορρόφησης για μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία αντίστοιχα.

Q, q : εκφράζουν την ροή θερμότητας από άμεση και έμμεση ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος σε W/m^2 .

L : εκφράζει την ροή θερμότητας από ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος σε W/m^2 .

Q_F : είναι η ροή ανθρωπογενούς θερμότητας σε W/m^2 .

ε : είναι η ικανότητα εκπομπής

σ : είναι η σταθερά του Boltzmann ($1,380649 \cdot 10^{-23}$) σε J/K

T_0, T_A : είναι η θερμοκρασία εδάφους και αέρα αντίστοιχα σε K

h_C : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή για την ροή θερμότητας προς το περιβάλλον σε W/m²K

k : είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε W/mK

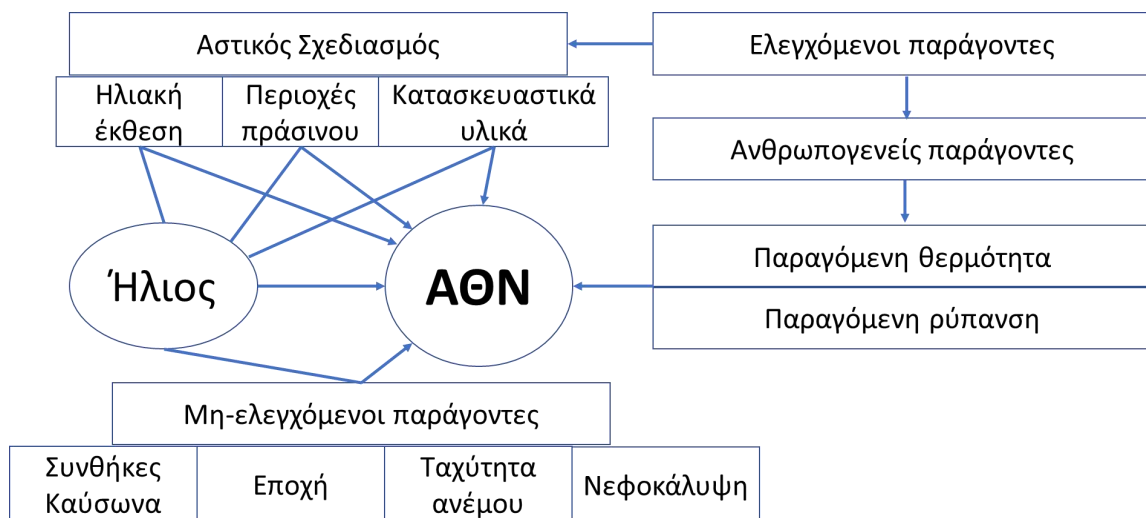
λ : είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε KJ/Kg

E : είναι ο ρυθμός εξάτμισης σε Kg/sm²K

Κοιτώντας την εξίσωση [1] από τα αριστερά προς τα δεξιά οι δύο πρώτοι όροι αντιπροσωπεύουν την θερμότητα που απορροφά η επιφάνεια λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, ο τρίτος κατά σειρά όρος αυτήν λόγω της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και τέλος ο τέταρτος όρος εκφράζει την συνολική ανθρωπογενής ροή θερμότητας προς την επιφάνεια. Στο δεξί μέλος της εξίσωσης ο πρώτος όρος εκφράζει την ροή θερμότητας από την επιφάνεια λόγω ακτινοβολίας, ο δεύτερος την ροή θερμότητας λόγω συναγωγής με τον αέρα του περιβάλλοντος, ο τρίτος την αγωγή από την επιφάνεια στο εσωτερικό της (ήτοι η μεταβλητή z εκφράζει το βάθος) και ο τελευταίος την λανθάνουσα ροή θερμότητας λόγω εξατμισοδιαπνοής.

A.1.2 Παράγοντες δημιουργίας του φαινομένου της ΑΘΝ

Η ΑΘΝ είναι το από κοινού αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, οι οποίοι αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Ένας γενικευμένος διαχωρισμός μπορεί να γίνει στους παράγοντες που μπορούν να ελεγχθούν και σε εκείνους που δεν μπορούν (Διάγραμμα 2). Αυτή η κατηγοριοποίηση είναι πολύ χρήσιμη για την μελέτη τόσο των παραγόντων δημιουργίας, αλλά κυρίως για την προσπάθεια άμβλυνσης ή και ακόμα εξάλειψης του φαινομένου της ΑΘΝ στις πληγείσες περιοχές. Ακόμα μια υποκατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει είναι στον παροδικό ή μη χαρακτήρα του κάθε παράγοντα. Στην πρώτη αυτή κατηγορία μπορούν να ενταχθούν η ταχύτητα του αέρα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η πυκνότητα της νέφωσης κ.ο.κ. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν παράγοντες όπως η ύπαρξη (ή μη) περιοχών πρασίνου, τα διάφορα κατασκευαστικά-δομικά υλικά, η γεωμετρία της αστικής περιοχής κ.ο.κ. [14].



Διάγραμμα 2. Διαγραμματική απεικόνιση παραγόντων δημιουργίας του φαινομένου της ΑΘΝ [13].

Σχεδόν όλη η θερμότητα που παράγεται από πηγές που οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες εισέρχεται στο περιβάλλον άμεσα και στιγμιαία. Αντίθετα, η θέρμανση λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, προσφέρει μικρότερα ποσά θερμότητας σε πιο μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το υπόλοιπο απορροφάται από τις περίπλοκες αστικές κατασκευές και προκαλεί

έμμεση θέρμανση. Οι δομές που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, τοίχοι, αρδευόμενοι κήποι, μη-αρδευόμενοι χώροι πρασίνου, πεζοδρόμια κ.α. απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία σε διαφορετικά μεγέθη. Αυτή η συνεχή απορρόφηση εκκινεί το πρωί και έχει διάρκεια έως νωρίς το απόγευμα. Έπειτα ο ήλιος αρχίζει να δύει και η αποθηκευμένη πλέον ενέργεια αρχίζει να ελευθερώνεται στο περιβάλλον. Η μέθοδος και η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται στις αστικές αυτές δομές εξαρτάται από ελεγχόμενους παράγοντες, όπως είναι τα υλικά οικοδομής και η ηλιακή έκθεση. Σε μια τυπική αστική περιοχή, γιγαντιαίες δομές τοποθετούνται σε μια σχετικά μικρή περιοχή και δέχονται μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας[15].

A.1.2.1 Αστικοποίηση, Αστική Εξάπλωση & Υπερπληθυσμός

Το κύριο αίτιο της ΑΘΝ είναι η Αστικοποίηση [16]. Η συνεχής αύξηση σε επιφάνειες που απορροφούν θερμότητα σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη μείωση της φυσικής βλάστησης και την ιδιαίτερη γεωμετρία των αστικών περιοχών είναι οι κύριοι παράγοντες που συνεισφέρουν στην ΑΘΝ. Σε μια έρευνα για διάφορα δομικά υλικά πεζοδρομίων, βρέθηκε ότι η θερμοκρασία της τυπικής ασφάλτου μπορεί να είναι μέχρι και 20 °C πιο υψηλή από εκείνη του γρασιδιού[17]. Η αστική εξάπλωση συνεπάγεται την μείωση των περιοχών πρασίνου και την αντικατάστασή τους με υλικά που συμβάλουν στο φαινόμενο της ΑΘΝ [18]. Το δίκτυο των ασφαλτοστρωμένων και πεζοδρομημένων επιφανειών που ολοένα και επεκτείνεται σημαντικά, έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης της θερμοκρασίας ανά μονάδα όγκου από όποιο άλλο ανθρώπινο δημιούργημα [19].

Οι σημερινές αστικές περιοχές συνεχίζουν να αυξάνουν σε μέγεθος, φαινόμενο γνωστό και ως αστική εξάπλωση. Είναι γεγονός ότι η έντονη αστική εξάπλωση οδηγεί σε πιο συχνά κύματα καύσωνα, από ότι σε μικρού μεγέθους αστικές περιοχές [21],[20]. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών έως το 2030 το 61% του παγκόσμιου πληθυσμού θα ζει σε αστικές περιοχές [23]. Ακόμα, η ραγδαία αύξηση στον παγκόσμιο πληθυσμό είναι ένας

παράγοντας που οδηγεί σε αλλαγές στο παγκόσμιο αστικό και περι-αστικό περιβάλλον, μέσω της υπερθέρμανσης του πλανήτη, της κατακρήμνισής της βιοποικιλότητας και της δασικής αποψίλωσης[24].

Το συνολικό αποτέλεσμα θα είναι η όξυνση του φαινομένου της ΑΘΝ και αναμενόμενη δραματική αύξηση του ψυκτικού φορτίου, καθώς οι αστικές περιοχές γίνονται ολοένα μεγαλύτερες και πυκνότερες, η βλάστηση μειώνεται και τα ενεργειακά κόστη αυξάνονται. Ακόμα οι περιβαλλοντικές αλλαγές λόγω της αστικοποίησης θα επηρεάσουν του κλιματικούς, υδατικούς και βιολογικούς κύκλους του περιβάλλοντος. Η αλλαγή ενδέχεται να είναι μη αναστρέψιμη τόσο από την ανθρώπινη οπτική όσο και από αυτήν των φυσικών οικοσυστημάτων [22],[23].

A.1.2.2 Αστικός σχεδιασμός

Η ολοένα αυξανόμενη χρήση κατασκευαστικών υλικών στις αστικές περιοχές, τα οποία διαθέτουν μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας καθώς και χαμηλότερη λευκαύγεια. Σε συνδυασμό με την συσχετισμένη με αυτά μείωση των φυσικών περιοχών πρασίνου, έχουν σημαντική επιρροή στην όξυνση του φαινομένου της ΑΘΝ [19]. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες κατασκευές είναι τελείως διαφορετικά από αυτά του χώματος, της βλάστησης και του νερού. Η διαφορετική αυτή φύση των υλικών οδηγεί σε νέες ατμοσφαιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, επηρεάζοντας επομένως τις φυσικές διεργασίες ανταλλαγής ενέργειας και τον κύκλο του νερού. Ακόμα συνδυάζοντας τις αλλαγές αυτές με την ανθρωπογενής παραγόμενη θερμότητα, την αυξανόμενη μόλυνση και το αυξανόμενο μέγεθος των αστικών περιοχών, θα έχει σαν αποτέλεσμα την ξεκάθαρη αλλαγή του αστικού κλίματος στο μέλλον [26].

A.1.2.3 Αύξηση των ενεργειακών αναγκών θέρμανσης και ψύξης

Τεχνολογικές εξελίξεις μέσα στην κοινωνία συνεισφέρουν στο φαινόμενο της ΑΘΝ μέσω αύξησης των αναγκών θέρμανσης και ψύξης. Η πιο σημαντική είναι αυτή του κλιματισμού, η οποία αν και είναι πολύ αποτελεσματική στην αύξηση της ανθρώπινης άνεσης αναπόφευκτα παράγει μεγάλα ποσά θερμότητας προς το περιβάλλον και αυξάνει την ενεργειακή κατανάλωση [26]. Δοθέντος του μεγέθους των σημερινών πόλεων, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κλιματιστικών μονάδων οι οποίες είναι απαραίτητες για την ομαλή λειτουργία κτιρίων και κατασκευών. Το αυξανόμενο ζεστό κλίμα οδηγεί στην περαιτέρω αύξηση της χρήσης των κλιματιστικών, η οποία με την σειρά της αυξάνει την ένταση της ΑΘΝ. Ως επακόλουθο είναι η μείωση της ανθρώπινης άνεσης, η αύξηση των εκπομπών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και έτσι επηρεάζεται και το επίπεδο της ανθρώπινης υγείας. Τέλος η όξυνση του φαινομένου της ΑΘΝ οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, όπου ένας βαθμός αύξησης της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έως και 4% [27].

A.1.3 Μέθοδοι άμβλυνσης του φαινομένου της ΑΘΝ

Ένας αποτελεσματικός τρόπος κατηγοριοποίησης των μεθόδων άμβλυνσης του φαινομένου της ΑΘΝ είναι σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται στις μεθόδους που βασίζονται σε αύξηση της λευκαύγειας των επιφανειών σε αστικές περιοχές. Η δεύτερη αναφέρεται σε μεθόδους που βελτιώνουν την εξατμισοδιαπνοή [28]. Οι πιο σημαντικές και από τις δύο κατηγορίες περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

A.1.3.1 Βλάστηση

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι η αύξηση της πράσινης βλάστησης είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για την άμβλυνση της ΑΘΝ [[17],[28]]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της δενδροφύτευσης, τόσο σε οικιακό επίπεδο όσο και σε μια οργανωμένη δημοτική δράση. Ένας από τους τρόπους που επιτυγχάνεται η άμβλυνση είναι μέσω της βελτίωσης της εξατμισοδιαπνοής [28]. Έχει αποδειχθεί σε προηγούμενες μελέτες ότι ειδικά σε αστικές περιοχές όπου υπάρχει συνωστισμός πληθυσμού, υπάρχει ανάλογη ραγδαία αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι τα δέντρα μετριάζουν τις επιπτώσεις, καθώς απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Έτσι άμεσα βοηθούν στην χαλάρωση των επιπτώσεων του φαινομένου της ΑΘΝ.

A.1.3.2 Σκίαση λόγω δέντρων

Ένας ακόμα τρόπος που η πράσινη βλάστηση και συγκεκριμένα τα δέντρα συμβάλλουν στην άμβλυνση της ΑΘΝ είναι λόγω της προσφοράς σκίασης ενάντια στην ηλιακή ακτινοβολία, τόσο στους πεζούς αλλά και στα κτίρια. Σε συνδυασμό με την βελτίωση της εξατμισοδιαπνοής αποτελούν μια αρκετά καλή προοπτική.

A.1.3.3 Διαπερατά υλικά

Τα συνηθισμένα υλικά οικοδομής που χρησιμοποιούνται στα πεζοδρόμια δεν επιτρέπουν την εισχώρηση νερού σε αυτά. Εάν αντικατασταθούν με διαπερατά προς το νερό υλικά, υπολογίζεται ότι θα μειωθεί η συνεισφορά των πεζοδρομίων στο φαινόμενο της ΑΘΝ. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς η διαπερατότητα στο νερό οδηγεί σε βελτίωση της εξατμισοδιαπνοής [28].

A.1.3.4 Υδάτινες επιφάνειες

Αυξημένες ποσότητες υδάτινων επιφανειών μπορούν να μειώσουν τοπικά την θερμοκρασία, λόγω της δράσης της εξάτμισης. Ακόμα επιφυλάσσουν τοπικές αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου [29]. Μάλιστα επειδή η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας του νερού είναι σχετικά μεγάλη λόγω θερμοχωρητικότητας του νερού, συνεισφέρει και στην τοπική μείωση της θερμοκρασίας. Βέβαια δεν έχει ακόμα αποδειχθεί πειραματικά και ενδέχεται να προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις τις νυχτερινές ώρες λόγω της μεγάλης ποσότητας θερμότητας που έχει απορροφηθεί [30],[31].

A.1.3.5 Πράσινες οροφές-Χρήση ψυχρών υλικών.

Ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας των αστικών περιοχών αποτελείται από τις οροφές των κτιρίων της. Ένας τρόπος με τον οποίο αμβλύνεται το φαινόμενο της ΑΘΝ είναι η τοποθέτηση πράσινης βλάστησης. Οι πράσινες αυτές οροφές απορροφούν θερμότητα καθώς και φιλτράρουν τον αέρα, με αποτέλεσμα να κρατούν την θερμοκρασία σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Τα φυτά μέσω της απορρόφησης νερού καταφέρνουν να μένουν σε χαμηλότερες από το περιβάλλον τους θερμοκρασίες, μειώνοντας έτσι την θερμοκρασία αυτού. Τέλος οι πράσινες οροφές μειώνουν τις απαιτήσεις σε ψύξη, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων ενώ ταυτόχρονα μειώνουν τον αστικό θόρυβο και απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης[33],[34].

Οι σχετικά σκούρες οροφές απορροφούν μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας και προκαλούν θέρμανση των κτιρίων. Αντίθετα, οροφές που είναι σχετικά ανοικτόχρωμες και διαθέτουν όμοιες με τις σκούρες ιδιότητες μόνωσης, αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία και μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των κτιρίων. Ακόμα υλικά που διαθέτουν υψηλή ικανότητα θερμικής εκπομπής δρουν σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό προς την διατήρηση των θερμοκρασιών εντός των κτιρίων σε σχετικά χαμηλά επίπεδα [32].

A.2 Ψυχρά υλικά

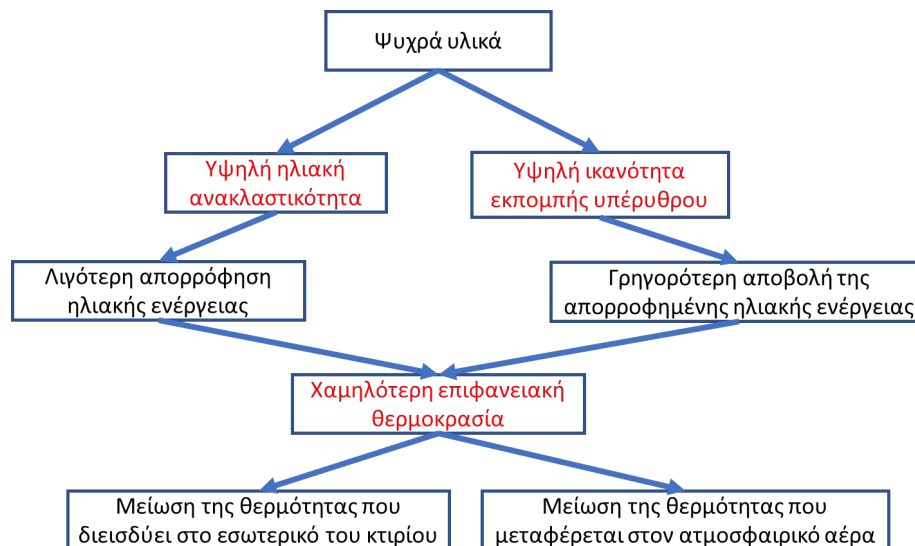
Τα κατασκευαστικά υλικά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη αυτών, στην αστική δόμηση είναι επηρεάζουν άμεσα και σε μεγάλο βαθμό την αστική θερμική ισορροπία. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι είναι εκείνα που λαμβάνουν πρώτα την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι η συμπεριφορά τους ως προς την απορρόφηση αυτής, την συσσώρευση της μέσα τους καθώς και την δυνατότητα εκπομπής της πίσω στην ατμόσφαιρα, έχει την δυνατότητα να αλλάζει το θερμοκρασιακό προφίλ τόσο στον περιβάλλον ατμοσφαιρικό αέρα όσο και στο εσωτερικό των κτιρίων. Αφενός εντείνοντας η αμβλύνοντας το φαινόμενο της ΑΘΝ, και ακόμα και την θερμική άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων.

Τα ψυχρά υλικά έχουν δύο καίριας σημασίας χαρακτηριστικά για την άμβλυνση του φαινομένου της ΑΘΝ. Είναι τα υλικά εκείνα που διαθέτουν υψηλό συντελεστή ηλιακής ανάκλασης και μεγάλη ικανότητα θερμικής εκπομπής στο υπέρυθρο φάσμα. Αποτελούν μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον λύση, αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων ενώ ταυτόχρονα μειώνουν τις ανάγκες κλιματισμού. Ακόμα μειώνουν τις θερμοκρασίες της επιφάνειας και του ανέμου, με αποτέλεσμα την βελτίωση των τοπικών συνθηκών [35].

Ένας ακόμα τρόπος χαρακτηρισμού του πόσο “ψυχρό” είναι ένα υλικό είναι ο υπολογισμός του του δείκτη ηλιακής ανακλαστικότητας (solar reflectance index, SRI). Ο δείκτης αυτός περιλαμβάνει τόσο την ηλιακή ανακλαστικότητα όσο και την ικανότητα εκπομπής υπέρυθρου σε ένα μέγεθος. Σύμφωνα με την ASTM ο δείκτης συγκρίνει την θερμοκρασία μια επίπεδης επιφάνειας με μια τυποποιημένη μαύρη επιφάνεια (ανακλαστικότητα 5% και εκπομπή 90%) και μια τυποποιημένη λευκή επιφάνεια (ανακλαστικότητα 80% και εκπομπή 90%). Ο δείκτης λαμβάνει την τιμή 0 για την τυποποιημένη μαύρη επιφάνεια, την τιμή 100 για την λευκή και εκφράζεται σε αδιάστατη ποσοστιαία κλίμακα.

$$SRI = \frac{(T_{black} - T_{surface})}{(T_{black} - T_{blawhiteck})} * 100$$

όπου T_{black} , T_{white} και $T_{surface}$ είναι οι θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης των τυποποιημένων μαύρων και λευκών επιφανειών και της επιφάνειας προς υπολογισμό αντίστοιχα [36].



Διάγραμμα 3. Βασικές αρχές της χρήσης ψυχρών υλικών [27].

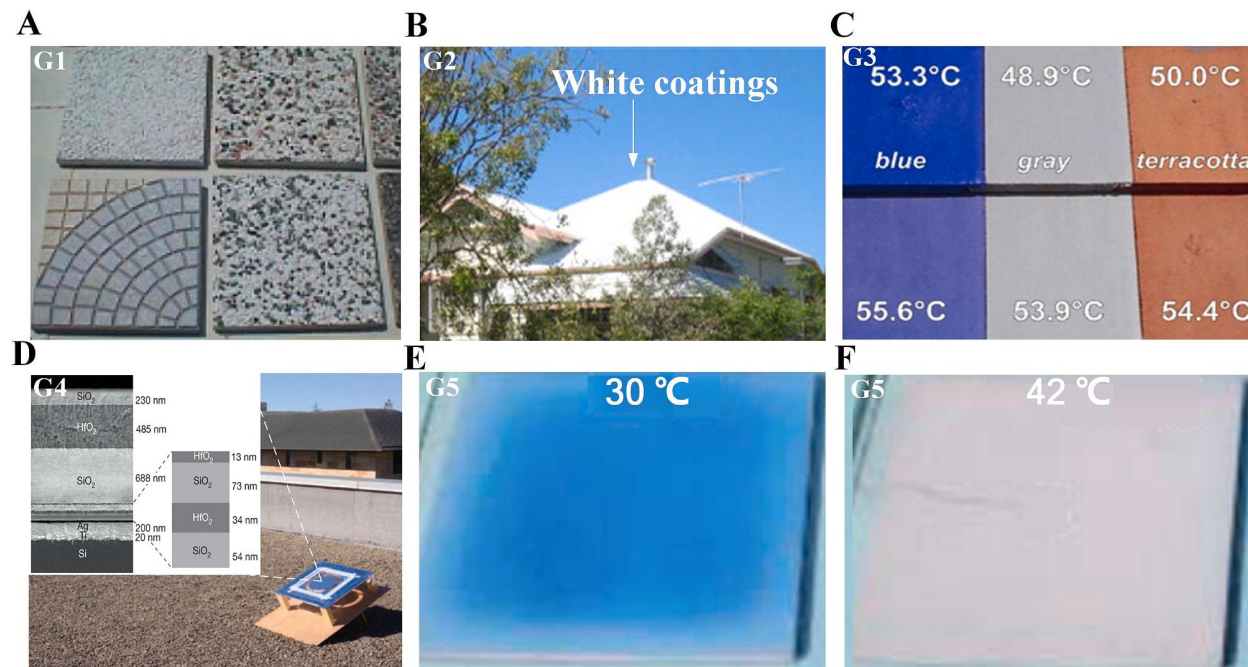
Η χρήση των ψυχρών υλικών που παρουσιάζουν υψηλό δείκτη ανακλαστικότητας, τόσο στο ορατό όσο και στο υπέρυθρο φάσμα εκπομπής, συμβάλλουν στην συνολική αύξηση της λευκαύγειας. Ως άμεσο αποτέλεσμα στην μείωση της θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα καθώς και στην θερμική άνεση εντός των κτιρίων [3],[11],[27]. Τα ψυχρά υλικά είναι μια παθητική, φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμη λύση προς την επίτευξη καλύτερης ενεργειακής απόδοσης για τον δροσισμό αυτών. Ακόμα βελτιώνουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο αστικό μικρόκλιμα άμεσα, μειώνοντας την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα που οφείλεται στα συμβατικά υλικά, και έμμεσα, μειώνοντας τις ενεργειακές ανάγκες σε ενεργητικούς τρόπους δροσισμού των κτιρίων, δηλαδή και την θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον λόγω αυτών.

A.2.1 Ψυχρές οροφές

Η εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση επικαλύψεων με μεγάλο δείκτη ανακλαστικότητας («ψυχρές») ή με την χρήση ψυχρών υλικών (λευκές μεμβράνες κ.α.) είναι αδιαμφισβήτητη και ήδη είναι μια δημοφιλής περιοχή μελέτης [2],[19],[27],[33],[34],[35] . Ακόμα, αυτά τα κέρδη μπορούν να αυξηθούν με την ψύξη της θερμοκρασίας του αέρα στο εξωτερικό των κτιρίων, καθώς βελτιώνουν την απόδοση των κλιματιστικών μονάδων που βρίσκονται είτε στην οροφή ή στις πλάγιες όψεις του κτιρίου. Μια οροφή που βρίσκεται υπό συνεχή ηλιακή ακτινοβολία δρα ως ένας ενεργειακός συλλέκτης και ακόμα ζεσταίνει τον αέρα που βρίσκεται στο οριακό στρώμα επιφάνειας-περιβάλλοντος. Για παράδειγμα μια κοινή οροφή με δείκτη ανακλαστικότητας 0.05 θα απορροφήσει το 95% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Πειραματικά δεδομένα από το [38] δείχνουν ότι η διαφορά μεταξύ περιβαλλοντικού αέρα (πέραν του οριακού στρώματος) και επιφάνειας κυμαίνεται μέχρι και 60 °C . Χρησιμοποιώντας εμπειρικούς κανόνες για την μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς ένα μεγάλο κλάσμα της ενέργειας που απορροφήθηκε (περί το 40%) μεταφέρεται στον αέρα του οριακού στρώματος. Αντίθετα μια ψυχρή οροφή με δείκτη ανακλαστικότητας 0.8 απορροφά μόνο το 20% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Εν τέλει, παρατηρείται μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης των 14 °C και η θερμότητα που μεταφέρεται στον αέρα μειώνεται σημαντικά.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις ψυχρές οροφές μπορούν αν διαχωριστούν σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με την διαχρονική πρώτοεμφανισή τους καθώς και την χρήση τους σε οροφές. Η πρώτη γενιά υλικών βασίζεται σε υλικά που βρίσκονται στην φύση και έχουν μεγάλο φυσικό συντελεστή ανακλαστικότητας (Διάγραμμα 4Α). Συνήθως αυτά έχουν ως βάση το μάρμαρο, ενώ ο συντελεστής ανακλαστικότητας τους δεν ξεπερνάει το 0.75. Η δεύτερη γενιά υλικών αποτελείται από τεχνητά «λευκά» υλικά, που περιέχουν κυρίως βαφές (pigment

coatings). Συνήθως ο συντελεστής ανακλαστικότητας τους είναι καλύτερος από την πρώτη γενιά και κυμαίνεται στο 0.85 (Διάγραμμα 4B). Αν και κατέχουν αρκετά ικανοποιητικές ιδιότητες οι ψυχρές οροφές δεύτερης γενιάς ήταν και είναι δυσφορείς αισθητικά. Έτσι εκκίνησε η προσπάθεια κατασκευής οροφών τέταρτης γενιάς, τέτοιες ώστε αν και μη λευκές να διαθέτουν



Διάγραμμα 4. Διαφορετικοί τύποι υλικών κατασκευής οροφών (γενεές). (Α) Πρώτη γενιά ψυχρών υλικών . (Β) Δεύτερη γενιά ψυχρών υλικών . (C) Τρίτη γενιά ψυχρών υλικών . (D) Τέταρτη γενιά ψυχρών υλικών (E,F) Πέμπτη γενιά ψυχρών υλικών . Η Πέμπτη γενιά αποτελείται από υλικά που αλλάζουν τον συντελεστή ανακλαστικότητας ανάλογα με την θερμοκρασία του αέρα, ήτοι σε χαμηλή θερμοκρασία φαίνονται πιο «σκούρα» για να απορροφούν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και σε υψηλή θερμοκρασία φαίνονται πιο «λευκά» για να μειωθεί η απορρόφηση [36].

μεγάλο δείκτη ανακλαστικότητας κοντά στο υπέρυθρο φάσμα. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η ανάκλαση του αόρατου στον άνθρωπο ηλιακό κλάσμα της ακτινοβολίας που βρίσκεται στο υπέρυθρο φάσμα. Το κλάσμα αυτό είναι υπεύθυνο για το 52% της συνολικής ενέργειας. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι αυτά τα υλικά καταφέρνουν να έχουν χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες από τα αντίστοιχου χρώματος συμβατικά υλικά (Διάγραμμα 4C).

Οι συμβατικές ψυχρές οροφές δεν καταφέρνουν να διατηρήσουν την επιφανειακή θερμοκρασία τους σε επίπεδα χαμηλότερα της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας αέρα. Καθώς η πλειοψηφία των ενεργειακών αναγκών σε κλιματισμό είναι την ημέρα, η έρευνα για την κατασκευή ψυχρών υλικών, των οποίων η επιφανειακή θερμοκρασία θα είναι χαμηλότερη της περιβαλλοντικής, είναι υψίστης σημασίας. Έτσι τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της νανοφωτονικής (nanophotonics) επιστήμης και των μεταϋλικών, υπερ-ψυχρά (super-cool) υλικά έχουν ξεκινήσει να δημιουργούνται. Αυτά τα υλικά έχουν πολύ μικρή ανακλαστικότητα στο φάσμα 300nm-2500nm, όμως έχουν μεγάλη σε άλλα μήκη κύματος. Στην έρευνα αυτή αποτελεί ορόσημο η κατασκευή ενός τέτοιου υλικού, αποτελούμενο από 7 εναλλασσόμενες στρώσεις οξειδίου του αφνίου και πυριτίου επάνω σε ένα ικρίωμα από άργυρο (Διάγραμμα 4D)[37].

Για περιοχές με ζεστά καλοκαίρια και ψυχρούς χειμώνες, τα συμβατικά ψυχρά και υπερ-ψυχρά υλικά παρουσιάζουν ενεργειακές ποινές στην θέρμανση των κτιρίων την χειμερινή περίοδο. Τα ενεργειακά κέρδη με την μείωση της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι έρχονται σε συνδυασμό με την ίδια μείωση το χειμώνα, αυξάνοντας έτσι τις ενεργειακές απαιτήσεις σε θέρμανση. Έτσι αυξάνεται η ανάγκη για υλικά τα οποία θα παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες, ανάλογα με την περιβαλλοντική θερμοκρασία. Ως αποτέλεσμα δημιουργούνται τα υλικά 5^{ης} γενιάς, τα θερμο-προσαρμοστικά ακτινοβολούντα υλικά (temperature-adaptive radiative materials TARM). Αποτελούνται κυρίως από διάφορα οξείδια μετάλλων, των οποίων το χρώμα αλλάζει ανάλογα με την θερμοκρασία. Όταν η περιβαλλοντική θερμοκρασία είναι χαμηλή, παρουσιάζουν σκούρο χρώμα βελτιώνοντας την απορρόφηση θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία(Διάγραμμα 4E). Όταν η περιβαλλοντική θερμοκρασία είναι υψηλή, παρουσιάζουν ανοικτό χρώμα βελτιώνοντας τον συντελεστή ανακλαστικότητάς τους, μειώνοντας την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία (Διάγραμμα 4F).

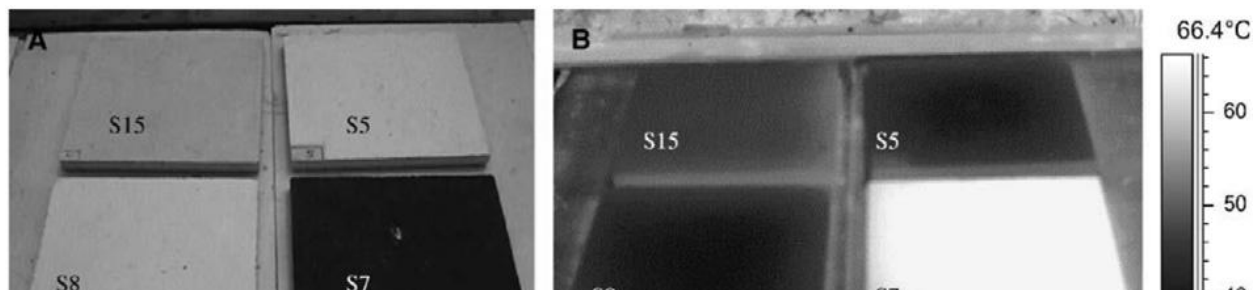
Σε μια πρόσφατη και εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση [37] έγινε ξεκάθαρο το γεγονός ότι έως και το 60% της απορροφούμενης, λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, θερμότητας από το κτίριο προέρχεται από την εκτεθειμένη στον ήλιο οροφή. Έτσι η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι με κατασκευή κατάλληλων ψυχρών οροφών, τόσο σε τροπικά και ξηρά

κλίματα όσο και σε μικτού τύπου, μπορούν να εξοικονομηθούν έως και 40% από τις ενεργειακές ανάγκες ενεργητικού δροσισμού των κτιρίων. Η μέγιστη εξοικονόμηση παρατηρήθηκε στα ιδιαιτέρως θερμά τροπικά κλίματα. Ακόμα παρατηρήθηκε μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας έως και 5 °C.

A.2.2 Ψυχρές επικαλύψεις

Επικαλύψεις με μεγάλο δείκτη ανακλαστικότητας για εφαρμογή σε οροφές η πεζοδρόμια είναι ευρέως διαθέσιμες στο εμπόριο. Αυτές οι «ψυχρές» επικαλύψεις αποτελούνται από ακρυλικά ελαστομερή, μεταλλικά, σιλικονούχα και φθοροπολυμερή υλικά, η και ακόμα συνδυασμό όλων των παραπάνω. Πληθώρα προϊόντων παρουσιάζει αρχικά δείκτη ανακλαστικότητας τάξεως μεγαλύτερης του 90%, φθάνοντας πολλές φορές και το 95%. Όμως κατά τη χρήση τους και την έκθεση τους στα στοιχεία της φύσης (βροχή, ηλιοφάνεια, άνεμος). Έτσι παρατηρείται μια κατακρήμνιση των ιδιοτήτων τους, η οποία κυμαίνεται μεταξύ συντελεστών ανακλαστικότητας της τάξης του 65%-85%. Η μείωση αυτή μπορεί να δειχθεί ότι είναι μια συνάρτηση της δομής του υλικού και της όποιας απτικής ανθεκτικότητας του [41].

Η επιφανειακή θερμοκρασία των ψυχρών επικαλύψεων διαφέρει ανάλογα με τον δείκτη ανακλαστικότητας, την ικανότητα εκπομπής και την θερμοχωρητικότητά τους. Συστηματική παρακολούθηση 15 τσιμεντένιων πλακών με διάφορες επικαλύψεις του ίδιου χρώματος έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιφανειακών θερμοκρασιών τους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός ότι οι πλάκες είχαν το ίδιο χρώμα. Για τα ψυχρά αυτά υλικά



Διάγραμμα 5. Φωτογραφίες στο ορατό (Α) και στο υπέρυθρο (Β) φάσμα για 4 επιλεγμένες επικαλύψεις από τις 15 συνολικά. Πλάκα χωρίς επικάλυψη (S15), πλάκα με μαύρη επικάλυψη (S7), πλάκες με λευκή "ψυχρή" επικάλυψη (S7-8). [39]

η επιφανειακή θερμοκρασία κυμάνθηκε μεταξύ των 14 °C και 17 °C. Οι μεταλλικής βάσης επικαλύψεις, λόγω της χαμηλής ικανότητας εκπομπής τους, εμφάνισαν τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Ενώ υλικά που συνδυάζουν υψηλές ιδιότητες τόσο ανακλαστικότητας όσο και εκπομπής, εμφάνισαν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Συνολικά η διαφορά θερμοκρασία της πιο ζεστής και της πιο ψυχρής επικάλυψης με το περιβάλλον κυμάνθηκε μεταξύ των 12 °C και 3 °C αντίστοιχα [42].

Οι περισσότερες «λευκές» επικαλύψεις παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα κατά την έκθεση τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες και στην επακόλουθη κατακρήμνιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Έπειτα από 60 ημέρες έκθεσης σε περιβαλλοντικές συνθήκες ψυχρές επικαλύψεις με ακρυλική ελαστομερή βάση παρουσίασαν αύξηση της διαφοράς της επιφανειακής θερμοκρασίας τους με αυτή του περιβαλλοντικού αέρα από 4 °C σε 9 °C [43]. Η απόθεση άλατος, πηλού, σωματιδίων άνθρακα και άλλα είδη οργανικών αποθέσεων (ενδεχομένως και βακτηριδιακής φύσης) είναι η κύρια αιτία στην αύξηση αυτή. Εγείρεται έτσι η ανάγκη πλύσης των επικαλύψεων αυτών για το καλύτερο δυνατό ενεργειακό αντίκτυπο. Ακόμα όμως και με τον σχετικά συχνό καθαρισμό αυτών, αναμένεται η μείωση του συντελεστή ανακλαστικότητάς τους κατά 20% τα πρώτα 3-5 χρόνια σε χρήση. Ενώ ακόμα από τους πρώτους μήνες η μείωση αυτή κυμαίνεται στο 5%-10% [44].

Η σύγχρονη έρευνα στις υψηλής ανακλαστικότητας επικαλύψεις στοχεύει στην βελτίωση τις αντοχής των οπτικών ιδιοτήτων τους κατά την πάροδο του χρόνου. Η συμπεριφορά τους βασίζεται σε πολλές παραμέτρους, κάποιες εκ των οποίων σχετίζονται με την σύνθεση και την τελική επεξεργασία των επικαλύψεων καθώς και την περαιτέρω έρευνα στην επιρροή των περιβαλλοντικών παραγόντων [39]. Η χρήση κάποιων ανόργανων συστατικών στις επικαλύψεις έδειξε βελτίωση στην διατήρηση των οπτικών ιδιοτήτων σε σύγκριση με τις συμβατικές επικαλύψεις που χρησιμοποιούν οργανικά συστατικά [45]. Ακόμα η χρήση φωτοκαταλυτικών τεχνολογιών βελτιώνει την δυνατότητα των επικαλύψεων για αυτοκαθαρισμό, και έτσι να αντισταθμίσει την κατακρήμνιση των οπτικών ιδιοτήτων λόγω επίδρασης του περιβάλλοντος [46].

Σαν συμπέρασμα οι τεχνητές ψυχρές επικαλύψεις υψηλού συντελεστή ανακλαστικότητας και υψηλής ικανότητας εκπομπής εμφανίζουν επιφανειακές θερμοκρασίες μόλις μερικούς βαθμούς πάνω από το περιβάλλον. Έτσι συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην μετρίαση των επιπτώσεων του φαινομένου της ΑΘΝ, καθώς η απελευθέρωση θερμότητας στην ατμόσφαιρα μειώνεται σημαντικά. Η κατακρήμνιση των ιδιοτήτων κατά την χρήση τους είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτών των υλικών, και εγείρει ερωτήματα στην μακροχρόνια βιωσιμότητα τους. Στο πρόβλημα της βιωσιμότητας τους προσπαθεί να απαντήσει η σύγχρονη έρευνα στο αντικείμενο με την λύση της χρήσης φωτοκαταλυτικών ουσιών να είναι πολλά υποσχόμενη [38].

A.3 Παθητικός δροσισμός κτιρίων

Τα κτίρια αποτελούν ένα δυναμικό σύστημα ως προς το χρόνο. Σε συνδυασμό της προσφοράς στέγης και της κάλυψης κάποιων στοιχειωδών στοιχείων αισθητικής, πρέπει ακόμα να παρέχουν συνθήκες άνεσης (θερμικής, ακουστικής κ.α.) για τους κατοίκους αυτών. Ειδικότερα η θερμική συμπεριφορά τους εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Μεταξύ άλλων είναι οι περιβαλλοντικές, αυτές δεν μπορούν να εισέλθουν σε ανθρώπινο έλεγχο. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι σχεδιαστικές παράμετροι και υπόκεινται σε ανθρώπινο έλεγχο, στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού κτιρίων. Μη επαρκής προσοχή σε αυτές μπορεί να οδηγήσει σε ένα εχθρικό για τον άνθρωπο κτίριο. Ειδικά σε θερμά κλίματα κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, τα κτίρια βρίσκονται σε συνεχή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες που ξεπερνούν τα όρια της θερμικής άνεσης. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη για ένα ακόμα βήμα κατά την σχεδίαση αυτών, το βήμα του σχεδιασμού συστημάτων για τον επαρκή δροσισμό των κτιρίων.

Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική μπορεί να μας δώσει παραδείγματα εναρμόνισης των κτιρίων με το φυσικό περιβάλλον. Σε ξηρά και θερμά κλίματα παρατηρούνται τεράστια κτίρια με λίγα και μικρά ανοίγματα, συνήθως βαμμένα με ανοικτόχρωμες βαφές. Σιντριβάνια, πισίνες, ροές νερού καθώς και βλάστηση αναλαμβάνουν το καθήκον του δροσισμού μέσω της εξάτμισης του νερού. Σε κλίματα με αρκετή υγρασία και θερμά καλοκαίρια, παρατηρούνται

κτίρια ελαφράς κατασκευής με αρκετά ανοίγματα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο εξαερισμός των κτιρίων είναι άκρος επιθυμητός. Τα σύγχρονα κτίρια πολλές φορές αποτυγχάνουν να ακολουθήσουν το παράδειγμα της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής. Η αποτυχία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εξάρτηση των κτιρίων αυτών σε μηχανικές διατάξεις ψύξεις, η οποίες καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας ενώ συμβάλλουν στην όξυνση του φαινομένου της ΑΘΝ.

A.3.1 Πλεονεκτήματα παθητικού δροσισμού κτιρίων

Η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη και θέρμανση των κτιρίων παγκοσμίως καταλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας χρήσης ενέργειας. Ένα μεγάλο μέρος της καταναλισκόμενης αυτής ενέργειας μπορεί να εξοικονομηθεί με τον παθητικό δροσισμό κτιρίων. Σε θερμά κλίματα η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη κτιρίων ξεπερνάει κατά δύο και τρεις φορές την αντίστοιχη για τις ανάγκες θέρμανσης. Εκμεταλλευόμενοι τις βασικές αρχές της μεταφοράς θερμότητας σε συνδυασμό με το τοπικό μικρο-κλίμα και τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής κατά την διάρκεια του σχεδιασμού των κτιρίων μπορεί να οδηγήσει στην βελτιστοποίηση των κτιρίων ως προς την θερμική άνεση. Ακόμα και σε περιοχές με μέση θερμοκρασία άνω των 31.7 °C, όπου η χρήση κλιματιστικών μονάδων είναι ευρέως διαδεδομένη, μπορεί να επιτευχθεί θερμική άνεση.

Η διαδεδομένη χρήση των κλιματιστικών προκαλεί αύξηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι αυξημένες αυτές απαιτήσεις πολλές φορές υπερφορτώνουν το ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πολλές φορές από μη-ανανεώσιμες πηγές. Ακόμα κατά την λειτουργία τους, οι κλιματιστικές μονάδες παράγουν θερμότητα η οποία απορρίπτεται στο περιβάλλον εντείνοντας το φαινόμενο της ΑΘΝ. Η ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό των κτιρίων είναι ακόμα ένα παράγοντας ενδιαφέροντος, ειδικά στην περίπτωση

που δεν τηρείται το πρωτόκολλο συντήρησης των μονάδων κλιματισμού ή η λειτουργία τους δεν είναι βάση των προδιαγραφών τους. Τέλος, το κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο του μη σωστού σχεδιασμού κτιρίων είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η εγκατάσταση και η χρήση κλιματιστικών μονάδων προϋποθέτει την οικονομική ικανότητα αγοράς και χρήσης αυτών.

Ο παθητικός δροσισμός κτιρίων μπορεί να καλύψει ευρέως αυτά τα προβλήματα, μέσω του ελέγχου και της μείωσης των αναγκών του κτιρίου σε κλιματισμό. Περιλαμβάνει τις μεθόδους πρόληψης αύξησης της θερμοκρασίας σε μη ανεκτά επίπεδα (θερμική άνεση) καθώς και τις μεθόδους απόρριψης της θερμότητας προς το περιβάλλον. Ο παθητικός δροσισμός κτιρίων βασίζεται στην σύζευξη των κτιρίων με «θερμοδοχεία» ικανά να παραλάβουν την παραγόμενη στο εσωτερικό θερμότητα. Η απόρριψη μπορεί να εξασφαλιστεί είτε με την χρήση φυσικών διεργασιών, όπως αυτές της μεταφοράς θερμότητας με φυσικά μέσα. Αυτές αποτελούνται από την αγωγή, την συναγωγή, την μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και την φυσική εξάτμιση. Ακόμα υπάρχει δυνατότητα κατασκευής υβριδικών διατάξεων με την χρήση μικρών (σε όρους κατανάλωσης ενέργειας) αντλιών ή ανεμιστήρων[47].

A.3.2 Μέθοδοι παθητικού δροσισμού κτιρίων

Για την αποφυγή της υπερβολικής ανόδου της θερμοκρασίας και την παροχή συνθηκών θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων την καλοκαιρινή περίοδο, θα πρέπει ο σχεδιασμός για τον παθητικό δροσισμό κτιρίων να γίνεται σε 3 επίπεδα [47]:

1. Μετρίαση της θερμότητας που απορροφάται από το κτίριο
2. Κατάλληλη διαμόρφωση του κτιρίου για την θερμότητα που αναπόφευκτα θα απορροφηθεί
3. Αποβολή της θερμότητας σε κατάλληλα θερμοδοχεία

Η μετρίαση της θερμότητας που απορροφάται είναι το πρώτο βήμα για την βελτίωσης των συνθηκών θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων. Η θερμότητα που απορροφάται

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

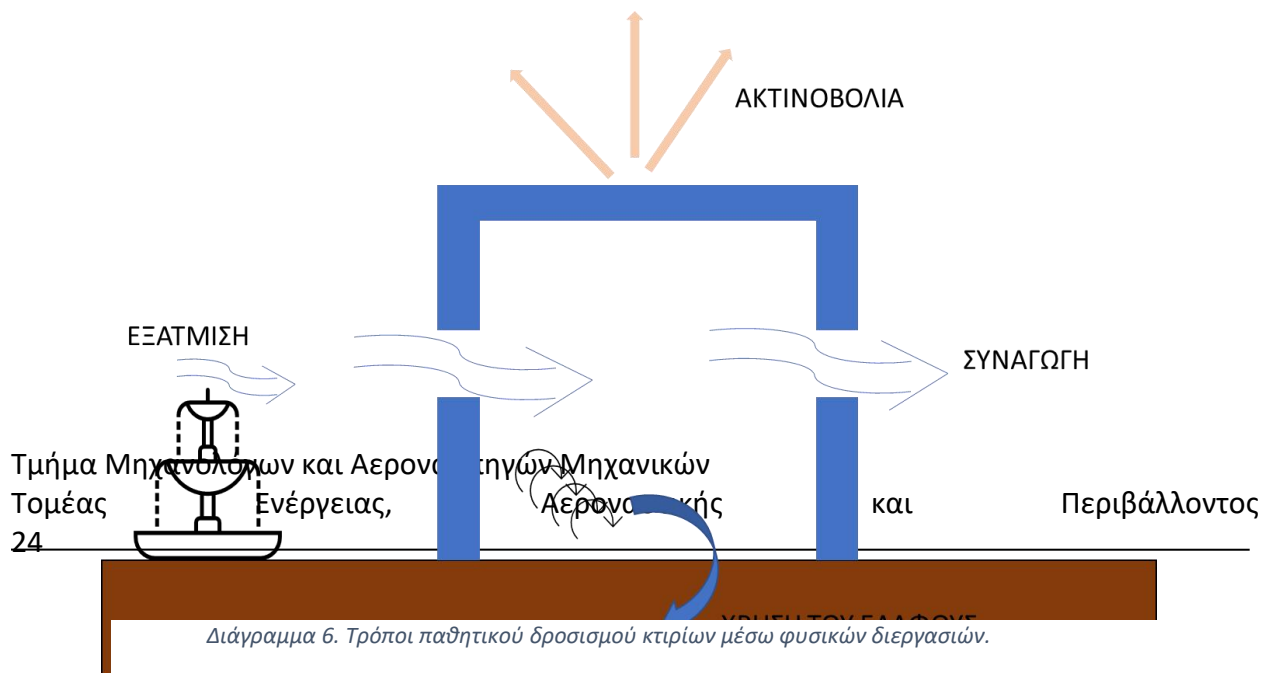
Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος

μπορεί να καταταχθεί σε αυτήν που οφείλεται από εξωτερικούς παράγοντες και σε αυτή που οφείλεται σε πηγές εντός του κτιρίου.

Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η ηλιακή ακτινοβολία είτε εισέρχεται κατευθείαν εντός του κτιρίου μέσω των υαλοπινάκων ή έμμεσα όπως αυτή απορροφάται από τα διάφορα «σκούρα» στοιχεία εντός του κτιρίου. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος προσδίδεται στο κτίριο μέσω της συναγωγής. Στην δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται η θερμότητα μεταβολικών διεργασιών, η θερμότητα λόγω του τεχνητού φωτισμού, η θερμότητα από οικιακές συσκευές και η θερμότητα από μεγαλύτερες διατάξεις όπως αντλίες θερμότητας.

Η συμβολή κάθε μίας από αυτές τις πηγές εξαρτάται από το κτίριο υπό σχεδιασμό, ήτοι διαφορετικός σχεδιασμός για την μετρίαση της θερμότητας που απορροφάται είναι πιο αποδοτικός για ένα δημόσιο κτίριο και διαφορετικός για κτίριο προς ιδιωτική αξιοποίηση. Η μετρίαση λοιπόν μπορεί να επιτευχθεί αναφορικά με την κατάλληλη σκίαση, την παρουσία πράσινης βλάστησης, την παρουσία υδάτινων σωμάτων μέσω της εξάτμισης, τη σωστή μόνωση, τις λευκές βαφές και την χρήση πιο αποδοτικών συσκευών.

Η κατάλληλη διαμόρφωση του κτιρίου για την θερμότητα, που αναπόφευκτα θα απορροφηθεί, μπορεί να γίνει μέσω της χρήσης υλικών με μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας στην κατασκευή του κτιρίου. Η χρήση των υλικών αυτών εξομαλύνει τις απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας. Καθυστερώντας την αποβολή της θερμότητας, όταν η περιβαλλοντική θερμοκρασία είναι μικρότερη. Όσο μεγαλύτερες και απότομες οι

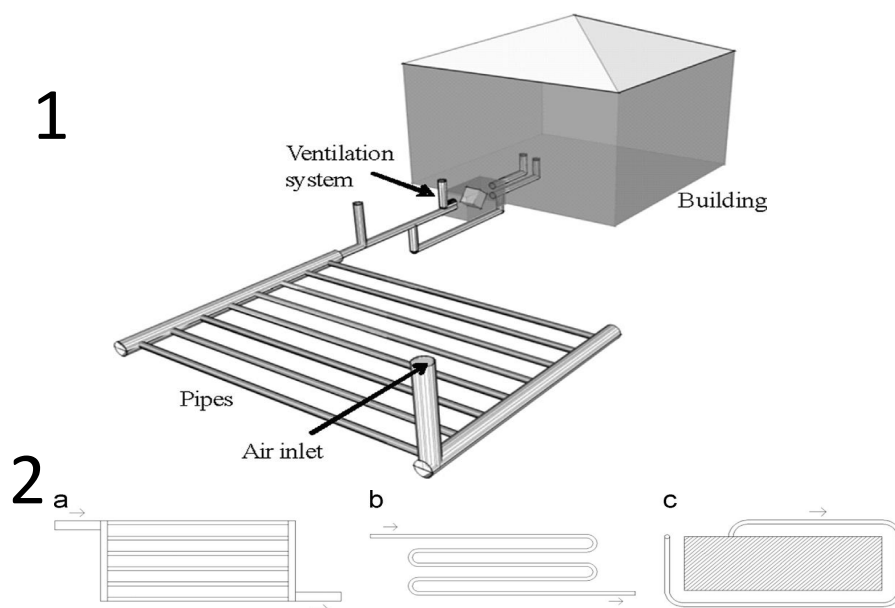


διακυμάνσεις στην εξωτερική θερμοκρασία, τόσο πιο σημαντική η παρουσία της. Επιπρόσθετα μειώνει την θερμότητα που εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου, καθώς μέρος αυτής απορροφάται και έπειτα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω συναγωγής. Η κατανομή αυτής της θερμικής μάζα στο κτίριο παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των διαδικασιών δροσισμού των κτιρίων.

Σε διάφορα θερμά κλίματα, τα δύο πρώτα στάδια του σχεδιασμού δεν είναι επαρκή για την προσφορά ικανοποιητικών συνθηκών θερμικής άνεσης κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη σχεδιασμού των κτιρίων με μέσα ικανά να απορρίπτουν την θερμότητα που συσσωρεύεται στο εσωτερικό σε εξωτερικά θερμοδοχεία. Οι κύριες κατηγορίες παθητικού (ή υβριδικού με την προσθήκη αντλιών ή ανεμιστήρων) δροσισμού κτιρίων είναι ο δροσισμός με τον κατάλληλο εξαερισμό, ο δροσισμός μέσω της εκπομπής ακτινοβολίας, ο δροσισμός μέσω της εξάτμισης και ο δροσισμός μέσω της χρήσης του εδάφους (Διάγραμμα 6). Κάποιες από τις μεθόδους προσφέρουν άμεσο δροσισμό. Η συνεισφορά άλλων μεθόδων είναι αθροιστική και ετεροχρονισμένη. Προσφέροντας ουσιαστικά μια εξομάλυνση στις έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας και προσφέροντας μια λύση στο πρόβλημα της συσσώρευσης της θερμότητας στο εσωτερικό του κτιρίου.

A.3.3 Παθητικός δροσισμός κτιρίων με χρήση εναλλακτών θερμότητας αέρα-εδάφους

Η χρήση του εδάφους για τον παθητικό δροσισμό κτιρίων, καθώς και για την θέρμανση αυτών, έχει βρεθεί να είναι αρκετά αποτελεσματικός. Οι εναλλάκτες θερμότητας αέρα-εδάφους αποτελούνται από ένα σύστημα υπόγειων σωλήνων καθώς και ένα σύστημα (παθητικό ή υβριδικό) που ωθεί αέρα διάμεσο των σωλήνων. Ο αέρας αυτός έπειτα αναμειγνύεται με τον αέρα εντός του κτιρίου προς τον δροσισμό (ή την θέρμανση) αυτού [48]-[52]. Η χρήση των εναλλακτών αυτών μπορεί να εντοπιστεί στους αρχαίους Έλληνες και τους Πέρσες. Η ενεργειακή απόδοση του εναλλάκτη εξαρτάται από την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του δάφους και του αέρα εντός του εναλλάκτη. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται προς (η και από) το περιβάλλον έδαφος του σωλήνα μέσω αγωγής κατά το πάχος του και έπειτα μέσω συναγωγής στον αέρα που ρέει στο εσωτερικό του [52].



Διάγραμμα 7. Διαγραμματική απεικόνιση ενός εναλλάκτη αέρα-εδάφους (1). Διάφορες γεωμετρίες και διατάξεις σωληνών στο έδαφος (2) [52].

Τμήμα Μηχανολογών και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Τομέας

Ενέργειας,

Αεροναυτικής

και

Περιβάλλοντος

A.3.4 Παθητικός δροσισμός κτιρίων με χρήση ψυκτών ακτινοβολίας

Όμοια με τους εναλλάκτες εδάφους-αέρα που χρησιμοποιούν το έδαφος ως το ψυχρό θερμοδοχείο, οι ψύκτες ακτινοβολίας χρησιμοποιούν τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η αποβολή της θερμότητας βασίζεται στο γεγονός ότι τους καλοκαιρινούς μήνες η θερμοκρασία του αέρα είναι συνήθως χαμηλότερη από των περισσότερων αντικειμένων στην γη. Έτσι όποια επιφάνεια καταφέρει την αποβολή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας προς τον περιβαλλοντικό αέρα καθώς και με συναγωγή. Όμως ακόμα και με αυτήν την αποβολή, η συνολική προδιδόμενη θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη, επιτρέποντας την λειτουργία των εναλλακτών αυτών ως ψύκτες ακτινοβολίας μόνο τις νυχτερινές ώρες. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να αποφευχθεί εάν ο ψύκτης δεν βρίσκεται άμεσα εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία καθώς και η φυσική ροή του ανέμου διαμέσου του ενισχύεται μέσω προσθήκης ανεμιστήρων.

Μετά τη δύση του ηλίου, χωρίς την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζεται η βέλτιστη περίπτωση χρήσης. Ο εναλλάκτης αποκτά χαμηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα στο εξωτερικό του καθώς και από τον ίδιο τον εναλλάκτη. Έτσι η πεπερασμένη παροχή μάζας αέρα στο εσωτερικό χαίρει σημαντικών μειώσεων της θερμοκρασίας της, καθώς η θερμότητα αποβάλλεται προς το άπειρο περιβάλλον. Επομένως ο εναλλάκτης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μέσο κλιματισμού για τις νυκτερινές ώρες της θερινής περιόδου με πολύ μεγάλη επιτυχία.

Με βάση αυτό το φαινόμενο, οποιοδήποτε μεταλλικό σώμα καταλληλά κατασκευασμένο τοποθετηθεί πάνω από την οροφή ενός κτιρίου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ψύκτης ακτινοβολίας. Μια ελαφριά μεταλλική πλάκα υπό της οποίας υπάρχει ροή περιβαλλοντικού αέρα λειτουργεί αντίστροφα από ότι ένας ηλιακός συλλέκτης. Ο αέρας ψύχεται από την μεταλλική επιφάνεια και έπειτα οδηγείται στο κτίριο προσφέροντας άμεση ψύξη αυτού.

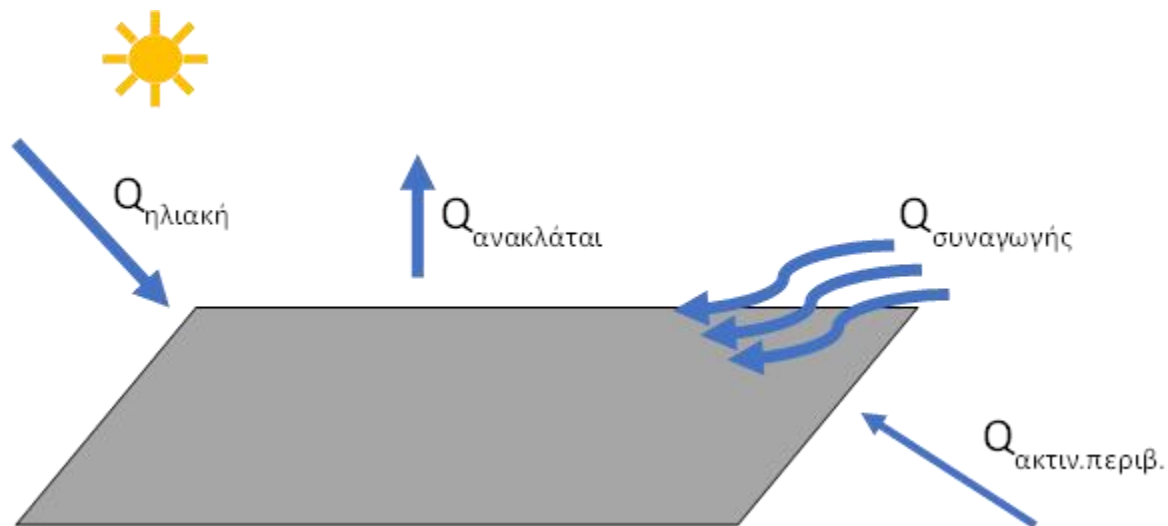
Ένας ελαφρύς εναλλάκτης θερμότητας κατασκευασμένος από αλουμίνιο, κατάλληλα επεξεργασμένος με μια ψυχρή επικάλυψη εγκαταστάθηκε στην οροφή του κτιρίου του

τμήματος Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων στο Πανεπιστήμιο Ιαωvνίνων. Τα αποτελέσματα του παθητικού δροσισμού που προσέφερε ο ψύκτης ήταν αξιοσημείωτα. Στις θερμικές ζώνες που δημιουργήθηκαν, εκείνες που ήταν συνδεδεμένες με τον ψύκτη είδαν την θερμοκρασία τους να μειώνεται από $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως και $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [53].

A.4 Παθητικός δροσισμός κτιρίων με χρήση ψυκτών ακτινοβολίας- εφαρμογές σε κτίρια

A.4.1 Νυκτερινοί ψύκτες ακτινοβολίας

Τα σύγχρονα συστήματα ενεργητικού δροσισμού κτιρίων είναι κατά κόρον συστήματα «αέρα», καθώς ο αέρας είναι το εργαζόμενο μέσο υπεύθυνο για την απομάκρυνση της θερμότητάς από το εσωτερικό των κτιρίων, προς την επίτευξη της απαιτούμενης θερμικής άνεσης. Για την μείωση των ενεργειακών αναγκών κλιματισμού των κτιρίων αρκετές μέθοδοι έχουν δοκιμαστεί με την χρήση ψυκτών ακτινοβολίας (ΨΑ) να αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο με ψυκτική ικανότητα έως και τα 100 W/m^2 [55].



Διάγραμμα 8, Διαγραμματική απεικόνιση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε μια ανακλαστική επιφάνεια.

Μια ελαφριά μεταλλική κατασκευή από αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε ως ΨΑ και η ψυκτική ικανότητα της κυμάνθηκε μεταξύ των 29.7 και 55.8 Wh/m^2 στην περίπτωση καθαρού ουρανού και 26.7 και 44.9 Wh/m^2 σε αυτήν της παρουσίας σύννεφων [56]. Το οξείδιο του πυριτίου (SiO) έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα αποτελεσματικό υλικό για την κατασκευή ΨΑ. Η μέγιστη ψυκτική ικανότητα για ΨΑ που έχουν κατασκευασθεί με αυτό φτάνει τα 61 W/m^2 , αυτή παρατηρήθηκε σε ένα ΨΑ κατασκευασμένο από αλουμίνιο με επικάλυψη SiO [57].

Χρωματισμένες μεταλλικές πλάκες έγειραν το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών τα τελευταία χρόνια [55]. Μερικές από τις επικαλύψεις που χρωμάτισαν τις πλάκες αυτές είναι ZnS, ZnSe, TiO₂, ZrO₂, and ZnO, ακόμα χρησιμοποιήθηκαν πλάκες κατασκευασμένες από πολυαιθυλένιο (PE). Μια πλάκα επικαλυμμένη με λευκή βαφή TiO₂, είχε επιφανειακή θερμοκρασία έως και 12 βαθμούς χαμηλότερη από την περιβαλλοντική όταν συνοδεύεται και με έναν ανεμοθώρακα [58]. Ακόμα κάποιες χημικές ενώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των ΨΑ, όπως το πολύ-τετρα-φθοροαιθυλένιο (polytetrafluoroethylene) , CaSO₄, BaSO₄, and CaF₂ . Μεταξύ αυτών το πολύ-τετρα-φθοροαιθυλένιο αναδεικνύεται ως το καλύτερο, μειώνοντας την επιφανειακή θερμοκρασία έως και 11.5 C° Όμως το CaF₂ εμφανίζει ελαφρώς χειρότερα αποτελέσματα, της τάξης των 11 C° προσφέροντας το πλεονέκτημα της καλύτερης αντοχής στα στοιχεία της φύσης καθώς και στην τιμή. Για την καλύτερη επεξήγηση των χαρακτηριστικών των υλικών που αναφέρθηκαν, οι λεπτομέρειες αυτών αναγράφονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά τυπικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ΨΑ [55]

References	Materials	Infrared emittance	Solar reflectance	Cooling potential
Catalanotti et al. (1975)	Aluminum sheet coated with a thin film of TEDLAR	0.8–0.9	0.85	Maximum temperature reduction in the noon-time is 15 °C
Granqvist and Hjortsberg (1981)	SiO based selected film on Al	0.9	approaches 100% at $\lambda > 18\mu\text{m}$	Maximum cooling power of 61 W/m ²
Ge and Sun (1982)	TiO ₂ based white pigmented paint	—	> 0.8	12–13 °C lower than the ambient temperature
Nilsson et al. (1992)	ZnS/ZnSe pigmented polyethylene foil based radiative film	—	0.825	Maximum estimated cooling energy of 650 Wh/m ² for 24 h
Orel et al. (1993)	BaSO ₄ based white pigmented paint	~ 0.9	—	The cooling performance can be further improved by 3.2 °C
Mihalakakou et al. (1998a)	Lightweight metal based radiator	0.9	—	Clear sky: 29.7–55.8 Wh/m ² Cloudy sky: 26.7–44.9 Wh/m ²
Li and Jiang (2000)	Polyester membrane radiative surface	—	—	9.6 °C lower than the ambient temperature
Yang et al. (2008)	Polytetrafluoroethylene radiative surface	~ 0.93	~ 0.69	8.1–11.5 °C lower than the ambient temperature
Yang et al. (2008)	CaF ₂ radiative surface	~ 0.93	~ 0.63	8–11 °C lower than the ambient temperature
Hu et al. (2016)	Blue titanium-polyethylene terephthalate (BTPT) composite surface	0.8	~ 0.45	13 °C lower than the ambient temperature

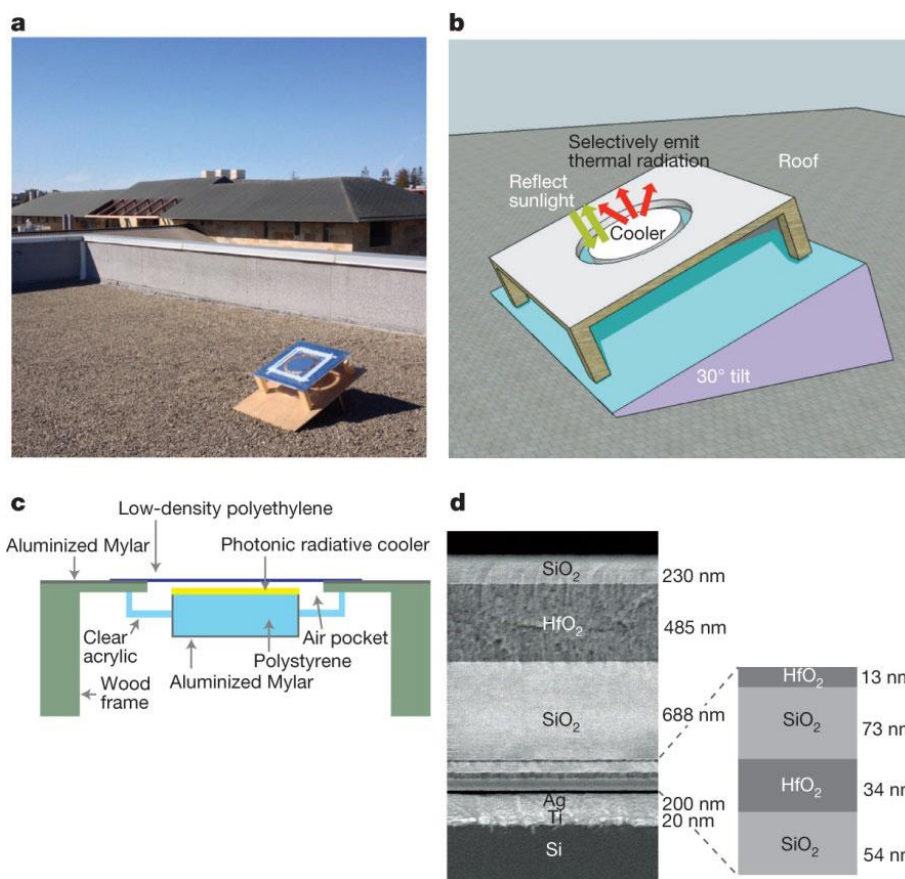
A.4.2 Ημερήσιοι ψύκτες ακτινοβολίας

Ακόμα και εάν οι νυχτερινοί ΨΑ, κατασκευασμένοι με διάφορα υλικά, μπορούν να επιτύχουν εκπληκτικές στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων, το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μόνο την νύκτα. Αυτό το κώλυμα έρχονται να λύσουν οι ημερήσιοι (diurnal) ΨΑ. Σε αυτούς το αντίστοιχο κώλυμα είναι η ανισοκατανομή της απορρόφησης ακτινοβολίας με την εκπομπή αυτής προς το περιβάλλον. Όπως έχει ήδη γίνει κατανοητό θα πρέπει το δεύτερο να υπερβαίνει το πρώτο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψύκτης ακτινοβολίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση ψυχρών υλικών με ταυτόχρονα μεγάλη ικανότητα εκπομπής αλλά και ανακλαστικότητας, για να γύρει η πλάστιγγα προς το μέρος της εκπομπής ακτινοβολίας, ήτοι να αντισταθμιστεί η απορρόφηση θερμότητας με την ικανότητα ψύξης.

Η επικάλυψη που κατασκευάστηκε από ειδική φωτονική νανοδομή (photonic nanostructure) [40] αποτελεί ορόσημο στην προσπάθεια κατασκευής ενός ημερήσιου ψύκτη ακτινοβολίας. Αποτελεί την πρώτη φορά που ο ημερήσιος ΨΑ υλοποιήθηκε, η κατασκευή κατάφερε να μειώσει την θερμοκρασία κατά $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ κάτω από την αντίστοιχη περιβαλλοντική. Η ψυκτική ισχύς ήταν αυτή της τάξης των 40.1 W/m^2 , ενώ η αντίστοιχη ηλικάκη ακτινοβολία κυμάνθηκε μεταξύ $800 - 870\text{ W/m}^2$. Μολονότι η εφαρμογή του ψύκτη ακτινοβολίας είναι περιορισμένη λόγω του κόστους και της περιορισμένης ικανότητας μαζικής παραγωγής, το αντίκτυπο αυτής της ανακάλυψης είναι τεράστιο. Με κατάλληλη μοντελοποίηση, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη ως προς την ικανότητα ελάφρυνσης του ενεργειακού φορτίου για τον δροσισμό του κτιρίου σε πέντε πόλεις (Las Vegas, Los Angeles, Chicago, Miami & San Fransisco) κατά την περίοδο Ιουνίου-Σεπτεμβρίου. Η ικανότητα αυτή κυμάνθηκε μεταξύ 10%

και 90%, ενώ η αντίστοιχη μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από 10% έως και 23% [65].

Οι εξελίξεις στον τομέα των ημερήσιων ΨΑ έχει εγείρει το ενδιαφέρον των μελετητών τα τελευταία χρόνια. Μεταξύ άλλων, κατασκευάστηκε ένας ΨΑ με επικάλυψη από πυρίτιο (με επιφανειακή ποιότητα καθρέπτη) σε συνδυασμό με μια πολυμερικής φύσης επικάλυψη. Επιτεύχθηκε η μείωση της θερμοκρασίας εντός του ΨΑ κατά $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με την



Διάγραμμα 9. σχηματική αναπαράσταση της επικάλυψης φωτονικής νανοδομής και η πειραματική διάταξη αυτής [40]

ατμοσφαιρική κατά την διάρκεια της μέρας και την νύχτα αντίστοιχα. Ακόμα η θεωρητική καθαρή ψυκτική ικανότητα υπολογίστηκε περί στα $127\text{ W}/\text{m}^2$ κατά την διάρκεια της ημέρας [66]. Όμως ψύκτες ακτινοβολίας με παρόμοιες επικαλύψεις δεν είναι ακόμα ευρέως διαθέσιμη, καθώς υποφέρουν από τα ίδια εμπόδια με αυτούς με επικάλυψη φωτονικής νανοδομής.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος

Τέλος μια αρκετά υποσχόμενη λύση βρέθηκε με την μορφή ενός ύαλο-πολυμερούς μετα-υλικού. Από αυτό κατασκευάστηκε ένα λεπτό φιλμ, με το οποίο μπορεί να επικαλυφθεί ένας ΨΑ. Πειραματική διερεύνηση έδειξε ότι η ψυκτική του ικανότητα φτάνει τα 93 W/m^2 το μεσημέρι, όπου η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει τα $800 - 870 \text{ W/m}^2$ [67]. Αυτό το μετα-υλικό κατασκευάζεται με την τυχαία διάχυση σφαιρών SiO_2 μεγέθους μερικών μικρόμετρων ανάμεσα σε δύο στρώσεις από πολύ-μεθυλπεντάνιο. Η διαδικασία αυτή είναι αφενός οικονομική, αφετέρου είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα.

A.5 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα τελευταία χρόνια το φαινόμενο της ΑΘΝ κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών, αποτελεί το κέντρο ενδιαφέροντος πολλών ερευνητών. Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στον χαρακτηρισμό των ΑΘΝ, την επίδραση του φαινομένου στην κατανάλωση ενέργειας, στην θερμική άνεση (τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους), την ποιότητα του αέρα και διάφορες τεχνικές άμβλυνσης του φαινομένου. Έτσι πολλές πόλεις και πολιτικοί ηγέτες ανά τον κόσμο έχουν ήδη συμπεράνει ότι οι τωρινές πρακτικές της αστικοποίησης δεν είναι βιώσιμες.

Το φαινόμενο της ΑΘΝ, σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες θερμοκρασίες λόγω την κλιματικής αλλαγής, αποτελεί ένα παγκοσμίως σημαντικό ζήτημα τόσο στο παρόν όσο και στο μέλλον. Έτσι πρέπει να γίνουν κατανοητά τόσο οι μηχανισμοί που το διέπουν όσο και οι τρόποι άμβλυνσης του, στο επίπεδο των ήδη υπάρχουσών υποδομών καθώς και σε αυτό του σχεδιασμού των μελλοντικών. Έτσι, η αντιμετώπιση του φαινομένου απαιτεί μια καθολική προσέγγιση που περιλαμβάνει την αύξηση της βλάστησης στις αστικές περιοχές, την χρήση διαπερατών υλικών, την αρχιτεκτονική σχεδίαση με χρήση κατάλληλων τεχνικών (όπως αυτή των επιφανειών νερού) και τα ψυχρά υλικά.

Τα κατασκευαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στο εξωτερικό το κτιρίων καθορίζουν την τάξη μεγέθους την αστικής υπερθέρμανσης, κατά πόσο δηλαδή το κτίριο συμβάλλει στο φαινόμενο της ΑΘΝ αλλά και αυτό επηρεάζει την θερμική άνεση εντός του κτιρίου. Για να αντισταθμιστεί η υπερθέρμανση που προκαλείται από τα συμβατικά υλικά θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υλικά που να διατηρούν την θερμοκρασία της επιφάνειάς τους χαμηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος. Με γνώμονα αυτό, πληθώρα καινοτόμων κατασκευαστικών υλικών έχει μελετηθεί. Από την χρήση υλικών με υψηλό δείκτη ανακλαστικότητας έως και υλικά που αποτελούνται από φωτονικά νανοπολυμερή.

Τέλος για την άμβλυνση του φαινομένου της ΑΘΝ, η χρήση μεθόδων παθητικού δροσισμού κτιρίων αποτελεί μια υποσχόμενη περίπτωση. Την θερινή περίοδο ο παθητικός δροσισμός κτιρίων έχει την ικανότητα να επιτύχει αξιοθαύμαστες μειώσεις στις ενεργειακές ανάγκες για τον δροσισμό των κτιρίων. Συγκεκριμένα, οι νυκτερινοί ΨΑ παρουσιάζουν μεγάλο

ενδιαφέρον, καθώς εμφανίζουν τις μεγαλύτερες διαφορές σε όρους απόλυτης θερμοκρασίας με τον περιβαλλοντικό αέρα. Έτσι η μελέτη ενός νυκτερινού ΨΑ και η διερεύνηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε συνδυασμό με τις παραμέτρους και την αλληλεπίδραση αυτών κρίνεται καίριας σημασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic press.
- [2] Γιαννόπουλος, Α. (2022). Μελέτη φαινομένου θερμικής νησίδας, επίδραση στην ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων. Διδακτορική διατριβή.
- [3] Santamouris, M. (2013). *Energy and climate in the urban built environment*. Routledge.
- [4] Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831.
- [5] Klysik, K., & Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric environment*, 33(24-25), 3885-3895.
- [6] Montávez, J. P., Rodríguez, A., & Jiménez, J. I. (2000). A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 20(8), 899-911.
- [7] Lemonsu, A., & Masson, V. (2002). Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(3), 463-490.
- [8] Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of environmental sciences*, 20(1), 120-128.
- [9] Giannaros, T. M., & Melas, D. (2012). Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, 118, 103-120.
- [10] Gonçalves, A., Ornellas, G., Castro Ribeiro, A., Maia, F., Rocha, A., & Feliciano, M. (2018). Urban cold and heat island in the city of Bragança (Portugal). *Climate*, 6(3), 70.

- [11] Livada, I., Santamouris, M., Niachou, K., Papanikolaou, N., & kakou, G. (2002). Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed. *Theoretical and Applied Climatology*, 71, 219-230.
- [12] Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings*, 25(2), 99-103.
- [13] Taha, H., 2004. Heat Islands and Energy. *Encyclopedia of Energy*. 133 -143.
- [14] Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of environmental sciences*, 20(1), 120-128.
- [15] Mihalakakou, G., Flocas, H. A., Santamouris, M., & Helmis, C. G. (2002). Application of neural networks to the simulation of the heat island over Athens, Greece, using synoptic types as a predictor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(5), 519-527.
- [16] Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of environmental management*, 197, 522-538.
- [17] Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012.
- [18] Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43-56.
- [19] Golden, J. S., & Kaloush, K. E. (2006). Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects. *The international journal of pavement engineering*, 7(1), 37-52.
- [20] Synnefa, A., Polichronaki, E., Papagiannopoulou, E., Santamouris, M., Mihalakakou, G., Doukas, P., ... & Delakou, A. (2003). An experimental investigation of the indoor air quality in fifteen school buildings in Athens, Greece. *International Journal of Ventilation*, 2(3), 185-201.
- [21] Stone, B., Hess, J. J., & Frumkin, H. (2010). Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities?. *Environmental health perspectives*, 118(10), 1425-1428.
- [22] Bagiorgas, H. S., Mihalakakou, G., Rehman, S., & Al-Hadhrami, L. M. (2012). *Offshore wind speed and wind power characteristics for ten locations in Aegean and Ionian Seas*. *Journal of earth system science*, 121, 975-987.
- [23] Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E., & Rodezno, M. C. (2012). Porous asphalt pavement temperature effects for urban heat island analysis. *Transportation Research Record*, 2293(1), 123-130.

- [24] Mihalakakou, G., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Cartalis, C., & Tsangrassoulis, A. (2004). *Simulation of the urban heat island phenomenon in Mediterranean climates*. Pure and Applied Geophysics, 161, 429-451.
- [25] Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., & Luvall, J. (1998). Air pollution prevention through urban heat island mitigation: An update on the Urban Heat Island Pilot Project. *Proceedings of the ACEEE Summer Study, Asilomar, CA*, 9, 23-32.
- [26] Grimmond, S. U. E. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, 173(1), 83-88.
- [27] Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3), 295-310.
- [28] Sailor, D. J. (2006, January). Mitigation of urban heat islands—Recent progress and future prospects. In *Paper presented on american meteorological society 6th symposium on the urban environment and forum on managing our physical and natural resources*.
- [29] Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35(1), 69-76.
- [30] Robitu, M., Musy, M., Inard, C., & Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar energy*, 80(4), 435-447.
- [31] Nuruzzaman, M. (2015). Urban heat island: causes, effects and mitigation measures-a review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67-73.
- [32] Gaitani, N., Mihalakakou, G., & Santamouris, M. (2007). On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Building and Environment*, 42(1), 317-324.
- [33] Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., & Patargias, P. (2007). Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 32(9), 1781-1788.
- [34] Spala, A., Bagiorgas, H. S., Assimakopoulos, M. N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., & Mihalakakou, G. (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 33(1), 173-177.
- [35] Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar energy*, 85(12), 3085-3102.
- [36] ASTM International. (2011). *ASTM E1980-11, Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-sloped Opaque Surfaces*. ASTM Internacional.

- [37] Rawat, M., & Singh, R. N. (2022). A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*, 3(3), 327-347.
- [38] Konopacki, S. J., & Akbari, H. (2001). *Measured energy savings and demand reduction from a reflective roof membrane on a large retail store in Austin*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-47149.
- [39] Tian, D., Zhang, J., & Gao, Z. (2023). *The advancement of research in cool roof: super cool roof, temperature-adaptive roof and crucial issues of application in cities*. *Energy and Buildings*, 113131.
- [40] Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E., & Fan, S. (2014). *Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight*. *Nature*, 515(7528), 540-544.
- [41] Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2020). *Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island*. *Renewable Energy*, 161, 792-807.
- [42] Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. J. S. E. (2006). *A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment*. *Solar Energy*, 80(8), 968-981.
- [43] Mastrapostoli, E., Santamouris, M., Kolokotsa, D., Vassilis, P., Venieri, D., & Gompakis, K. (2016). *On the ageing of cool roofs: Measure of the optical degradation, chemical and biological analysis and assessment of the energy impact*. *Energy and Buildings*, 114, 191-199.
- [44] Takebayashi, H., Miki, K., Sakai, K., Murata, Y., Matsumoto, T., Wada, S., & Aoyama, T. (2016). *Experimental examination of solar reflectance of high-reflectance paint in Japan with natural and accelerated aging*. *Energy and Buildings*, 114, 173-179.
- [45] Pal, S., Contaldi, V., Licciulli, A., & Marzo, F. (2016). *Self-cleaning mineral paint for application in architectural heritage*. *Coatings*, 6(4), 48.
- [46] Zapata, P. A., Rabagliati, F. M., Lieberwirth, I., Catalina, F., & Corrales, T. (2014). *Study of the photodegradation of nanocomposites containing TiO₂ nanoparticles dispersed in polyethylene and in poly (ethylene-co-octadecene)*. *Polymer degradation and stability*, 109, 106-114.
- [47] Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (Eds.). (1996). *Passive cooling of buildings*. Earthscan.
- [48] Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). *Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers*. *Solar energy*, 53(3), 301-305.
- [49] Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). *Use of the ground for heat dissipation*. *Energy*, 19(1), 17-25.
- [50] Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Papanikolaou, N. (1994). *Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers*. *Applied Energy*, 48(1), 19-32.
- [51] Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Tselepidaki, I. (1995). *Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications*. *Solar Energy*, 55(3), 163-173.
- [52] Mihalakakou, G. (2003). *On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques*. *Renewable Energy*, 28(6), 917-927.

- [53] Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M., & Zecchin, R. (2013). *The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 107-116.
- [54] Bagiorgas, H. S., & Mihalakakou, G. J. R. E. (2008). *Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling*. Renewable Energy, 33(6), 1220-1227.
- [55] Chen, L., Zhang, K., Ma, M., Tang, S., Li, F., & Niu, X. (2020, December). Sub-ambient radiative cooling and its application in buildings. In *Building Simulation* (Vol. 13, pp. 1165-1189). Tsinghua University Press.
- [56] Mihalakakou, G., Ferrante, A., & Lewis, J. O. (1998). The cooling potential of a metallic nocturnal radiator. *Energy and buildings*, 28(3), 251-256.
- [57] Granqvist, C. G., & Hjortsberg, A. (1981). Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films. *Journal of Applied Physics*, 52(6), 4205-4220.
- [58] Ge, X., & Sun, X. (1982). Radiation cooling and the effect of spectral selective characteristics of the radiator on cooling power. *Acta energiae solaris sinica*, 3, 128-136.
- [59] Catalanotti, S., Cuomo, V., Piro, G., Ruggi, D., Silvestrini, V., & Troise, G. (1975). The radiative cooling of selective surfaces. *Solar Energy*, 17(2), 83-89.
- [60] Granqvist, C. G., & Hjortsberg, A. (1981). Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films. *Journal of Applied Physics*, 52(6), 4205-4220.
- [61] Nilsson, T. M., Niklasson, G. A., & Granqvist, C. G. (1992). A solar reflecting material for radiative cooling applications: ZnS pigmented polyethylene. *Solar Energy materials and Solar cells*, 28(2), 175-193.
- [62] Orel, B., Gunde, M. K., & Krainer, A. (1993). Radiative cooling efficiency of white pigmented paints. *Solar energy*, 50(6), 477-482.
- [63] Yang, L., Ma, Y., & Zhao, B. (2008). The experiments on radiation cooling of several compounds. *Journal of Functional Materials*, 39(7), 1138-1139.
- [64] Hu, M., Pei, G., Wang, Q., Li, J., Wang, Y., & Ji, J. (2016). Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system. *Applied energy*, 179, 899-908.
- [65] Fernandez, N., Wang, W., Alvine, K. J., & Katipamula, S. (2015). *Energy savings potential of radiative cooling technologies* (No. PNNL-24904). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- [66] Kou, J. L., Jurado, Z., Chen, Z., Fan, S., & Minnich, A. J. (2017). Daytime radiative cooling using near-black infrared emitters. *Acs Photonics*, 4(3), 626-630.

- [67] Zhai, Y., Ma, Y., David, S. N., Zhao, D., Lou, R., Tan, G., ... & Yin, X. (2017). Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. *Science*, 355(6329), 1062-1066.