



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Βαρβάρας Ν. Κατσανού  
Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού  
Υπολογιστών

**ΠΡΟΣΩΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ  
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΥΦΥΪΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

Θεσσαλονίκη 2020





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Βαρβάρας Ν. Κατσανού

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού  
Υπολογιστών

## ΠΡΟΣΩΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΥΦΥΪΑΣ

Διδακτορική Διατριβή

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών  
Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας

### **Εξεταστική Επιτροπή:**

Καθηγητής Δημήτριος Λαμπρίδης, Επιβλέπων  
Καθηγητής Φραγκίσκος Τοπαλής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής  
Επιτροπής  
Αν. Καθηγητής Χαράλαμπος Δημουλιάς, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής  
Επιτροπής  
Καθηγητής Παντελεήμων Μικρόπουλος  
Αν. Καθηγητής Βασίλειος Χατζηαθανασίου  
Επ. Καθηγητής Μηνάς Αλεξιάδης  
Επ. Καθηγητής Χρήστος Δίου



**ΠΡΟΣΩΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ  
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΥΦΥΪΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

© Βαρβάρα Ν. Κατσανού  
©Α.Π.Θ.

ΠΡΟΣΩΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ  
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΕΥΦΥΪΑΣ  
ISBN

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέως» (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)

Στις κόρες μου, Αλίκη και Έλλη





## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης κάθε ατόμου με τον τεχνητό φωτισμό και τα συστήματα σκίασης στον χώρο εργασίας και η εύρεση τεχνικών για να αποτυπώσουν και να μοντελοποιήσουν την συμπεριφορά αυτή, να προβλέψουν τις αντίστοιχες ημερήσιες δράσεις του χρήστη ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και τέλος να προσδιορίζουν για κάθε χρονική στιγμή την βέλτιστη ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του κάθε χρήστη. Η στοχαστικότητα των ανθρώπινων αντιδράσεων και οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του φυσικού φωτός εισάγουν μια έντονη πολυπλοκότητα στους παραπάνω στόχους, αφού προϋποθέτουν τον συνδυασμό μεγάλου αριθμού μεταβλητών. Η κατανόηση της συμπεριφοράς και ο σχεδιασμός των κατάλληλων μοντέλων αποτελούν τους βασικούς άξονες για την εφαρμογή έξυπνων προσωποποιημένων συστημάτων διαχείρισης φωτισμού, με κυμαινόμενο φωτισμό ο οποίος θα ακολουθεί την φυσική ένταση φωτισμού του κάθε χώρου.

Αρχικά μελετάται η επίδραση των εξωτερικών συνθηκών και των δράσεων των χρηστών στην εσωτερική ένταση φωτισμού μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε τρία πανεπιστημιακά γραφεία. Τα δεδομένα των μετρήσεων αξιοποιούνται για την ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς, που αφορά στον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων που κάνει ο χρήστης για να επιτύχει συνθήκες άνεσης στον χώρο του. Η μοντελοποίηση γίνεται με την χρήση καμπυλών συμπεριφοράς, οι οποίες αποδίδουν την πιθανότητα για τον κάθε χρήστη να δράσει συναρτήσει της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του.

Στη συνέχεια δημιουργούνται και αξιολογούνται δύο νέα ξεχωριστά μοντέλα με βάση την μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), που έχουν ως στόχο την πρόβλεψη της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας ανάλογα τις εξωτερικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του κάθε χώρου καθώς και τον προσδιορισμό αντίστοιχων δράσεων που θα εκτελέσει ο κάθε χρήστης υπό τις συνθήκες αυτές.

Τέλος γίνεται χρήση της ασαφούς λογικής για τη δημιουργία ενός νέου προσωποποιημένου μοντέλου που παράγει κάθε στιγμή την τιμή της βέλτιστης έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, βασιζόμενο αποκλειστικά στις μετρήσεις έντασης φωτισμού του κάθε χώρου. Τα βασικά πλεονεκτήματά του είναι ότι παράγει τιμές έντασης φωτισμού που ελαχιστοποιούν την πιθανότητα παρέμβασης του χρήστη και ότι οι ημερήσιες μορφές της προβλεπόμενης έντασης φωτισμού προσεγγίζουν την μορφή της φυσικής έντασης φωτισμού που θα υπήρχε στον κάθε χώρο.

# **Abstract**

The scope of this thesis is to study the interaction of each individual with the artificial lighting and shading systems in an office and to develop techniques for modeling this behavior, predicting the daily actions of the user and finally determining the optimal illuminance on the work-plane of each user depending on external conditions and his unique preferences. The stochastic nature of human reactions and the ever-changing daylight conditions must be quantified, combined and forecasted. Thus, it is necessary to model the behavior of each user and to develop appropriate tools in order to achieve accurate, personalized and energy-efficient control of lighting and shading systems.

Initially, the effect of external conditions and user actions on the internal illuminance is studied using illuminance measurements conducted in three university offices. These data are utilized in the formulation of models which capture the probability for each user to control the artificial lights or the blinds in order to create a comfort environment in his office. This data-driven modeling results in behavioral curves which provide the probability for each user to act, depending on his work-plane illuminance.

In addition, two new separate models are developed and evaluated based on Artificial Neural Networks (ANN) that predict the work-plane illuminance, taking into account the daylight entering the workspace and the special requirements of each user. The illuminance curve due to the external daylight is predicted for each day of the year, depending on the sky type (clear-overcast), the building location and the office orientation. This prediction also takes into account the distance from the windows and the usage of blinds.

Finally, a data-driven fuzzy-based model is provided, that implements the concept of user comfort in an office space, based on illuminance measurements and modeling of occupant behavior. The scope of this model is to determine the current optimal value of work plane illuminance under the respective external conditions, so that visual comfort is achieved for each user. This personalized model can also increase the user acceptability when integrated in a smart lighting and shading control system.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της αυτής τη διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου για την υποστήριξή του όλα αυτά τα χρόνια, σε ευχάριστες και δύσκολες στιγμές. Είναι ένας άνθρωπος πρότυπο ο οποίος μόνο καλά στοιχεία έχει να σου διδάξει. Ήρεμος και σταθερός, ήταν για εμένα βοηθός σε όλη αυτή τη δύσκολη πορεία, χωρίς ποτέ να μου υποδείξει πώς να κάνω το κάθε τί. Τον ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου και ξέρω ότι θα είναι πάντα εκεί για εμένα. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά και τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητές κ. Φραγκίσκο Τοπαλή και κ. Χαράλαμπο Δημουλιά για τις παρατηρήσεις τους και την καθοδήγησή τους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να πω και στον Επίκουρο Καθηγητή Μηνά Αλεξιάδη για την στήριξή του, την καθοδήγησή του και τις πολλές ώρες που περάσαμε στο γραφείο του προσπαθώντας να λύσουμε προβλήματα που προέκυπταν. Μέσα από την συνεργασία μας τον γνώρισα καλύτερα και κατάλαβα την θέλησή του να βοηθά πραγματικά όποιον τον χρειάζεται, χωρίς να υπολογίζει τον κόπο. Θα μου λείπουν οι Κυριακές στο γραφείο με μόνιμο γείτονα τον Καθηγητή κ. Μικρόπουλο που ήταν πάντα εκεί πριν την Ανατολή! Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα και αυτόν που άκουγε τους προβληματισμούς μου και πάντα είχε ένα καλό λόγο να πει.

Οι συγγάτοικοι του γραφείου Αναστασία, Ιωάννα, Άγγελος, Γιώργος και Λευτέρης ήταν πάντα πολλή καλή παρέα, αν και λόγω δουλειάς τον τελευταίο χρόνο δεν τους έβλεπα αρκετά. Εύχομαι σε όλους τους να κάνουν πραγματικότητα τα όνειρά τους γιατί το αξίζουν. Αναστασία, Ιωάννα και Άγγελε καλό τελείωμα! Στο ίδιο γραφείο, πριν κάποια χρόνια, γνώρισα και έναν ακόμα άνθρωπο με τον οποίο ταιριάξαμε τόσο που είμαστε πια οικογένεια. Αποστολή μου σε ευχαριστώ για τα γέλια, την υποστήριξη σε όλα και για τους μετρητές!

Στους γονείς μου θα ήθελα να πω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ για όλη την βοήθειά τους και την εμπιστοσύνη τους όλα αυτά τα χρόνια. Είναι το μεγάλο μαξιλάρι μου σε ό,τι κι αν συμβεί και είμαι πραγματικά τυχερή και περήφανη που είμαι κόρη τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στην Πέννη μου, την αδερφή μου, που είμαι τόσο ευτυχισμένη που την έχω τόσο κοντά μου και δεν έχει χρειαστεί να την αποχωριστώ ούτε για λίγο!

Άφησα στο τέλος την δική μου πια οικογένεια, τον άντρα μου Γιώργο και τις κόρες μου Έλλη και Αλίκη γιατί δεν υπάρχουν λόγια να τους πω πόσο τους αγαπώ και πόσο τους ευχαριστώ για την υπομονή τους και την στήριξή τους. Για τις πολλές ώρες που έλειπα για τη δουλειά και για το διδακτορικό και πάντα με περίμενε μια αγκαλιά και ένα μια γλυκιά κουβέντα όταν επέστρεφα! Τους υπόσχομαι να είμαι πια πολύ περισσότερο μαζί τους! Στο Γιώργο εύχομαι να παραμείνει το χαμογελαστό παιδί που γνώρισα πριν 16 χρόνια και να έχει πάντα αυτή την τρομερή αισιοδοξία που τον χαρακτηρίζει. Στις κόρες μου είναι τόσο πολλά αυτά που θα ήθελα να πω, αλλά είναι σε τέτοια ηλικία ακόμα, που ένα χάδι τα λέει όλα. Τους

αφιερώνω την διατριβή αυτή με όλη μου την καρδιά με την ευχή να γίνουν ανεξάρτητες προσωπικότητες και ποτέ να μην θεωρήσουν πως είναι αργά για να κάνουν τα όνειρά τους πραγματικότητα...

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	1
1.1 Διείσδυση και εκμετάλλευση του φυσικού φωτός.....	2
1.2 Κύριες παραδοχές για τη χρήση φωτισμού και περσίδων .....	4
1.2.1 Διαφορετικότητα ανάμεσα στους χρήστες .....	4
1.2.2 Βασικές μεταβλητές .....	6
1.2.3 Αλληλεπίδραση χρήστη και συστήματος διαχείρισης φωτισμού και περσίδων .....	9
1.3 Μοντελοποίηση συμπεριφοράς .....	10
1.4 Αλγόριθμοι πρόβλεψης .....	11
1.5 Σκοπός και διάρθρωση της διατριβής .....	13
Κεφάλαιο 2: Μετρήσεις και προσομοιώσεις εσωτερικής έντασης φωτισμού .....	17
2.1 Περιγραφή των μελετώμενων χώρων .....	17
2.2 Μεθοδολογία μετρήσεων .....	19
2.3 Ανάλυση μετρήσεων.....	23
2.3.1 Επίδραση της κατάστασης του ουρανού στην εσωτερική ένταση φωτισμού .....	23
2.3.2 Επίδραση της εποχής στην εσωτερική ένταση φωτισμού.....	24
2.3.3 Επίδραση των δράσεων των χρηστών στην εσωτερική ένταση φωτισμού ....	26
2.3.4 Διαφορετικότητα των δράσεων χρηστών σε γραφεία με ίδιο προσανατολισμό .....	31
2.3.5 Επίδραση του προσανατολισμού στην εσωτερική ένταση φωτισμού .....	32
2.3.6 Μέσο ημερήσιο προφίλ εσωτερικής έντασης φωτισμού ανά μήνα .....	34
2.3.7 Αποκλίσεις στο μέσο ημερήσιο προφίλ εσωτερικής έντασης φωτισμού .....	38
2.3.8 Κατανομή τιμών εσωτερικής έντασης φωτισμού.....	42
2.4 Προσομοιώσεις Έντασης φωτισμού .....	43
2.4.1 Επίδραση της απόστασης της θέσης εργασίας από τα παράθυρα .....	46

2.4.2	Επίδραση της εποχής και του προσανατολισμού στην ένταση φωτισμού .....	48
2.4.3	Επίδραση της ρύθμισης των περσίδων στην ένταση φωτισμού.....	49
Κεφάλαιο 3:	Μοντελοποίηση κατάστασης του ουρανού και υπολογισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας.....	50
3.1	Υπολογισμοί για οριζόντιο επίπεδο.....	50
3.2	Υπολογισμοί σε κεκλιμένο επίπεδο .....	56
Κεφάλαιο 4:	Μοντελοποίηση συμπεριφοράς χρηστών.....	59
4.1	Κατανόηση δράσεων χρηστών.....	60
4.2	Καταγραφή και ανίχνευση δράσεων χρηστών.....	62
4.3	Μεθοδολογία μοντελοποίησης συμπεριφοράς χρήστη.....	67
4.3.1	Μοντελοποίηση των δράσεων των χρηστών .....	67
4.3.2	Μοντελοποίηση της καθυστέρησης δράσης και της ανοχής των χρηστών.....	73
Κεφάλαιο 5:	Μοντέλα πρόβλεψης της εσωτερικής έντασης φωτισμού και των δράσεων κάθε χρήστη.....	81
5.1	Πρώτο μοντέλο πρόβλεψης.....	83
5.2	Δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης .....	92
5.3	Εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης για εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης .....	97
Κεφάλαιο 6:	Μοντέλο προσδιορισμού της επιθυμητής εσωτερικής έντασης φωτισμού με βάση την ασαφή λογική .....	103
6.1	Βασικές αρχές και στόχοι του προτεινόμενου μοντέλου ασαφούς λογικής .....	104
6.2	Σύντομη περιγραφή ενός συστήματος ασαφούς λογικής .....	106
6.3	Ανάλυση των εισόδων του μοντέλου ασαφούς λογικής .....	108
6.4	Καθορισμός του τρόπου αποτίμησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου ασαφούς λογικής.....	114
6.5	Σύγκριση και αποτίμηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών του μοντέλου ασαφούς λογικής .....	117

6.5.1 Αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης για τον Χρήστη 1 .....	118
6.5.2 Αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης για τον Χρήστη 2 .....	122
6.5.3 Αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης για τον Χρήστη 3 .....	127
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.....	132
7.1 Ανασκόπηση της διατριβής .....	132
7.2 Συμβολή της διατριβής .....	135
7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	137
Αναφορές .....	139

## Σχήματα

Σχήμα 2-1 Τοποθεσία και προσανατολισμός του κτιρίου Δ' .....	17
Σχήμα 2-2 Δυτική και Ανατολική όψη του κτιρίου Δ' .....	18
Σχήμα 2-3 Κάτοψη των μελετώμενων γραφείων και θέσεις μετρητικών διατάξεων. ....	18
Σχήμα 2-4 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για δύο ημέρες με διαφορετική κατάσταση ουρανού, χωρίς παρουσία χρήστη. ....	24
Σχήμα 2-5 Καταγραφές έντασης φωτισμού για μία ημέρα του Χειμώνα και μία του Καλοκαιριού με παρόμοια κατάσταση ουρανού, χωρίς παρουσία χρήστη. ....	25
Σχήμα 2-6 Χρονοσειρές οριζόντιας και κάθετης ακτινοβολίας για τις ημέρες του Σχήματος 2-5. ....	26
Σχήμα 2-7 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για δύο ημέρες του Μαΐου, με παρουσία και απουσία χρηστών. ....	27
Σχήμα 2-8 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για δύο ημέρες του Ιουλίου, με παρουσία και απουσία χρηστών. ....	28
Σχήμα 2-9 Καταγραφές έντασης φωτισμού για τρεις ημέρες του Ιανουαρίου όπου γίνεται εμφανής η χρήση του τεχνητού φωτισμού. ....	29
Σχήμα 2-10 Καταγραφές ακτινοβολίας για τις τρεις ημέρες του Σχήματος 2-9. ....	29
Σχήμα 2-11 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για τρεις ημέρες με όμοια κατάσταση ουρανού όπου φαίνεται η επίδραση της συμπεριφοράς του χρήστη. ....	30
Σχήμα 2-12 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για την ίδια ημέρα με καθαρό ουρανό, σε δύο γραφεία με όμοιο προσανατολισμό. ....	31
Σχήμα 2-13 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για την ίδια ημέρα με μερικώς νεφελώδη ουρανό, σε δύο γραφεία με όμοιο προσανατολισμό. ....	32
Σχήμα 2-14 Καταγραφές έντασης φωτισμού για ημέρα με καθαρό ουρανό, στο Γραφείο 1 (με ΝΔ προσανατολισμό) και στο Γραφείο 3 (με ΒΑ προσανατολισμό), χωρίς παρουσία χρήστη. ....	33
Σχήμα 2-15 Καταγραφές έντασης φωτισμού για ημέρα με νεφосκεπή ουρανό, στο Γραφείο 1 (με ΝΔ προσανατολισμό) και στο Γραφείο 3 (με ΒΑ προσανατολισμό), με παρουσία χρήστη. ....	34
Σχήμα 2-16 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού ανά μήνα για τις ώρες παρουσίας του χρήστη, Γραφείο 1. ....	35



Σχήμα 2-17 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού ανά μήνα για τις ώρες παρουσίας του χρήστη, Γραφείο 2.....	36
Σχήμα 2-18 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού ανά μήνα για τις ώρες παρουσίας του χρήστη, Γραφείο 3.....	37
Σχήμα 2-19 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού για το μήνα Ιανουάριο στα τρία γραφεία.....	38
Σχήμα 2-20 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού για το μήνα Ιούνιο στα τρία γραφεία.....	38
Σχήμα 2-21 Μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού και τυπική απόκλιση για ένα έτος, για το Γραφείο 1.....	40
Σχήμα 2-22 Μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού και τυπική απόκλιση για ένα έτος, για το Γραφείο 2.....	41
Σχήμα 2-23 Μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού και τυπική απόκλιση για ένα έτος, για το Γραφείο 3.....	42
Σχήμα 2-24 Κατανομή τιμών εσωτερικής έντασης φωτισμού (κατά τις ώρες παρουσίας χρηστών) για τα τρία Γραφεία.....	43
Σχήμα 2-25 Σύγκριση μεταξύ καταγραφών και προσομοιώσεων της έντασης φωτισμού για μία ημέρα με καθαρό ουρανό στο Γραφείο 1.....	45
Σχήμα 2-26 Σύγκριση μεταξύ καταγραφών και προσομοιώσεων της έντασης φωτισμού για μία ημέρα με νεφосκεπή ουρανό στο Γραφείο 1.....	45
Σχήμα 2-27 Προσομοίωση εσωτερικής έντασης φωτισμού για χώρο όμοιο με το Γραφείο 1 για τέσσερις προσανατολισμούς και τρεις αποστάσεις της θέσης εργασίας από τα παράθυρα.....	47
Σχήμα 2-28 Προσομοίωση εσωτερικής έντασης φωτισμού για μία ημέρα του Ιανουαρίου και μία του Ιουλίου, με καθαρό ουρανό, για τέσσερις προσανατολισμούς.....	48
Σχήμα 2-29 Προσομοίωση περιορισμού της εσωτερικής έντασης φωτισμού με σταδιακή ρύθμιση των περσίδων, για τέσσερις προσανατολισμούς.....	49
Σχήμα 3-1 Υπολογισμός δείκτη καθαρότητας ουρανού και συνιστωσών ακτινοβολίας με χρήση του μοντέλου Reindl για ένα τρίμηνο του Ιουλίου.....	53
Σχήμα 3-2 Μέσες μηνιαίες τιμές για τον δείκτη καθαρότητας ουρανού και τις συνιστώσες της ακτινοβολίας για την περίοδο των μετρήσεων.....	54
Σχήμα 3-3 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ του κλάσματος διάχυσης και του δείκτη καθαρότητας ουρανού για το διάστημα ενός έτους.....	55

Σχήμα 3-4 Κατανομή τιμών του δείκτη καθαρότητας ουρανού και του κλάσματος διάχυσης για το διάστημα ενός έτους. ....	55
Σχήμα 3-5 Υπολογισμός συνιστωσών ακτινοβολίας σε κάθετη επιφάνεια, με χρήση της Εξίσωσης 3.16 για τρεις ημέρες του Σεπτεμβρίου με διαφορετική κατάσταση ουρανού. ....	58
Σχήμα 4-1 Καταγραφές έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας για δύο διαδοχικές ημέρες στο ίδιο γραφείο (το διάστημα παρουσίας του χρήστη παρουσιάζεται με κάθετες διακεκομμένες γραμμές). ....	63
Σχήμα 4-2 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού (E) στις οποίες πραγματοποιήθηκε άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού για κάθε ένα από τους τρεις χρήστες.....	64
Σχήμα 4-3 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού (E) στις οποίες πραγματοποιήθηκε κλείσιμο των περσίδων για κάθε ένα από τους τρεις χρήστες. ....	65
Σχήμα 4-4 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού πριν και μετά την χρήση (άνοιγμα) του τεχνητού φωτισμού, για τον Χρήστη 1.....	66
Σχήμα 4-5 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού πριν και μετά την χρήση (κλείσιμο) των περσίδων, για τον Χρήστη 1. ....	66
Σχήμα 4-6 Πιθανοτικές καμπύλες συμπεριφοράς για το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού για τους τρεις Χρήστες.....	69
Σχήμα 4-7 Πιθανοτικές καμπύλες συμπεριφοράς για το κλείσιμο των περσίδων για τους τρεις Χρήστες.....	69
Σχήμα 4-8 Εφαρμογή του μοντέλου συμπεριφοράς για το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού σε μία ημερήσια χρονοσειρά έντασης φωτισμού για τους τρεις Χρήστες.....	72
Σχήμα 4-9 Εφαρμογή του μοντέλου συμπεριφοράς για το κλείσιμο των περσίδων σε μία ημερήσια χρονοσειρά έντασης φωτισμού για τους τρεις Χρήστες.....	73
Σχήμα 4-10 Παράδειγμα εφαρμογής της πρώτης προσέγγισης για τον υπολογισμό της καθυστέρησης δράσης και της σωρευτικής έκθεσης του Χρήστη.....	74
Σχήμα 4-11 Μέση τιμή της χρονικής καθυστέρησης δράσης, $\Delta t_{U1}$ , για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - πρώτη προσέγγιση.....	75
Σχήμα 4-12 Μέση τιμή της σωρευτικής έκθεσης, $EXP_{U1}$ , για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - πρώτη προσέγγιση. ....	76
Σχήμα 4-13 Παράδειγμα εφαρμογής της δεύτερης προσέγγισης για τον υπολογισμό της καθυστέρησης δράσης και της σωρευτικής έκθεσης του Χρήστη.....	78

Σχήμα 4-14 Μέση τιμή της χρονικής καθυστέρησης δράσης, για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - δεύτερη προσέγγιση. ....	79
Σχήμα 4-15 Μέση τιμή της σωρευτικής έκθεσης, για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - δεύτερη προσέγγιση. ....	79
Σχήμα 5-1 Συντελεστές ετεροσυσχέτισης εισόδων - εξόδων για το πρώτο μοντέλο πρόβλεψης.....	86
Σχήμα 5-2 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (για λογαριθμικές τιμές έντασης φωτισμού) για διαφορετικές τοπολογίες του ΤΝΔ - πρώτο Μοντέλο.....	87
Σχήμα 5-3 Ημερήσιες πραγματικές και προβλεφθείσες τιμές έντασης φωτισμού με ανοικτές περσίδες ( $E$ ), και με κλειστές περσίδες ( $E_{BL}$ ), για 8 προσανατολισμούς.....	88
Σχήμα 5-4 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των προβλέψεων έντασης φωτισμού του πρώτου μοντέλου και των αντίστοιχων πραγματικών τιμών. ....	89
Σχήμα 5-5 Μέσο Ημερήσιο προφίλ σφάλματος για τις δύο εξόδους ( $E$ και $E_{BL}$ ) του πρώτου μοντέλου πρόβλεψης.....	89
Σχήμα 5-6 Παράδειγμα μετασχηματισμού των πραγματικών και των προβλεφθεισών τιμών έντασης φωτισμού του Σχήματος 5-3 σε πιθανότητες δράσης.....	90
Σχήμα 5-7 Παράδειγμα μετασχηματισμού των πραγματικών και των προβλεφθεισών τιμών έντασης φωτισμού του Σχήματος 5-3 στη συνολική πιθανότητα χρήσης του τεχνητού φωτισμού (με ανοικτές ή κλειστές περσίδες). ....	91
Σχήμα 5-8 Μέσο ημερήσιο προφίλ σφάλματος για τις πιθανότητες δράσεων του Χρήστη 1 – πρώτο μοντέλο.....	92
Σχήμα 5-9 Συντελεστές ετεροσυσχέτισης εισόδων - εξόδων για το δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης.....	94
Σχήμα 5-10 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα για διαφορετικές τοπολογίες ΤΝΔ για κάθε Χρήστη - δεύτερο Μοντέλο. ....	95
Σχήμα 5-11 Μέσο ημερήσιο προφίλ σφάλματος για τις πιθανότητες δράσεων του Χρήστη 1 - δεύτερο μοντέλο.....	96
Σχήμα 5-12 Κατανομή τιμών έντασης φωτισμού για το Χειμερινό Εξάμηνο ανά προσανατολισμό γραφείου. Επισημαίνεται ότι το 24% των τιμών για το Νότιο προσανατολισμό βρίσκεται πάνω από τα 3000 Lux.....	98
Σχήμα 5-13 Κατανομή τιμών έντασης φωτισμού για το Καλοκαιρινό Εξάμηνο ανά προσανατολισμό γραφείου. Επισημαίνεται ότι το 20% των τιμών για τον Ανατολικό, το 20% για το Δυτικό και το 9% για τον Νότιο προσανατολισμό βρίσκονται πάνω από τα 3000 Lux. ....	99

Σχήμα 5-14 Εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό με ανοικτές ( $K_{open}$ ) ή κλειστές περσίδες ( $K_{closed}$ ) ανά εποχή και προσανατολισμό για τους Χρήστες 2 και 3. ....	102
Σχήμα 6-1 Μέσο ημερήσιο προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο σύνολο των δεδομένων, για τους τρεις χρήστες για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και την θερινή (δεξιά) περίοδο. ....	110
Σχήμα 6-2 Μέσο ημερήσιο προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο σύνολο των δεδομένων, για τους τρεις χρήστες για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά). ....	111
Σχήμα 6-3 Μέσο ημερήσιο προφίλ της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας στο σύνολο των δεδομένων, για τους τρεις χρήστες για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά). ....	112
Σχήμα 6-4 Μέσο ημερήσιο προφίλ της συνολικής κάθετης και τις άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, στο σύνολο των δεδομένων, για τους χρήστες 1 και 3 για νεφосκεπή, μερικώς νεφελώδη και καθαρό ουρανό. ....	113
Σχήμα 6-5 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 6 και 8, για τον Χρήστη 1, για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και τη θερινή περίοδο (δεξιά). ....	119
Σχήμα 6-6 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 6 και 8, για τον Χρήστη 1, για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά). ....	120
Σχήμα 6-7 Σύγκριση δεδομένων έντασης φωτισμού και αντίστοιχων προβλέψεων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, για τρεις εκδοχές του μοντέλου ασαφούς λογικής για τον Χρήστη 1. ....	121
Σχήμα 6-8 Επιμέρους αποτελέσματα ανά Ζώνη Άνεσης για το μοντέλο 1 του Χρήστη 1. ....	122
Σχήμα 6-9 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 2, 6 και 7, για τον Χρήστη 2, για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και τη θερινή περίοδο (δεξιά). ....	124
Σχήμα 6-10 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 2, 6 και 7, για τον Χρήστη 2, για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά). ....	125

Σχήμα 6-11 Σύγκριση δεδομένων έντασης φωτισμού και αντίστοιχων προβλέψεων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, για τρεις εκδοχές του μοντέλου ασαφούς λογικής για τον Χρήστη 2.....	126
Σχήμα 6-12 Επιμέρους αποτελέσματα ανά Ζώνη Άνεσης για το μοντέλο 2 του Χρήστη 2. ...	126
Σχήμα 6-13 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 2 και 4, για τον Χρήστη 3, για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και τη θερινή περίοδο (δεξιά). ....	128
Σχήμα 6-14 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 2 και 4, για τον Χρήστη 3, για νεφροσκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά).....	129
Σχήμα 6-15 Σύγκριση δεδομένων έντασης φωτισμού και αντίστοιχων προβλέψεων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, για τρεις εκδοχές του μοντέλου ασαφούς λογικής για τον Χρήστη 3.....	130
Σχήμα 6-16 Επιμέρους αποτελέσματα ανά Ζώνη Άνεσης για το μοντέλο 8 του Χρήστη 3. ...	131

## Πίνακες

Πίνακας 2-1 Στοιχεία του συστήματος φωτισμού στα μελετώμενα γραφεία.....	19
Πίνακας 2-2 Μεθοδολογία ερμηνείας μετρήσεων.....	21
Πίνακας 2-3 Τιμές της κατανομής έντασης φωτισμού για τα τρία Γραφεία.....	42
Πίνακας 2-4 Χρονικές περίοδοι με σταθερό ποσοστό μείωσης της έντασης φωτισμού ανάλογα με την απόσταση από το παράθυρο .....	47
Πίνακας 4-1 Τιμές παραμέτρων των εξισώσεων 17-19 και αντίστοιχα σφάλματα προσαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου για τους τρεις Χρήστες.....	70
Πίνακας 5-1 Είσοδοι και Έξοδοι του πρώτου μοντέλου πρόβλεψης.....	84
Πίνακας 5-2 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα του πρώτου μοντέλου στην πρόβλεψη των πιθανοτήτων δράσεων των τριών Χρηστών.....	91
Πίνακας 5-3 Είσοδοι και Έξοδοι του δεύτερου μοντέλου πρόβλεψης.....	93
Πίνακας 5-4 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα του δεύτερου μοντέλου στην πρόβλεψη των πιθανοτήτων δράσεων των τριών Χρηστών.....	96
Πίνακας 5-5 Εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό ανά εποχή και προσανατολισμό για τους τρεις Χρήστες.....	100
Πίνακας 5-6 Εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό με ανοικτές ( $K_{open}$ ) ή κλειστές περσίδες ( $K_{closed}$ ) ανά εποχή και προσανατολισμό για τους τρεις Χρήστες.....	101
Πίνακας 6-1 Εύρος εντάσεων φωτισμού και ποσοστά τιμών ανά Ζώνη Άνεσης για τους τρεις χρήστες.....	115
Πίνακας 6-2 Περιπτώσεις συνδυασμών πραγματικών τιμών και αντίστοιχων προβλέψεων.....	116
Πίνακας 6-3 Μέση απόσταση των τιμών έντασης φωτισμού από την κάθε Ζώνη Άνεσης, ανά χρήστη.....	117
Πίνακας 6-4 Είσοδοι και αποτελέσματα των πιο επιτυχημένων εκδοχών του ασαφούς μοντέλου για τον Χρήστη 1.....	118
Πίνακας 6-5 Είσοδοι και αποτελέσματα των πιο επιτυχημένων εκδοχών του ασαφούς μοντέλου για τον Χρήστη 2.....	123
Πίνακας 6-6 Είσοδοι και αποτελέσματα των πιο επιτυχημένων εκδοχών του ασαφούς μοντέλου για τον Χρήστη 3.....	128



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η ενέργεια που δαπανάται στον κτιριακό τομέα κατέχει ένα σημαντικό μερίδιο της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας παγκοσμίως. Το ποσοστό αυτό στην Ευρώπη ανέρχεται σε 40% της ετήσιας κατανάλωσης [1]. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την κατανάλωση ενέργειας σε ένα κτίριο είναι τα δομικά χαρακτηριστικά του (κέλυφος, δομικός σχεδιασμός), οι κλιματικές συνθήκες, τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για φωτισμό, θέρμανση και ψύξη και τέλος η συμπεριφορά των χρηστών του κάθε κτιρίου [2]. Αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο το ότι σε κτίρια γραφείων, η ενεργειακή συμπεριφορά των χρηστών τους διαμορφώνει την ζητούμενη ενέργεια σε ποσοστό άνω του 30% [3]. Παράλληλα, σε κτίρια γραφείων καθώς και άλλα εμπορικά κτίρια, η ενέργεια που δαπανάται για φωτισμό συνιστά περίπου το 25% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας τους [4].

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των συστημάτων φωτισμού παρουσιάζει μία ριζική μεταστροφή, προσπαθώντας να εισάγει ευφείς και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις [5][6][7]. Τα μελλοντικά συστήματα φωτισμού θα στοχεύουν λοιπόν τόσο στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (με χρήση λαμπτήρων χαμηλής ισχύος, εκμετάλλευση του φυσικού φωτός) όσο και στην ικανοποίηση των χρηστών από το επίπεδο φωτισμού στον χώρο εργασίας. Αυτή τη στιγμή, ο σχεδιασμός φωτισμού βασίζεται στο πρότυπο EN12464-1 [8] το οποίο προτείνει συγκεκριμένες τιμές έντασης φωτισμού για κάθε χώρο ανάλογα με την εργασία που εκτελείται σε αυτόν. Για χώρους γραφείων η προτεινόμενη τιμή είναι 500 Lux, ωστόσο δεν λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιαίτερες προτιμήσεις του χρήστη. Στο πρότυπο αναφέρεται η επίδραση που έχει ο σωστός φωτισμός τόσο στην οπτική άνεση των χρηστών όσο και στην ψυχολογία τους, ωστόσο δεν προτείνονται μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της άνεσης ή της όχλησης (εξαιτίας της θάμβωσης) για τον κάθε χρήστη.

Καινοτομία λοιπόν των έξυπνων συστημάτων φωτισμού θα είναι ο κάθε χρήστης να αντιμετωπίζεται ξεχωριστά με βάση τις προτιμήσεις και τις συνήθειες του και όχι να εφαρμόζονται κοινοί τρόποι ελέγχου για όλους τους χρήστες. Ο σχεδιασμός του επιπέδου φωτισμού σε ένα χώρο, ανάλογα μόνο με το είδος της εργασίας που εκτελείται μέσα σε αυτόν, έρχεται σε αντίθεση με την πραγματική φύση της ανθρώπινης συμπεριφοράς η οποία είναι πολύπλοκη και μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στους χρήστες που εκτελούν την ίδια εργασία. Η προσέγγιση αυτή χαρακτηρίζει την έρευνα σήμερα σε όλα τα συστήματα διαχείρισης φορτίων ενός κτιρίου (θέρμανση, κλιματισμός, φωτισμός), με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης που να ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε χρήστη.

Με βάση τα παραπάνω, τα συστήματα φωτισμού θα πρέπει να χρησιμοποιούν αλγόριθμους λήψης αποφάσεων (decision making algorithms), οι οποίοι θα βρίσκουν την



ισορροπία μεταξύ της ικανοποίησης των απαιτήσεων των χρηστών ενός εργασιακού χώρου και της αποδοτικής διαχείρισης ενέργειας. Μία τέτοια προσέγγιση θεωρείται σήμερα σωστή μιας και έρευνες έχουν δείξει ότι συστήματα διαχείρισης φωτισμού που στοχεύουν μόνο στην εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψη τις προτιμήσεις των χρηστών μπορεί να μην φέρουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα καθώς δεν τυγχάνουν της αποδοχής τους [9][10].

Επιπρόσθετα, η εκτίμηση των προφίλ κατανάλωσης ανά κατηγορία φορτίων (π.χ. φωτισμός, κλιματισμός, θέρμανση κλπ.) βάσει των ρυθμίσεων και δράσεων των χρηστών τους, αποτελεί προϋπόθεση για την αξιόπιστη πρόβλεψη της συνολικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου [11][12][13]. Οι γνώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη διαμόρφωση των κατάλληλων κινήτρων για την αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών σε σενάρια απόκρισης ζήτησης [14]. Τα αντίστοιχα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας εκτιμούνται στο 20% της υφιστάμενης κατανάλωσης, ωστόσο η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στις αντίστοιχες μελέτες [15].

Η μελέτη της αλληλεπίδρασης του κάθε ατόμου με τον φωτισμό στον χώρο εργασίας αποτελεί μία πρόκληση, καθώς η στοχαστικότητα των ανθρώπινων αντιδράσεων και οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του φυσικού φωτός πρέπει να ποσοτικοποιηθούν, να συνδυαστούν και να προβλεφθούν. Προς το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η εξαγωγή μεθόδων μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη καθώς και η ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης ώστε να επιτυγχάνεται ο ακριβής, προσωποποιημένος και ενεργειακά ωφέλιμος ταυτόχρονος έλεγχος της χρήσης των φωτιστικών σωμάτων και των πιθανών συστημάτων σκίασης. Τέτοιες προσεγγίσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη μία σειρά συνεχώς μεταβαλλόμενων παραμέτρων που εξαρτώνται από τις εξωτερικές συνθήκες και την αντίστοιχη διεύθυνση του φυσικού φωτός στο χώρο.

## **1.1 Διείσδυση και εκμετάλλευση του φυσικού φωτός**

Ο πρώτος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να κατανοηθεί ώστε να χρησιμοποιηθεί σε προσωποποιημένα συστήματα διαχείρισης φωτισμού είναι το φυσικό φως και η επίδρασή του στην ψυχολογία και την αντίληψη του κάθε ατόμου. Η έκθεση του ανθρώπου σε αυτό έχει αποδειχθεί ότι επιφέρει σημαντικά και μετρήσιμα οφέλη στην υγεία και στην ψυχολογία του [16][17]. Αντίθετα, η πολύωρη παραμονή ενός ατόμου αποκλειστικά σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές του κιρκάδιου ρυθμού, της διάθεσης και της συμπεριφοράς. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή σταθερών επιπέδων έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας ενός ατόμου θεωρείται από πολλούς ερευνητές λανθασμένη καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι τα ανθρώπινα σώματα χρειάζονται φωτισμό όσο το δυνατόν συντονισμένο στον φυσικό ημερήσιο κύκλο (natural daily cycle) [18][19]. Αυτό επιβεβαιώνεται και σε έρευνες όπου αναλύονται οι πεποιθήσεις των χρηστών σχετικά με τα οφέλη της

έκθεσης στο φυσικό φως. Η ανάλυση των Veitch et al. [20], έδειξε ότι οι χρήστες πιστεύουν ότι ο φυσικός φωτισμός σε ένα χώρο είναι προτιμότερος από τον τεχνητό και παράλληλα ότι η υπερβολική έκθεση σε τεχνητό φωτισμό σχετίζεται με την εμφάνιση προβλημάτων υγείας [21]. Ακόμα μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση προέκυψε από την μελέτη των Inoue et al. [22] στην οποία αναφέρεται ότι η πλειοψηφία των χρηστών σε ένα χώρο γραφείου προτιμούν να κάθονται σε θέσεις κοντά στα παράθυρα, αν και είναι γνωστό ότι στις θέσεις αυτές η ηλιακή ακτινοβολία, άρα και οι θαμβώσεις που αυτή προκαλεί, είναι εντονότερες. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η επιθυμία των χρηστών να έχουν οπτική σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον μπορεί να τους κάνει να αυξήσουν τα όρια ανοχής τους και να λειτουργούν σε συνθήκες μικρότερης οπτικής ή θερμικής άνεσης.

Παράλληλα, η εκμετάλλευση του φυσικού φωτός μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας σε έναν εργασιακό χώρο. Οι Bourgeois, Reinhart and Macdonald [23] έδειξαν ότι σε ένα χώρο γραφείου όπου οι χρήστες εκμεταλλεύονται το φυσικό φως, η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό μπορεί να μειωθεί τουλάχιστον κατά 40% σε σχέση με τη χρήση μόνο τεχνητού φωτισμού στον ίδιο χώρο. Τα σημαντικά ενεργειακά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού σε χώρους γραφείων έχουν προσδιοριστεί και από άλλες μελέτες [24][25]. Ωστόσο η εκμετάλλευση του φυσικού φωτός εισάγει ταυτόχρονα μία σειρά ανεπιθύμητων παραγόντων όπως την αύξηση της θερμοκρασίας των χώρων, την δημιουργία θαμβώσεων στην επιφάνεια εργασίας και την αύξηση της εσωτερικής έντασης φωτισμού σε επίπεδα μη αποδεκτά από τους χρήστες. Για το λόγο αυτό σε κτίρια γραφείων με μεγάλα παράθυρα, όπου η απρόσκοπτη διείσδυση του φυσικού φωτός μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, πρέπει να βρεθεί η σωστή ισορροπία κάθε στιγμή ανάμεσα στα οφέλη του φυσικού φωτός και στα ανεπιθύμητα αποτελέσματά του στην οπτική άνεση των χρηστών [26][27].

Με βάση τα παραπάνω, οι παράγοντες που πρέπει να προσδιοριστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη χρήση του φυσικού φωτός σε ένα χώρο είναι δύο. Ο πρώτος αφορά στα επίπεδα εσωτερικής έντασης φωτισμού που προκύπτουν κάθε στιγμή στο χώρο βάσει των εξωτερικών συνθηκών και ο δεύτερος την οπτική άνεση του κάθε χρήστη στα διαφορετικά αυτά επίπεδα έντασης φωτισμού. Η εκτίμηση της εσωτερικής έντασης φωτισμού συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας προϋποθέτει ιδιαίτερα πολύπλοκους υπολογισμούς καθώς η εσωτερική ένταση φωτισμού αλλάζει δυναμικά, βάσει μίας πληθώρας παραγόντων όπως η ώρα της ημέρας, η εποχή του έτους, η κατάσταση του ουρανού, ο προσανατολισμός του κτιρίου, η γεωμετρία του χώρου, η απόσταση της θέσης εργασίας από τα παράθυρα κλπ. Αν σε αυτά προστεθεί και η χρήση συστημάτων σκίασης στα παράθυρα (περσίδες) η παραπάνω εκτίμηση γίνεται ακόμα πιο δύσκολη. Η εισαγωγή κατάλληλων μεθόδων για τον υπολογισμό του φυσικού φωτός που εισέρχεται σε ένα χώρο

καθώς και ο συσχετισμός του φωτός αυτού με ηλιακά κέρδη και την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα [28][29][30][31][32].

Οι εξωτερικές συνθήκες έντασης φωτισμού καθώς και η αντίστοιχη διείσδυση φυσικού φωτός σε έναν εσωτερικό χώρο επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τις δράσεις των χρηστών σε ότι αφορά στην ενεργοποίηση του τεχνητού φωτισμού αλλά και την ρύθμιση των περσίδων στα παράθυρα. Οι δράσεις αυτές προκαλούνται είτε από την οπτική όχληση που αισθάνεται ο χρήστης είτε από άλλες αιτίες, όπως η συνήθεια, η επιθυμία για θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον, η επιθυμία για ιδιωτικότητα κλπ. Η συχνότητα εμφάνισης των δράσεων αυτών αλλά και τα επίπεδα εσωτερικής έντασης φωτισμού στα οποία γίνονται διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα σε χρήστες που εκτελούν την ίδια εργασία, όπως έχει διαπιστωθεί σε πολλές μελέτες πεδίου [18][33][34][35][36]. Τα συμπεράσματά τους υπογραμμίζουν την διαφορετικότητα στις επιθυμίες κάθε χρήστη σε σχέση με το φωτισμό και αναδεικνύουν την ανάγκη για σχεδιασμό προσωποποιημένων συστημάτων φωτισμού.

## **1.2 Κύριες παραδοχές για τη χρήση φωτισμού και περσίδων**

Σε ένα κτίριο γραφείων μπορεί να δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να επεμβαίνουν στα συστήματα φωτισμού, θέρμανσης, κλιματισμού αλλά και να ρυθμίζουν το άνοιγμα των παραθύρων και των περσίδων προσπαθώντας να βελτιώσουν το αίσθημα άνεσης μέσα στο χώρο εργασίας τους (αλληλεπίδραση χρήστη – κτιρίου). Οι ρυθμίσεις αυτές των χρηστών μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τις επιθυμίες τους και άρα να καθοδηγήσουν τους διαχειριστές στην επιλογή κατάλληλων συστημάτων ελέγχου τα οποία να τυγχάνουν της αποδοχής τους. Προς το σκοπό αυτό θα πρέπει αρχικά να καταγραφούν οι ρυθμίσεις αυτές και να βρεθεί η αιτία που οδηγεί τον κάθε χρήστη στο να τις πραγματοποιήσει. Στην συνέχεια θα πρέπει να δημιουργηθούν αξιόπιστα μοντέλα προσομοίωσης, βασιζόμενα στις προηγούμενες παρατηρήσεις, που θα μπορούν να αναπαριστούν αυτή τη διαφορετικότητα και την τυχαιότητα της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη σε σχέση με τον τεχνητό φωτισμό και την χρήση των περσίδων.

### **1.2.1 Διαφορετικότητα ανάμεσα στους χρήστες**

Η προσωποποιημένη προσέγγιση στον ενεργειακό σχεδιασμό είναι πολύ σημαντική αφού οι πραγματικοί χρήστες μπορεί να συμπεριφέρονται πολύ διαφορετικά από αυτό που τα διάφορα πρότυπα σχεδιασμού ορίζουν. Όπως σημειώνουν οι Clevenger και Haymaker [37], η επίδραση της τυχαιότητας της ανθρώπινης συμπεριφοράς στα μοντέλα πρόβλεψης της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων είναι κρίσιμη και ουσιώδης. Χαρακτηριστικά αναφέρουν ότι τα αποτελέσματα του ίδιου μοντέλου πρόβλεψης μπορεί να διαφέρουν έως και 150% μεταξύ τους, ανάλογα με τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με τον χρήστη. Η συμπεριφορά των χρηστών αναφέρεται επίσης ως ο κύριος λόγος της

απόκλισης μεταξύ των προσομοιώσεων και των μετρούμενων τιμών της ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου [37][39][40][41].

Η ενέργεια που καταναλώνεται στα συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού, φωτισμού και σκίασης σε ένα κτίριο γραφείων επηρεάζεται από την παρουσία ή όχι των χρηστών (ωράριο εργασίας) και από τις παρεμβάσεις/ ρυθμίσεις που αυτοί κάνουν με σκοπό να προσαρμόζουν το εσωτερικό περιβάλλον σε συνθήκες άνεσης (θερμικής ή οπτικής). Στον τομέα της διαχείρισης του φωτισμού, βασικό ζητούμενο αποτελεί ο προσδιορισμός της έννοιας της οπτικής άνεσης, που είναι κατά μεγάλο βαθμό υποκειμενική και δεν μπορεί να καταγραφεί με χρήση αισθητήρων. Διάφορες μελέτες προσέγγισαν το θέμα με ερωτηματολόγια όπου οι χρήστες προσδιόριζαν συνεχώς κατά πόσο αισθάνονταν άνεση ή όχληση. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις απαντήσεις των διαφόρων χρηστών για τις ίδιες συνθήκες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αντιφατικών αποτελεσμάτων ανάμεσα στους χρήστες προκύπτει από την σύγκριση των μελετών [42] και [43]. Οι μελέτες αφορούν στην πιθανότητα ανοίγματος των περσίδων ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία. Στην πρώτη [42], βρέθηκε ότι αυτή η πιθανότητα αυξάνεται συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ στην δεύτερη [43], παρατηρήθηκε αντίστροφη συσχέτιση, οφειλόμενη σε διαφορετική απόκριση των μελετούμενων χρηστών.

Επιπρόσθετα, σημαντική είναι η παρατήρηση ότι διαφορές εντοπίζονται και στην αίσθηση που έχει και ο ίδιος χρήστης για το περιβάλλον του κάτω από τις ίδιες αντικειμενικές συνθήκες. Για παράδειγμα ο ίδιος χρήστης μπορεί για κάποια στιγμή να αισθάνεται άνεση σε ένα επίπεδο εσωτερικής έντασης φωτισμού, ενώ να δηλώσει μερική όχληση για το ίδιο επίπεδο κάποια άλλη στιγμή. Οι περισσότεροι χρήστες αισθάνονται οπτική όχληση και είναι πιθανό να δράσουν μέσα σε ένα εύρος τιμών κάποιας κρίσιμης μεταβλητής π.χ. της εσωτερικής έντασης φωτισμού. Όσο πιο στενό είναι το εύρος αυτό, τόσο πιο εύκολο είναι να προβλεφθεί η συμπεριφορά του χρήστη (αφού κατά κανόνα ο χρήστης επιλέγει να δράσει κάτω από τις ίδιες συνθήκες). Αντίθετα, χρήστες που εμφανίζουν μεγαλύτερα εύρη δράσεων μοντελοποιούνται πιο δύσκολα αφού εντείνεται το στοιχείο της στοχαστικότητας.

Η συμπεριφορά ενός χρήστη μπορεί επίσης να είναι πολύ διαφορετική όταν αυτός εργάζεται σε προσωπικό γραφείο, από όταν αυτός συνυπάρχει με άλλους χρήστες (γραφεία ανοιχτού τύπου). Στην πρώτη περίπτωση ο χρήστης αισθάνεται ελεύθερος να κάνει ρυθμίσεις/ δράσεις ώστε να επιτύχει την προσωπική του άνεση, ενώ στη δεύτερη οι αποφάσεις είναι συλλογικές και σε αυτές υπεισέρχονται ίσως και άλλοι κοινωνικοί παράγοντες (συναινετικός φωτισμός). Η διαχείρισή του συναινετικού φωτισμού ώστε να ικανοποιούνται τόσο οι συλλογικές όσο και οι ατομικές απαιτήσεις των χρηστών του χώρου έχει μελετηθεί στις [44][45].

Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η σημασία της προσωποποιημένης προσέγγισης στο σχεδιασμό φωτισμού, αλλά ταυτόχρονα διαφαίνεται η πολυπλοκότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς και η δυσκολία κατανόησης και μοντελοποίησής της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μέχρι σήμερα να μην υπάρχουν σαφείς μετρικές για τον σχεδιασμό προσωποποιημένων συστημάτων διαχείρισης κτιρίων [46].

### 1.2.2 Βασικές μεταβλητές

Από την ανάλυση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας καταγράφεται μία πληθώρα παραγόντων που μπορεί να επηρεάζουν την συμπεριφορά του κάθε χρήστη σε ένα χώρο γραφείου. Σύμφωνα με την μελέτη των Peng et al. [47], οι δράσεις ενός χρήστη οφείλονται σε τρεις κατηγορίες παραγόντων. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις δράσεις που γίνονται λόγω κάποιας περιβαλλοντικής μεταβλητής, η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις δράσεις που γίνονται βασιζόμενες στη συνήθεια (π.χ. άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού κατά την είσοδο στο γραφείο, ανεξάρτητα από τις συνθήκες έντασης φωτισμού που επικρατούν) και τέλος στην τρίτη κατηγορία κατατάσσονται όλες οι υπόλοιπες δράσεις που οφείλονται σε παράγοντες που δεν μπορούν εύκολα να ποσοτικοποιηθούν.

Για να γίνει επομένως κατανοητή η συσχέτιση των δράσεων κάθε χρήστη με τις μεταβλητές του εσωτερικού ή του εξωτερικού περιβάλλοντος που τις ενεργοποιούν (triggering variables), θα πρέπει να καταγράφονται ταυτόχρονα οι μεταβλητές αυτές καθώς και οι αντίστοιχες κινήσεις των χρηστών.

Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ρύθμιση του φωτισμού και των περσίδων μπορεί να είναι:

- Η ένταση φωτισμού στον χώρο. Ο παράγοντας αυτός έχει βρεθεί να συνδέεται στενά με την οπτική όχληση των χρηστών και αποτελεί την κύρια αιτία που τους ωθεί να χειριστούν τις περσίδες [34][48][49][50][51] ή τον τεχνητό φωτισμό [34][48][49][52][53]. Ανάλογα με την τιμή της έντασης φωτισμού, οι χρήστες εμφανίζουν την τάση είτε να κλείνουν τις περσίδες (σε υψηλές τιμές έντασης φωτισμού), είτε να τις ανοίγουν (σε χαμηλές τιμές έντασης φωτισμού) ώστε να εκμεταλλευτούν το φυσικό φως. Αντίστοιχα, μικρές τιμές έντασης φωτισμού οδηγούν σε άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού, ενώ υψηλότερες μπορούν να οδηγήσουν σε κλείσιμο αυτού. Υπάρχει και ένα εύρος τιμών έντασης φωτισμού, για τις οποίες ο χρήστης αισθάνεται οπτική άνεση και γι' αυτό δεν επεμβαίνει στα συστήματα φωτισμού-σκίασης. Στις παραπάνω μελέτες η ένταση φωτισμού προσεγγίζεται με διάφορους τρόπους. Στις περιπτώσεις που εξετάζεται η χρήση περσίδων η ένταση φωτισμού αναφοράς μπορεί να είναι εσωτερική ή εξωτερική, οριζόντια ή κάθετη στο παράθυρο. Στις μελέτες που σχετίζονται με την χρήση τεχνητού φωτισμού σχεδόν πάντα μελετάται η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας.

- Η ηλιακή ακτινοβολία. Συνδέεται τόσο με την οπτική όσο και με την θερμική άνεση των χρηστών σε ένα χώρο. Πολλές μελέτες την συσχετίζουν με την επιθυμία των χρηστών να ρυθμίσουν τις περσίδες τους [42][43][50][54]. Και αυτή η μεταβλητή εκφράζεται με διάφορους τρόπους. Συνήθως εξετάζεται η ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στο παράθυρο ή η συνολική εξωτερική οριζόντια ακτινοβολία. Ωστόσο οι διάφορες μελέτες δεν συμφωνούν για το πώς ακριβώς αντιδρούν οι χρήστες συναρτήσει της ακτινοβολίας [55].
- Η θάμβωση. Η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται σε έναν χώρο μπορεί να προκαλέσει θαμβώσεις στους χρήστες, όταν κοιτούν είτε προς το παράθυρο, είτε προς την οθόνη των υπολογιστών τους. Η μεταβλητή αυτή ωστόσο είναι δύσκολο να μετρηθεί, ενώ η σχέση της με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Για το λόγο αυτό, στις περισσότερες μελέτες η θάμβωση δεν μετريέται απευθείας αλλά συσχετίζεται με την επιθυμία των χρηστών να κλείσουν τις περσίδες για να περιορίσουν το άμεσο ηλιακό φως [43][52][57][58]. Πρόσφατα επίσης, προτάθηκε ένα σύστημα διαχείρισης φωτισμού και περσίδων που στοχεύει στον περιορισμό της θάμβωσης [56].
- Η κατάσταση του ουρανού. Οι διαφορετικές καταστάσεις του ουράνιου θόλου (καθαρός, νεφосκεπής, ενδιάμεσος) έχουν συνδεθεί με διαφορετικές συμπεριφορές των χρηστών ως προς την ρύθμιση των περσίδων και του φωτισμού [59][60].
- Η εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία. Κάποιες μελέτες έχουν εξετάσει τη συσχέτιση των δράσεων των χρηστών με τη θερμοκρασία [50][57][61], αναφέροντας π.χ. συνηθέστερο κλείσιμο των περσίδων όταν η τιμή της εσωτερικής ή της εξωτερικής θερμοκρασίας ήταν αυξημένη.
- Ο προσανατολισμός του χώρου. Ανάλογα με τον προσανατολισμό, υπάρχει διαφορετική έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και επομένως διαφορετική διείσδυση φυσικού φωτός στο χώρο. Διαφορές εντοπίζονται τόσο στην ένταση της προσπίπτουσας στο παράθυρο ακτινοβολίας, όσο και στην χρονική περίοδο κατά την οποία υπάρχει άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο χώρο. Σε χώρους με ανατολικό ή δυτικό προσανατολισμό, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα παράθυρα (και άρα εισέρχεται στο χώρο), παρουσιάζει έντονες μεταβολές στη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, σε χώρους με νότιο προσανατολισμό η ημερήσια διακύμανση της ακτινοβολίας είναι λιγότερο έντονη, ωστόσο παρατηρούνται σημαντικές εποχικές αλλαγές. Με βάση τα παραπάνω, η χρήση του φωτισμού και των περσίδων επηρεάζεται αποφασιστικά από τον προσανατολισμό του χώρου. Έχει βρεθεί για παράδειγμα, ότι ο μέσος βαθμός σκίασης των παραθύρων (με χρήση περσίδων) είναι συνήθως μικρότερος σε χώρους με βόρειο προσανατολισμό σε σχέση με χώρους νότιου προσανατολισμού [62][63][64][65]. Ο βαθμός σκίασης για ανατολικούς και δυτικούς προσανατολισμούς έχει τιμές πλησιέστερες σε αυτές του νότιου

προσανατολισμού. Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι οι χρήστες ανατολικών και δυτικών γραφείων είναι πιο πιθανό να αφήσουν τις περσίδες τους μόνιμα κλειστές (για να αποφεύγουν ίσως συχνές δράσεις), σε σχέση με χρήστες γραφείων βόρειου ή νότιου προσανατολισμού [42]. Τέλος, παρατηρούνται διαφορές και ως προς τις καθημερινές κινήσεις που κάνουν οι χρήστες κατά την άφιξή τους στο χώρο εργασίας. Έχει καταγραφεί ότι οι χρήστες χώρων με ανατολικό προσανατολισμό συνήθως κλείνουν τις περσίδες κατά την άφιξή τους στο χώρο, ενώ αντίθετα χρήστες χώρων δυτικού προσανατολισμού τις ανοίγουν, καθώς αυτές είχαν κλείσει την προηγούμενη ημέρα κατά την ώρα της δύσης [22].

- Η απόσταση της θέσης εργασίας από το παράθυρο (βάθος). Ο χρήστης που βρίσκεται πιο κοντά στα παράθυρα απολαμβάνει μεγαλύτερα διαστήματα επαρκούς εσωτερικής έντασης φωτισμού λόγω του φυσικού φωτός, αλλά επίσης υφίσταται συχνές θαμβώσεις. Αντίθετες συνθήκες βιώνει ένας χρήστης που βρίσκεται στο βάθος του γραφείου, μακριά από τα παράθυρα. Επομένως, ο πρώτος θα κάνει συγκριτικά συχνότερη χρήση των περσίδων, ενώ ο δεύτερος θα έχει μεγαλύτερη ανάγκη τεχνητού φωτισμού ώστε να αποκτήσει ικανοποιητικό επίπεδο φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του. [22][52].
- Η εποχή του έτους και η ώρα της ημέρας. Προφανώς κάποιες από τις παραπάνω μεταβλητές οι οποίες σχετίζονται με την θέση του ηλίου, εμφανίζουν τόσο ημερήσιες όσο και εποχικές διαφοροποιήσεις. Υπάρχουν μελέτες που συνδέουν τις δράσεις των χρηστών με τη διαφοροποίηση στις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κτίριο ανά εποχή [42][65]. Οι Haldi και Robinson, [33], αναφέρουν ότι στη δική τους μελέτη πεδίου δεν βρέθηκε στατιστικά ισχυρή σύνδεση των δράσεων των χρηστών με την εποχή του έτους σε όλες τις περιπτώσεις.

Φυσικά, το σύνολο των δράσεων ενός χρήστη δεν εξηγείται αποκλειστικά με περιβαλλοντικά (μετρήσιμα) αίτια σαν αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η στοχαστικότητα της ανθρώπινης φύσης περιλαμβάνει και συμπεριφορές που οφείλονται σε προσωπικές επιλογές, συνήθειες και ιδιαιτερότητες του κάθε ατόμου [66]. Το στοιχείο της συνήθειας επηρεάζει για παράδειγμα ισχυρά τη χρήση του τεχνητού φωτισμού κατά την πρώτη είσοδο των χρηστών στο χώρο και την αντίστοιχη τελευταία έξοδό τους, αφού τότε παρατηρείται η μεγαλύτερη συχνότητα χρήσης του [36][43][49][67][68][69][70].

Ένας άλλος υποκειμενικός παράγοντας που επηρεάζει κυρίως τη χρήση των περσίδων είναι η επιθυμία των χρηστών να έχουν θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον [42][65][71][72]. Επιπρόσθετα, η επιθυμία ενός χρήστη για ιδιωτικότητα μπορεί να τον οδηγεί σε κλείσιμο των περσίδων χωρίς να συντρέχουν κάποιοι από τους περιβαλλοντικούς λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Η παρατήρηση αυτή έγινε για πρώτη φορά από τους Rubin et al [73], ενώ σε μία άλλη μελέτη [71], αναφέρεται ότι το 12% των χρηστών που ρωτήθηκαν ποια είναι

η κύρια αιτία που τους ωθεί να κατεβάζουν τις περσίδες τους, απάντησε ότι αυτή είναι η επιθυμία τους για ιδιωτικότητα και ασφάλεια. Στην ίδια μελέτη, αναφέρονται και άλλες πιθανές αιτίες δράσεων, όπως λόγοι ιδιαίτερης φυσιολογίας του κάθε ατόμου (π.χ. ευαισθησία στην ένταση φωτισμού) ή και κοινωνικοί λόγοι (π.χ. η πολιτική της εταιρείας). Δυστυχώς τέτοιες αιτίες δεν μπορούν ούτε να μετρηθούν ούτε να εξαχθούν εύκολα από ερωτηματολόγια και έτσι δεν είναι δυνατός ο άμεσος συσχετισμός τους με αντίστοιχες δράσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα συμπεριφοράς μέχρι σήμερα [66][74].

### **1.2.3 Αλληλεπίδραση χρήστη και συστήματος διαχείρισης φωτισμού και περσίδων**

Η συμπεριφορά και η απόκριση των χρηστών έχει μελετηθεί για διάφορους τύπους συστημάτων διαχείρισης φωτισμού και περσίδων. Πολλές μελέτες έχουν καταγράψει τη συχνότητα χρήσης ενός συστήματος σκίασης (περσίδων) από τους χρήστες ενός χώρου όταν αυτό είναι χειροκίνητο [22][49][71][73][75]. Η συχνότητα χρήσης των περσίδων αυξάνεται όταν αυτές μπορούν να ελέγχονται μέσω ενός κομβίου [50][76][77][78]. Επιπλέον στην [79] έγινε καταγραφή των προτιμήσεων των χρηστών όταν αυτοί μπορούν να ρυθμίζουν τις περσίδες τους σε διαφορετικά επίπεδα αντί να τις έχουν πλήρως ανοικτές/ κλειστές.

Όσον αφορά στη χρήση του τεχνητού φωτισμού, οι πιο πολλές μελέτες αναφέρονται στην βασική περίπτωση της δυαδικής χρήσης του φωτισμού (ON/OFF) και δεν αφορούν στην συμπεριφορά του χρήστη όταν υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του επιπέδου έντασης φωτισμού (dimming) [34][49][52][53][58][80][81].

Επίσης έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί αυτόματα συστήματα που καθορίζουν το επίπεδο φωτισμού και περσίδων συνήθως με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων έδειξε ωστόσο ότι οι χρήστες δυσχεραίνονται και παρεμβαίνουν συχνά στα συστήματα αυτά αλλάζοντας τις προτεινόμενες ρυθμίσεις. Για παράδειγμα στην μελέτη των Reinhart και Voss [52] καταγράφεται ότι σε 1432 αποφάσεις του αυτόματου συστήματος να κλείσει τις περσίδες, οι χρήστες αναίρεσαν αυτή την απόφαση στο 88% των περιπτώσεων. Οι Leaman και Bordass [82] αναφέρουν ότι αυτόματα συστήματα στα οποία δεν μπορούν να παρέμβουν οι χρήστες προκαλούν τον εκνευρισμό τους. Στο ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή οι χρήστες γενικά προτιμούν να έχουν οι ίδιοι τον έλεγχο των συνθηκών στο γραφείο τους, κατέληξε πλήθος ερευνών [76][77][83][84]. Σημαντική επίσης είναι η παρατήρηση ότι χρήστες που έχουν τον έλεγχο των συνθηκών του χώρου παρουσιάζουν υψηλότερη παραγωγικότητα [82].

Μέχρι σήμερα, ο στόχος των περισσότερων μελετών είναι η δημιουργία ενός συστήματος αυτόματης προσαρμογής και επίτευξης συνθηκών οπτικής άνεσης [85]. Έχει αναγνωριστεί η σημασία του να έχουν οι χρήστες έλεγχο της κατάστασης μέσω απλών συστημάτων διεπαφής



(interface) [18][86], αλλά οι λεπτομέρειες της συμπεριφοράς των χρηστών παραμένουν προς διερεύνηση. Γενικώς, πιστεύεται ότι η παροχή ευκολόχρηστων συστημάτων ελέγχου θα καθιστούσε τους χρήστες πιο πρόθυμους να δρουν για την βελτίωση της άνεσής τους.

### 1.3 Μοντελοποίηση συμπεριφοράς

Σε ένα χώρο γραφείου, ο κάθε χρήστης επιλέγει να χρησιμοποιήσει τον τεχνητό φωτισμό και τις περιόδους ανάλογα με τις συνθήκες (εσωτερικές ή εξωτερικές) που επικρατούν σε αυτόν. Στην βιβλιογραφία ακολουθούνται ποικίλες προσεγγίσεις για την μοντελοποίηση των δράσεων αυτών. Αυτές διαφέρουν ως προς την επιλογή των μεταβλητών εισόδου και την μαθηματική τους υλοποίηση. Σε όλες τις περιπτώσεις έχει προηγηθεί μία καταγραφή των δράσεων των χρηστών και των μεταβλητών εισόδου, με στόχο την συλλογή των συναφών δεδομένων για ένα διάστημα από 5 ημέρες μέχρι 2 χρόνια.

Τα πρώτα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ντετερμινιστικά. Η έξοδος δηλαδή αυτών των μοντέλων αντιστοιχεί σε τιμή πιθανότητας 0 για μία συγκεκριμένη δράση κάτω από μία τιμή κατωφλίου και 1 πάνω από αυτή [80][87]. Σύντομα ωστόσο, άλλες μελέτες έδειξαν τις αδυναμίες των παραπάνω μοντέλων καθώς η πραγματική συμπεριφορά των χρηστών επηρεάζεται από διάφορες αιτίες και είναι σίγουρα στοχαστική και όχι απόλυτη [42][49][50][88].

Τα στοχαστικά μοντέλα θεωρούν ότι οι δράσεις του χρήστη αποτελούν πιθανοτική συνάρτηση διαφόρων μεταβλητών εισόδου. Η πιθανοτική αυτή σχέση αποτυπώνει τις αυτονόητες αποκλίσεις της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Για την προσέγγιση αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression), που θεωρούν μία γραμμική σχέση ανάμεσα στη δράση του χρήστη και τις αντίστοιχες μεταβλητές εισόδου [62][65][89]. Συνήθως τα μοντέλα αυτά υστερούν στην πρόβλεψη ακραίων (πολύ χαμηλών ή πολύ υψηλών τιμών) και στις περιπτώσεις όπου μία από τις μεταβλητές εισόδου δεν παρουσιάζει κανονική κατανομή [33][51][90].

Την τελευταία αδυναμία αντιμετωπίζουν επιτυχώς τα γενικευμένα μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης (logistic regression models), που θεωρούνται ικανοποιητικά εργαλεία για την προσομοίωση της πιθανοτικής συμπεριφοράς του χρήστη [33][43][51][63][91].

Τα μοντέλα Bernoulli [61][92] προβλέπουν την πιθανότητα  $p$  (likelihood) εμφάνισης μίας κατάστασης (π.χ. να είναι το φως ανοικτό) όταν μία μεταβλητή εισόδου  $Q$  έχει μία συγκεκριμένη τιμή  $x$ . Η μεταβλητή εισόδου  $Q$  πρέπει να μην επηρεάζεται από τις δράσεις του χρήστη, επομένως να είναι κάποια μεταβλητή του εξωτερικού περιβάλλοντος (όπως η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κτίριο). Η τιμή του  $p$  μπορεί να βρεθεί αν καταγράψουμε το σύνολο των περιπτώσεων που η μεταβλητή εισόδου έχει τιμή  $x - \Delta x < Q < x + \Delta x$  και υπολογίσουμε σε πόσες από αυτές το φως είναι ανοικτό. Από τα

παραπάνω προκύπτει ότι οι παραδοχές για το  $\Delta x$ , το χρονικό βήμα  $\Delta t$  των παρατηρήσεων (5 min, 10 min, 1h κλπ.) και ο συνολικός όγκος των δεδομένων έχουν καθοριστικό ρόλο στην αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος.

Τα μοντέλα διακριτού χρόνου Markov (Discrete Time Markov) [6][33][81][93] καταγράφουν μία μεταβλητή (εσωτερική ή εξωτερική) πριν ο χρήστης προβεί σε μία δράση και προσδιορίζουν την πιθανότητα ο χρήστης να δράσει την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή. Επομένως η μέθοδος αυτή απαντά στο ερώτημα: αν το φως είναι κλειστό και η μεταβλητή εισόδου (π.χ. εσωτερική ένταση φωτισμού  $E$ ) έχει τιμή  $x - \Delta x < E < x + \Delta x$ , ποια είναι η πιθανότητα ο χρήστης να ανοίξει το φως στο προσεχές διάστημα  $\Delta t$ . Είναι και πάλι φανερό ότι η επιλογή των τιμών των  $\Delta x$  και  $\Delta t$  είναι κρίσιμη. Τα μοντέλα αυτά μειονεκτούν όταν η  $E$  παρουσιάζει γρήγορες διακυμάνσεις. Τελικά, τα μοντέλα διακριτού χρόνου Markov δεν αποδίδουν την πραγματική πιθανότητα δράσης του χρήστη για την τιμή του  $E$ , αλλά ουσιαστικά προβλέπουν την χρονική καθυστέρηση με την οποία θα δράσει.

Τα μοντέλα διακριτού γεγονότος Markov (Discrete Event Markov) [92][94][95] συνδέουν τη δράση του χρήστη με ένα συγκεκριμένο γεγονός, π.χ. αν ο χρήστης ανοίγει το φως κατά την άφιξή του στο γραφείο, εφόσον η τιμή της μεταβλητής εισόδου ( $E$ ) είναι  $x - \Delta x < E < x + \Delta x$ . Η μέθοδος αυτή δεν εξετάζει λοιπόν τη συμπεριφορά του χρήστη κατά την παραμονή του στο γραφείο, πράγμα που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημά της.

Βασισμένοι στην Θεωρία απόφασης του Bayes, οι Lindelöf και Morel [96] ανέπτυξαν μία μεθοδολογία που αξιοποιεί μόνο τις τιμές της έντασης φωτισμού  $E$  στην επιφάνεια εργασίας πριν και μετά την δράση του χρήστη. Θεωρούν δηλαδή ότι η τιμή της μεταβλητής ακριβώς πριν τη δράση αντιστοιχεί με βεβαιότητα σε κατάσταση όχλησης, ενώ η τιμή της μεταβλητής ακριβώς μετά τη δράση αντιστοιχεί σε συνθήκες άνεσης για τον ίδιο χρήστη. Με τη λογική αυτή διαμορφώνονται δύο σύνολα τιμών του  $E$ , όπου ο χρήστης αισθάνεται άνεση (Comfort=True) και όχληση (Comfort=False). Οι κατανομές των παραπάνω συνόλων συνδυάζονται μέσω της θεωρίας απόφασης του Bayes για τον υπολογισμό την πιθανότητας δράσης του χρήστη.

Πρόσφατες μελέτες εκφράζουν επιφυλάξεις σχετικά με το κατά πόσο τα παραπάνω συμπεριφορικά μοντέλα μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα έξυπνο σύστημα προσωποποιημένης διαχείρισης φωτισμού δεδομένων των αδυναμιών που παρουσιάζουν [97][98][99].

#### 1.4 Αλγόριθμοι πρόβλεψης

Οι αλγόριθμοι που θα μπορούν να προβλέπουν τις πιθανές δράσεις των χρηστών στα πλαίσια έξυπνων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να συνεκτιμούν πολλούς παράγοντες. Η διεύδυση του φυσικού φωτός, η κατάσταση του ουρανού, η ηλιακή

ακτινοβολία, τα χαρακτηριστικά του κτιρίου και του γραφείου, η εποχή, οι απαιτήσεις των χρηστών και τα μοντέλα συμπεριφοράς τους είναι για παράδειγμα κάποιοι από αυτούς. Είναι φανερό ότι η ταυτόχρονη εκτίμηση όλων αυτών των συχνά μη γραμμικών ή στοχαστικών μεγεθών απαιτεί την χρήση εργαλείων κατάλληλων για τέτοιες προσεγγίσεις, όπως είναι τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε συναφή προβλήματα.

Για παράδειγμα, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μελέτες για την πρόβλεψη της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ενός κτιρίου [100][101][102][103][104]. Πιο συγκεκριμένα, οι Wong, Wan και Lam [104], αναφέρουν ότι η πρόβλεψη της συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης για φωτισμό είναι πιο αξιόπιστη σε σχέση με τις αντίστοιχες προβλέψεις των φορτίων θέρμανσης και κλιματισμού. Ωστόσο σε όλες τις παραπάνω μελέτες, οι επιμέρους χρήστες (και τα αντίστοιχα προφίλ τους) δεν λαμβάνονται υπόψη, ούτε μελετάται η χρήση των περσίδων και η επίδρασή της στο φορτίο φωτισμού.

Η επίδραση του φυσικού φωτός στην συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός κτιρίου έχει μελετηθεί με χρήση ΤΝΔ από τους Da Fonseca, Didoné και Pereira [105]. Στην έρευνα αυτή οι χρήστες αντιμετωπίζονται και πάλι συνολικά και όχι προσωποποιημένα, ενώ ορίζεται σταθερή τιμή (500 Lux) για την επιθυμητή ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, βασισμένη σε πρότυπα και όχι σε μετρήσεις.

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί και για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας (είτε ολικής, είτε προσπίπτουσας στο κέλυφος ενός κτιρίου), και στην συσχέτισή της με διαφορετικούς τύπους ουρανού [106][107][108]. Με την ίδια μεθοδολογία έχει προσεγγιστεί και το πρόβλημα της βέλτιστης χωρικής διασποράς του φωτός (φυσικού και τεχνητού) μέσα σε ένα χώρο γραφείου, με χρήση μικρού αριθμού αισθητήρων [109]. Ωστόσο και σε αυτή τη μελέτη δε γίνεται αναφορά σε χρήση περσίδων, ούτε λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαίτερες προτιμήσεις του κάθε χρήστη. Επιπλέον οι Wang και Tan [110] και οι Tran και Tan [111] έχουν ασχοληθεί με τη δημιουργία αλγορίθμων πρόβλεψης για τον αποδοτικό έλεγχο συστημάτων φωτισμού LED, με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη ο φυσικός φωτισμός που εισέρχεται στο χώρο. Τέλος, οι Kazanasmaz, Günaydin και Binol [112] χρησιμοποίησαν ΤΝΔ για την πρόβλεψη της έντασης φωτισμού που προέρχεται από φυσικό φως και εισέρχεται σε χώρους γραφείων. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι η ημέρα του έτους, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία, η απόσταση της θέσης εργασίας από τα παράθυρα, ο προσανατολισμός του κτιρίου κ.α. Μειονέκτημα της μελέτης αποτελεί ωστόσο ότι δεν εξετάζεται η χρήση περσίδων και επιπλέον ότι υπάρχουν περιορισμένες μετρήσεις πεδίου (3 μήνες) με αποτέλεσμα να μην μελετώνται επαρκώς οι εποχικές μεταβολές.

Για τη δημιουργία αλγόριθμων πρόβλεψης εκτός από τα ΤΝΔ έχουν χρησιμοποιηθεί και τα ασαφή συστήματα. Για παράδειγμα, στην [113] προτείνεται ένας αλγόριθμος πρόβλεψης της εσωτερικής έντασης φωτισμού, με ταυτόχρονο έλεγχο των περσίδων και του τεχνητού φωτισμού, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται στο χώρο συγκεκριμένα (σταθερά μέσα στην ημέρα) επίπεδα έντασης φωτισμού. Η οπτική άνεση των χρηστών θεωρείται ικανοποιητική εφόσον τηρούνται αυτά τα επίπεδα, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν έχει προκύψει από συγκεκριμένα μοντέλα συμπεριφοράς του κάθε χρήστη. Η συσχέτιση της εξωτερικής ακτινοβολίας με την εσωτερική ένταση φωτισμού σε χώρο που διαθέτει ρυθμιζόμενες περσίδες μελετάται με χρήση ασαφούς μοντελοποίησης στην [114]. Τα δεδομένα για την εκπαίδευση του μοντέλου προέρχονται από ένα μικρό πειραματικό δωμάτιο (2x2m), με παράθυρα σε όλους τους προσανατολισμούς, όπου η ρύθμιση των περσίδων είναι προγραμματισμένη ώστε να συλλέγονται συνδυαστικά δεδομένα εξωτερικής ακτινοβολίας και εσωτερικής έντασης φωτισμού για διαφορετικούς βαθμούς σκίασης των παραθύρων. Τα αποτελέσματα των προβλέψεων ενός τέτοιου αλγόριθμου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κομμάτι ενός αντίστοιχου μοντέλου πρόβλεψης δράσεων πραγματικών χρηστών.

Τέλος, η απόφαση των χρηστών να χρησιμοποιήσουν ή όχι τον τεχνητό φωτισμό ανάλογα με τη γεωμετρία του χώρου και το εισερχόμενο φυσικό φως, έχει μελετηθεί στην [115]. Στην εργασία αυτή εξετάζονται τρία προσωπικά πανεπιστημιακά γραφεία. Σε αυτά, καταγράφονται οι δράσεις των χρηστών τους ως προς το άνοιγμα ή όχι του τεχνητού φωτισμού κατά την άφιξή τους στο γραφείο. Με χρήση ασαφούς λογικής γίνεται προσπάθεια συσχέτισης των δράσεων αυτών με τους παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο, το προτεινόμενο μοντέλο δεν είναι αρκετά γενικευμένο καθώς υπάρχει μικρός αριθμός δεδομένων (2 μήνες) και επιπλέον οι μετρήσεις έγιναν τον χειμώνα όπου δεν υπάρχει έντονη διείσδυση φυσικού φωτός (άρα και ακραίες τιμές έντασης φωτισμού). Επίσης δεν μελετάται καθόλου η χρήση των περσίδων (έχει ζητηθεί στους χρήστες να μην τις χρησιμοποιούν).

## **1.5 Σκοπός και διάρθρωση της διατριβής**

Βασικός στόχος της διατριβής είναι η υποστήριξη του σχεδιασμού και της εφαρμογής ενός έξυπνου προσωποποιημένου συστήματος διαχείρισης του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων σε χώρους γραφείων. Η επίτευξη αυτού του στόχου προϋποθέτει την ολοκλήρωση σημαντικών επιμέρους βημάτων.

Αρχικά θα πρέπει να προσδιοριστούν οι επιθυμίες/ δράσεις των χρηστών και να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά τους. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση μετρήσεων και η καταγραφή ή εξαγωγή των αντίστοιχων δράσεων των χρηστών σε σχέση με τον τεχνητό φωτισμό και τις περσίδες. Στην παρούσα διατριβή έγιναν μετρήσεις παρουσίας, εσωτερικής έντασης φωτισμού (στην επιφάνεια εργασίας) και χρήσης του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων σε τρία πανεπιστημιακά γραφεία. Τα δύο από αυτά είναι

προσωπικά ενώ το τρίτο φιλοξενεί περισσότερους χρήστες. Από την ανάλυση των μετρήσεων εντοπίζονται διαφορές στις επιλογές που κάνει κάθε χρήστης ώστε να δημιουργήσει ένα άνετο οπτικό περιβάλλον στο χώρο εργασίας του.

Στο κεφάλαιο 2 δίνονται στοιχεία σχετικά με τη γεωμετρία των μελετούμενων γραφείων, τον μετρητικό εξοπλισμό και τις βασικές παραδοχές που έγιναν. Επιπρόσθετα, για να αναλυθούν οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν και για να τονιστούν οι διαφορές ανάμεσα στους χρήστες, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία, όπως τα προφίλ της παρουσίας στο γραφείο, τα μέσα ημερήσια προφίλ κατανάλωσης ανά μήνα, η κατανομή των τιμών έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, κ.α. Παράλληλα, αναλύονται και οι δράσεις των χρηστών και διερευνάται η συσχέτισή τους με κάποιες βασικές μεταβλητές. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας για ένα ολόκληρο έτος στα τρία μελετώμενα γραφεία με χρήση ενός εμπορικού λογισμικού. Οι προσομοιώσεις αυτές ήταν απαραίτητες, για να συγκεντρωθούν δεδομένα για τις τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού που θα επικρατούσαν στα ίδια γραφεία υπό άλλες συνθήκες, όπως για διαφορετικό προσανατολισμό, για ποικίλες αποστάσεις της θέσης εργασίας από το παράθυρο, για όλες τις καταστάσεις ουρανού (καθαρός, μερικώς νεφελώδης, νεφοσκεπής κατά CIE). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών, χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά προς τις πραγματικές μετρήσεις για την εκπαίδευση του γενικευμένου αλγόριθμου πρόβλεψης με χρήση ΤΝΔ. (κεφάλαιο 5).

Επόμενο διακριτό βήμα αποτελεί η συλλογή στοιχείων για την ηλιακή ακτινοβολία και τις καιρικές συνθήκες (κατάσταση ουρανού) που επικρατούσαν στα αντίστοιχα διαστήματα των μετρήσεων της εσωτερικής έντασης φωτισμού. Όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, συλλέχθηκαν τιμές οριζόντιας ακτινοβολίας. Ωστόσο, για να συνδυαστούν οι τιμές αυτές με τη μετρούμενη εσωτερική ένταση φωτισμού σε κάθε γραφείο, πρέπει να διαχωριστεί η οριζόντια ακτινοβολία στις τρεις συνιστώσες της (άμεση, διάχυτη, ανακλώμενη) λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του ουρανού και να γίνει αναγωγή της στον προσανατολισμό του κάθε γραφείου. Για τους παραπάνω μετασχηματισμούς απαιτείται η χρήση ενός συνόλου εξισώσεων για να υπολογίσουμε την θέση του ηλίου και την έντασή του κάθε ώρα της ημέρας, δηλαδή ηλιακές γωνίες και χρονικές σταθερές όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύεται επίσης η μέθοδος μοντελοποίησης της κατάστασης του ουρανού που χρησιμοποιήθηκε. Όλες οι παραπάνω μεταβλητές αποτελούν εισόδους του προτεινόμενου αλγόριθμου πρόβλεψης εσωτερικής έντασης φωτισμού.

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του χρήστη αποτελεί σημαντικό κομμάτι της παρούσας διατριβής. Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα εμφανίζουν διάφορες αδυναμίες κατά την εφαρμογή τους σε μοντέλα συμπεριφοράς χρηστών. Αναπτύσσεται λοιπόν μία νέα μεθοδολογία μοντελοποίησης που αφορά στις

δράσεις ελέγχου του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων που κάνει ο χρήστης για να επιτύχει συνθήκες άνεσης στον χώρο του. Η συμπεριφορά του χρήστη αποτυπώνεται σε πιθανοτικές καμπύλες έτσι ώστε να υπάρχει το στοιχείο της στοχαστικότητας. Στο κεφάλαιο 4, αρχικά παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση της προτεινόμενης μεθοδολογίας καθώς και οι βασικές παραδοχές της. Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή της μεθόδου στα δεδομένα των τριών γραφείων και προκύπτουν οι αντίστοιχες καμπύλες συμπεριφοράς των χρηστών τους. Στο τέλος του κεφαλαίου, εξετάζεται η ακρίβεια της προτεινόμενης προσέγγισης με χρήση του κριτηρίου Kolmogorov-Smirnov.

Έχοντας λοιπόν ως δεδομένα τα στοιχεία που αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 2-4, δημιουργείται ένας αλγόριθμος πρόβλεψης της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό φως που εισέρχεται στο γραφείο αλλά και τις ιδιαίτερες προτιμήσεις του κάθε χρήστη. Η ένταση φωτισμού αυτή προβλέπεται για κάθε ώρα της ημέρας και ημέρα του έτους ανάλογα με την κατάσταση του ουρανού, την τοποθεσία και τον προσανατολισμό του γραφείου. Συνυπολογίζονται επίσης η απόσταση της θέσης εργασίας από τα παράθυρα και η επίδραση των περσίδων. Στα παραπάνω υπεισέρχονται και οι καμπύλες συμπεριφοράς του χρήστη, αφού η ένταση φωτισμού επηρεάζεται από τις δράσεις του, καθώς ο χρήστης ανοίγει τον τεχνητό φωτισμό ή κλείνει τις περσίδες για τιμές έντασης φωτισμού εκτός των ορίων άνεσής του. Επομένως, πραγματοποιείται παράλληλα πολυπαραγοντική πρόβλεψη της έντασης φωτισμού και της αντίδρασης κάθε χρήστη σε αυτή. Βασικά πλεονεκτήματα του προτεινόμενου μοντέλου είναι ότι λαμβάνει υπ' όψη μόνο τις απαραίτητες εισόδους μειώνοντας έτσι την απαίτηση για μεγάλο όγκο δεδομένων και είναι εύκολα εφαρμόσιμο σε γραφεία με διαφορετικές συντεταγμένες, διαφορετικά μοντέλα συμπεριφοράς χρηστών, διαφορετικά φωτιστικά σώματα. Πρόκειται λοιπόν για ένα γενικευμένο μοντέλο το οποίο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και να εκπαιδευτεί για πλήθος εφαρμογών αποτελώντας έτσι ένα εύκολο και αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης της προσωποποιημένης χρήσης φωτισμού. Το μοντέλο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Στην αρχή γίνεται ανάλυση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι και ως έξοδοι στον προτεινόμενο αλγόριθμο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειράματα που έγιναν για να βρεθεί ο βέλτιστος τύπος νευρωνικού δικτύου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί καθώς και η αρχιτεκτονική του έτσι ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο σφάλμα πρόβλεψης. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται μία εφαρμογή του μοντέλου για την εκτίμηση της συνολικής ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για το φωτισμό ενός γραφείου. Εξετάζεται η διαφοροποίηση αυτής της τιμής ανάλογα με την καμπύλη συμπεριφοράς του χρήστη, τον προσανατολισμό του γραφείου και την εποχή του έτους.

Χρησιμοποιώντας περαιτέρω την έννοια της άνεσης των χρηστών σε ένα χώρο γραφείου, όπως αυτή προκύπτει μέσω της μελέτης και της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς τους (Κεφάλαιο 4), αναπτύχθηκε ένα ακόμη μοντέλο πρόβλεψης. Το μοντέλο αυτό ακολουθεί μία

διαφορετική προσέγγιση απαντώντας ουσιαστικά στο εξής ερώτημα: θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένας έξυπνος αλγόριθμος που χρησιμοποιώντας σαν εισόδους διαθέσιμα στοιχεία του εξωτερικού περιβάλλοντος (π.χ. ακτινοβολία), να έχει σαν έξοδο για κάθε στιγμή της ημέρας του έτους την τιμή της εσωτερικής έντασης φωτισμού που πρέπει να επιτυγχάνει ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης φωτισμού και περσίδων για να αισθάνεται οπτική άνεση ο χρήστης του συγκεκριμένου χώρου; Βασική θεώρηση για το σχεδιασμό ενός τέτοιου αλγορίθμου είναι ότι ένας χρήστης γραφείου ο οποίος ανεπηρέαστα ρυθμίζει το επίπεδο έντασης φωτισμού στο χώρο του (χρήση τεχνητού φωτισμού και περσίδων) δημιουργεί συνθήκες που τον ικανοποιούν και στις οποίες αισθάνεται άνεση. Στο στάδιο της εκπαίδευσης ένας τέτοιος αλγόριθμος καλείται να βρει μόνος του συσχετίσεις ανάμεσα σε στοιχεία του εξωτερικού περιβάλλοντος και στην ένταση φωτισμού που επιθυμεί ο χρήστης. Επομένως θα μπορεί να προβλέπει τί θα ήθελε ο χρήστης σε διαφορετικές συνθήκες. Λόγω της φύσης του συγκεκριμένου προβλήματος για την υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού, επιλέχθηκαν τα συστήματα ασαφούς λογικής. Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται αναλυτικά η ανάπτυξη αυτού του αλγορίθμου. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του και διερευνάται η επάρκειά του. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος προβλέπει με επιτυχία την καμπύλη εσωτερικής έντασης φωτισμού στην οποία αισθάνεται άνεση ο χρήστης για τις μελετώμενες περιπτώσεις. Παρατηρείται μάλιστα ότι είναι σε θέση ακόμα και να διορθώνει τυχόν περιπτώσεις μη αποδεκτών τιμών έντασης φωτισμού για τις οποίες ο χρήστης θα ένιωθε ίσως όχληση.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 7 στο οποίο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή και προτείνονται κάποιες επεκτάσεις της για μελλοντική έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

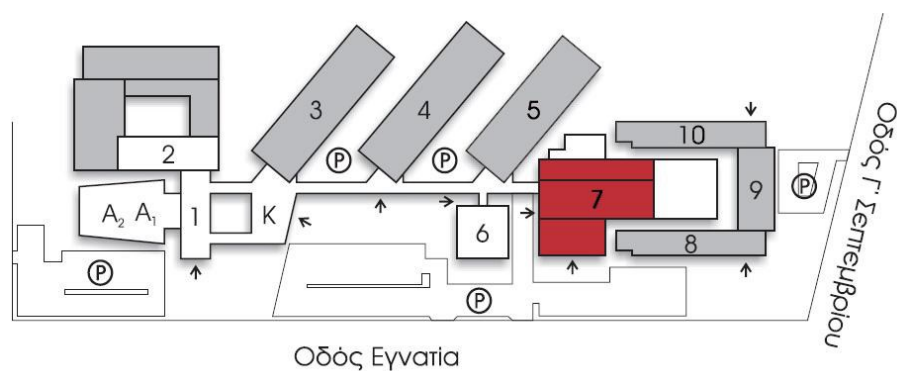
## Κεφάλαιο 2: Μετρήσεις και προσομοιώσεις εσωτερικής έντασης φωτισμού

Για την υλοποίηση των προτεινόμενων μοντέλων πρόβλεψης και την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ώστε να συλλεχθούν τα κατάλληλα δεδομένα. Αυτά συνδυάστηκαν με αντίστοιχες προσομοιώσεις που έγιναν για να καλύψουν τυχόν ελλείψεις των μετρήσεων αλλά και για να γίνει επέκταση και γενίκευσή των δεδομένων σε όλες τις περιπτώσεις προσανατολισμού γραφείου, κατάστασης ουρανού κλπ. Παρακάτω δίνονται πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των γραφείων που μετρήθηκαν, περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τις μετρήσεις. Ακολούθως παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την συμπεριφορά των χρηστών. Τέλος γίνεται παραμετρική ανάλυση των αντίστοιχων προσομοιώσεων.

### 2.1 Περιγραφή των μελετώμενων χώρων

Στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκαν τρία διαφορετικά πανεπιστημιακά γραφεία τα οποία ανήκουν στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και βρίσκονται στον τέταρτο όροφο του κτιρίου Δ' της Πολυτεχνικής Σχολής (Σχήμα 2-1).

Το κτίριο Δ' (γεωγραφικό πλάτος:  $40^{\circ}37'B$ , γεωγραφικό μήκος:  $22^{\circ}57'A$ ), αποτελείται συνολικά από εννιά ορόφους και στεγάζει γραφεία προσωπικού, εργαστήρια, αίθουσες συνεδριάσεων και βοηθητικούς χώρους. Κάθε όροφος έχει έκταση  $846\text{ m}^2$  και η πρόσοψη του κτιρίου έχει νοτιοδυτικό προσανατολισμό.



Σχήμα 2-1 Τοποθεσία και προσανατολισμός του κτιρίου Δ'

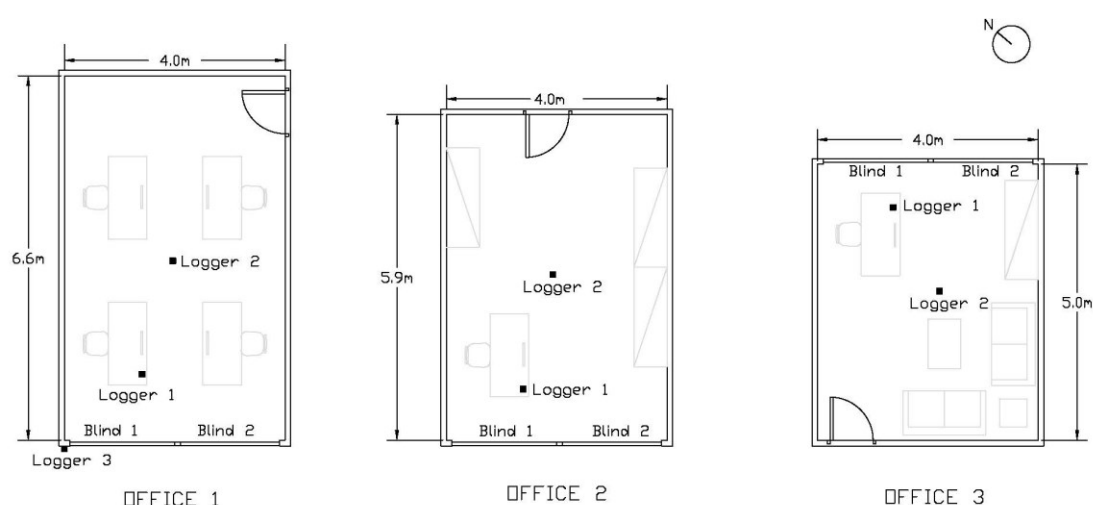




Σχήμα 2-2 Δυτική και Ανατολική όψη του κτιρίου Δ'

Το ένα από τα τρία γραφεία που μελετήθηκαν (Γραφείο 1) είναι γραφείο πολλών χρηστών (multi-user office), ενώ τα υπόλοιπα δύο (Γραφεία 2 και 3) είναι προσωπικά (ένας χρήστης ανά γραφείο). Τα γραφεία έχουν άμεση και απρόσκοπτη θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον (δεν υπάρχουν εμπόδια στην εισχώρηση του φυσικού φωτός), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2. Τα γραφεία επιλέχθηκαν ώστε να έχουν παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι χώροι έχουν σχεδόν ίδιο εμβαδόν ενώ παρουσιάζουν και όμοιο λόγο επιφάνειας παραθύρων προς επιφάνεια τοίχου (39%). Ο λόγος επιφάνειας παραθύρων προς επιφάνεια χώρου είναι μεταξύ 18-24%. Επιπλέον τα Γραφεία 1 και 2 έχουν τον ίδιο προσανατολισμό (ΝΔ) ενώ το Γραφείο 3 έχει αντίθετο προσανατολισμό (ΒΑ). Η επιλογή αυτή έγινε σκόπιμα ώστε να γίνει συλλογή δεδομένων τόσο από γραφεία του ίδιου προσανατολισμού (για να μελετηθούν οι διαφορετικές επιλογές των χρηστών κάτω από τις ίδιες αντικειμενικές εξωτερικές συνθήκες), όσο και από γραφεία με αντίθετο προσανατολισμό (για να μελετηθεί η επίδρασή του στην εσωτερική ένταση φωτισμού και τις αντίστοιχες δράσεις των χρηστών).

Στο Σχήμα 2-3 δίνεται η κάτοψη των μελετώμενων χώρων και τα σημεία όπου τοποθετήθηκαν οι μετρητικές διατάξεις.



Σχήμα 2-3 Κάτοψη των μελετώμενων γραφείων και θέσεις μετρητικών διατάξεων.

Για τον τεχνητό φωτισμό στα γραφεία χρησιμοποιούνται ορατά φωτιστικά σώματα οροφής. Πιο αναλυτικά στοιχεία για την εγκατάσταση φωτισμού του κάθε γραφείου δίνονται

στον Πίνακα 2-1. Για τον έλεγχο της διείσδυσης του φυσικού φωτός στο χώρο, υπάρχουν στα παράθυρα ρυθμιζόμενες περσίδες. Τόσο ο χειρισμός των περσίδων, όσο και του τεχνητού φωτισμού γίνεται χειροκίνητα και ελεύθερα από τους χρήστες (δεν υπάρχει δηλαδή εγκατεστημένο κάποιο σύστημα διαχείρισης φωτισμού).

Πίνακας 2-1 Στοιχεία του συστήματος φωτισμού στα μελετώμενα γραφεία

Αριθμός Γραφείου	Φωτιστικά σώματα			Λαμπτήρες/ φωτιστικό σώμα	
	Αριθμός	Τύπος	Ύψος Τοποθέτησης	Αριθμός & Ισχύς	Τύπος
1	6	Ορατά οροφής με οπίσθιο ανακλαστήρα	3.1 m	2x36 W	T8
2	6	Ορατά οροφής με διαχυτικό κάλυμμα	3.1 m	2x36 W	T8
3	4	Ορατά οροφής με περσίδες	3.1 m	2x36 W	T8

## 2.2 Μεθοδολογία μετρήσεων

Οι μετρήσεις που έγιναν στα τρία γραφεία, περιλαμβάνουν την μέτρηση της έντασης φωτισμού ( $E$ ) στην επιφάνεια εργασίας των χρηστών, την καταγραφή της παρουσίας των χρηστών στο χώρο (occupancy), τις μεταβολές της κατάστασης του τεχνητού φωτισμού (ενεργοποίηση/ απενεργοποίηση) και την χρήση των περσίδων. Οι θέσεις των μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 2-3.

Αναλυτικότερα, για την μέτρηση της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας των χρηστών, χρησιμοποιήθηκε ένας καταγραφέας δεδομένων έντασης φωτισμού (ONSET - HOBO Temperature/Light 64K Data Logger). Το εύρος μέτρησης του συγκεκριμένου καταγραφέα είναι 0 – 320 kLux, ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας του ορίστηκε στα 5 min. Στα γραφεία όπου υπάρχει ένας χρήστης (Γραφεία 2 και 3) ο καταγραφέας ήταν τοποθετημένος στην θέση εργασίας του χρήστη έτσι ώστε να μετρά την οριζόντια ένταση φωτισμού. Στο γραφείο πολλών χρηστών (Γραφείο 1), ο καταγραφέας ήταν τοποθετημένος στη θέση εργασίας που βρίσκεται πιο κοντά στα παράθυρα. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί ο χρήστης που εργάζεται στη θέση αυτή, είναι ο πρώτος που θα αισθανθεί όχληση από το φυσικό φως και θα δράσει (κλείνοντας τις περσίδες). Ωστόσο αυτό εισάγει μία πολυπλοκότητα στη μεθοδολογία, γιατί λόγω της θέσης των μετρητών, μπορεί να καταγραφούν εξαιρετικά υψηλές τιμές έντασης φωτισμού (άμεσο ηλιακό φως). Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό την μελέτη τέτοιων περιπτώσεων και την εξακρίβωση της δυνατότητας του αλγορίθμου πρόβλεψης να διαχειριστεί τόσο μεγάλο εύρος τιμών. Τέτοιες προσεγγίσεις λείπουν αυτή τη στιγμή από την βιβλιογραφία, αφού οι περισσότεροι ερευνητές μελετούν την ένταση

φωτισμού του χώρου μετρούμενη στην οροφή (η οποία έχει πολύ μικρότερο εύρος τιμών) [56][116][117], ή δημιουργούν ένα τεχνητό περιβάλλον στο οποίο με κάποιο σύστημα ελέγχου δεν επιτρέπουν στην ένταση φωτισμού να λάβει μεγάλες τιμές [118][119][120].

Για την καταγραφή της παρουσίας χρηστών στους μελετώμενους χώρους χρησιμοποιήθηκε ένας καταγραφέας παρουσίας (ONSET - HOBO UX90-006 Occupancy/ Light Data Logger), ο οποίος τοποθετήθηκε στην οροφή του κάθε χώρου. Καταγράφει την χρονική στιγμή που κάποιος εισέρχεται στο χώρο και την αντίστοιχη χρονική στιγμή που ο χώρος μένει κενός. Παράλληλα, έχει την δυνατότητα να καταγράφει τη χρονική στιγμή που ο τεχνητός φωτισμός ανοίγει ή κλείνει (μετάβαση από την μία κατάσταση στην άλλη). Η πληροφορία αυτή είναι χρήσιμη και για τον διαχωρισμό της έντασης φωτισμού που καταγράφεται στην επιφάνεια εργασίας στην συνιστώσα που προέρχεται από το φυσικό φως και αυτήν που δημιουργείται από τα φωτιστικά σώματα. Βοηθά επίσης στον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τον φωτισμό του κάθε χώρου. Επίσης, εξωτερικά του ενός γραφείου εγκαταστάθηκε ένας ακόμα μετρητής (ProWeather Station, Tycon systems) για την καταγραφή της εξωτερικής έντασης φωτισμού και των καιρικών συνθηκών. Τέλος, έγινε συλλογή δεδομένων οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας από ένα Φ/B σταθμό στέγης κοντά στο μελετώμενο κτίριο, ώστε να καταγράφονται επιπλέον εξωτερικά δεδομένα που δεν περιορίζονται από τον προσανατολισμό και τις σκιάσεις του κτιρίου. Η δειγματοληψία των δεδομένων αυτών είναι 15 min. Όλα αυτά τα δεδομένα αξιοποιούνται για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη και επίσης κατά το στάδιο της εκπαίδευσης στους αλγόριθμους πρόβλεψης που προτείνονται. Συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τις μετρήσεις που έγιναν περιγράφεται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2 Μεθοδολογία ερμηνείας μετρήσεων

Περιπτώσεις	Παρουσία Χρήστη	Κατάσταση Τεχνητού φωτισμού	Μέτρηση
H1	Όχι	Κλειστός	Ο μετρητής στην επιφάνεια εργασίας μετρά την ένταση φωτισμού μόνο του φυσικού φωτός που εισέρχεται στο χώρο.
H2.1	Ναι	Κλειστός	Ο μετρητής στην επιφάνεια εργασίας μετρά την ένταση φωτισμού μόνο του φυσικού φωτός που εισέρχεται στο χώρο. Ο φυσικός φωτισμός θεωρείται επαρκής για τον χρήστη.
H2.2	Ναι	Ανοικτός	Ο μετρητής στην επιφάνεια εργασίας μετρά το άθροισμα των εντάσεων φωτισμού του τεχνητού φωτισμού και του φυσικού φωτός που εισέρχεται στο χώρο. Ο φυσικός φωτισμός θεωρείται μη επαρκής για τον χρήστη.
H3.1	Όχι	Ανοικτός	Ο χρήστης δεν έκλεισε τον τεχνητό φωτισμό κατά την έξοδό του από τον χώρο.
H3.2	Όχι	Κλειστός	Ο χρήστης έκλεισε τον τεχνητό φωτισμό κατά την έξοδό του από τον χώρο.
H4	Ναι	Μετάβαση (από κλειστός σε ανοικτό)	Καταγράφεται η ανεπαρκής ένταση φωτισμού στην οποία ο χρήστης έδρασε καθώς και η πρόσθετη ένταση φωτισμού που οφείλεται στον τεχνητό φωτισμό.
H5	Ναι	Μετάβαση (από ανοικτός σε κλειστό)	Καταγράφεται η ένταση φωτισμού στην οποία ο χρήστης έδρασε κλείνοντας τον τεχνητό φωτισμό.
N1	Όχι	Κλειστός	Ο μετρητής στην επιφάνεια εργασίας μετρά μηδενικές τιμές έντασης φωτισμού μετά τη δύση του ηλίου.
N2	Ναι	Ανοικτός	Ο μετρητής στην επιφάνεια εργασίας μετρά μόνο την ένταση φωτισμού από τον τεχνητό φωτισμό.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-2 υπάρχουν διακριτές περιπτώσεις ζευγών παρουσίας χρήστη –λειτουργίας τεχνητού φωτισμού, σε κάθε μία από τις οποίες καταγράφονται διαφορετικά στοιχεία. Οι περιπτώσεις διαχωρίζονται σε Ημερήσιες (H) από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου και σε Νυχτερινές (N) όπου δεν υπάρχει φυσικό φως. Κατά την παρουσία του χρήστη στο χώρο καταγράφεται η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας η οποία οφείλεται είτε μόνο στο φυσικό φως που εισέρχεται στο χώρο (αν δεν χρησιμοποιείται ο τεχνητός φωτισμός) είτε είναι το άθροισμα του φυσικού και του τεχνητού φωτισμού. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μετρήσεις της έντασης φωτισμού στις περιπτώσεις που γίνεται αλλαγή στην κατάσταση του τεχνητού φωτισμού (ενδιάμεσες δράσεις του χρήστη). Σε αυτές θεωρείται ότι ο φυσικός φωτισμός δεν ήταν επαρκής για τον χρήστη (άρα ένιωσε όχληση και άνοιξε τον τεχνητό φωτισμό), ή ότι αισθάνθηκε πως ο φυσικός φωτισμός ήταν αρκετός, έκλεισε τον τεχνητό φωτισμό και συνέχισε να εργάζεται στο γραφείο. Οι καταγραφές αυτές αξιοποιούνται στην μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του χρήστη συναρτήσει της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας αλλά και για τη διερεύνηση της αίσθησης της άνεσης ή όχλησης για τον κάθε χρήστη, όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4. Επιπλέον, οι δράσεις των χρηστών κατά την είσοδο ή έξοδο τους από τον χώρο (δράσεις άφιξης/αναχώρησης) οδηγούν σε διαφορετικά συμπεράσματα σε σχέση με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για το λόγο αυτό οι δύο αυτές καταστάσεις πρέπει να αντιμετωπίζονται ξεχωριστά. Τέλος, από την μεθοδολογία των μετρήσεων μπορούν να εξαχθούν δεδομένα για την δημιουργία μοντέλων παρουσίας των χρηστών (occupancy modelling) καθώς και για την ενεργειακή ευαισθητοποίηση των χρηστών (π.χ. αν ο χρήστης κλείνει τον τεχνητό φωτισμό όταν φεύγει για λίγο από το γραφείο).

Η χρήση των περσίδων καταγραφόταν από τους ίδιους τους χρήστες των μελετώμενων χώρων. Ζητήθηκε από αυτούς να καταγράφουν το είδος του χειρισμού που έκαναν (άνοιγμα ή κλείσιμο περσίδας) καθώς και την αντίστοιχη χρονική στιγμή. Η πληροφορία αυτή συνδυάζεται με τις μετρήσεις έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας και τα δεδομένα για τις εξωτερικές συνθήκες με σκοπό την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη όσον αφορά στον χειρισμό των περσίδων και την ανοχή τους στο φυσικό φως. Οι χρήστες ερωτήθηκαν για τις συνήθειές τους σχετικά με τον χειρισμό των περσίδων και απάντησαν ότι κατά κανόνα χρησιμοποιούν τις περσίδες στις παραπάνω δύο διακριτές καταστάσεις, ενώ πολύ σπάνια τις ρυθμίζουν σε ενδιάμεσα επίπεδα και ακόμα σπανιότερα ρυθμίζουν την γωνία κλίσης τους. Με βάση αυτό, τους ζητήθηκε, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι περσίδες να είναι πλήρως ανοικτές ή πλήρως κλειστές, δηλαδή να αποφεύγονται οι ενδιάμεσες ρυθμίσεις. Το γεγονός ότι η πλειοψηφία των χρηστών προτιμά να έχει τις περσίδες είτε πλήρως ανοικτές είτε πλήρως κλειστές, καταγράφεται και σε άλλες μελέτες πεδίου [50][62].

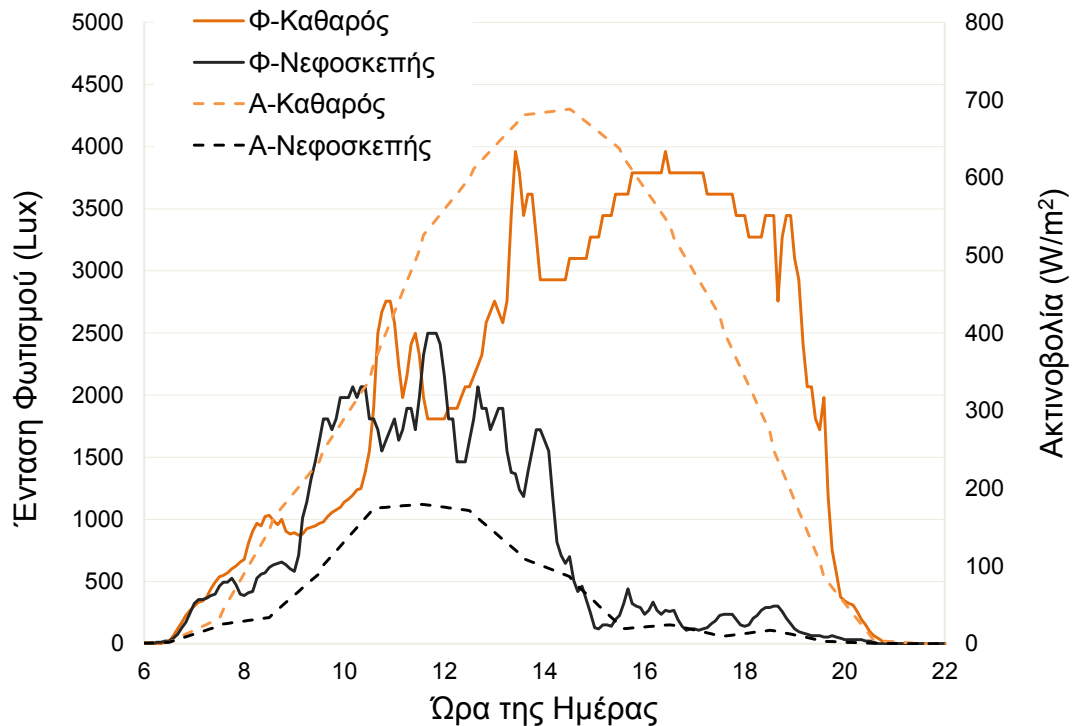
## 2.3 Ανάλυση μετρήσεων

Ο μεγάλος όγκος των διαθέσιμων δεδομένων επιτρέπει την ακριβή ανάλυση των τιμών εσωτερικής έντασης φωτισμού για πλήθος διαφορετικών συνθηκών (ουρανού, εποχής, ώρας της ημέρας, προσανατολισμού κλπ). Ταυτόχρονα γίνεται εφικτή η ταυτοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών όσον αφορά στην χρήση του τεχνητού φωτισμού και των περιόδων ενώ παράλληλα αναδεικνύονται οι διαφορές στην συμπεριφορά και τις επιλογές τους. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται ενδεικτικές χρονοσειρές έντασης φωτισμού για τα μελετώμενα γραφεία υπό διαφορετικές συνθήκες.

### 2.3.1 Επίδραση της κατάστασης του ουρανού στην εσωτερική ένταση φωτισμού

Οι ημερήσιες τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού σε χώρους που εισέρχεται το φυσικό φως, εξαρτώνται από τις αντίστοιχες τιμές της εξωτερικής ακτινοβολίας. Η μορφή και οι τιμές της τελευταίας επηρεάζονται από την ύπαρξη ή όχι νεφών. Για να υπολογιστεί η ακριβής επίδραση της κατάστασης του ουρανού στις τιμές της συνολικής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος καθώς και στις τιμές των επιμέρους συνιστωσών αυτής (απευθείας και διάχυτης) χρησιμοποιούνται μέθοδοι μοντελοποίησης των καταστάσεων του ουρανού. Επίσης οι τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού είναι διαφορετικές ανάλογα με τον προσανατολισμό του γραφείου, καθώς σχετίζονται άμεσα με την κάθετη ακτινοβολία που προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια του χώρου, η μορφή της οποίας μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη μορφή της οριζόντιας ακτινοβολίας.

Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται δύο ημερήσιες χρονοσειρές έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του Γραφείου 1 για δύο διαδοχικές ημέρες (15 και 16 Ιουλίου) στις οποίες η αντίστοιχη κατάσταση του ουρανού διαφέρει, όπως και οι τιμές της ακτινοβολίας. Επιπλέον, τις ημέρες αυτές οι χρήστες δεν είναι στο γραφείο, με αποτέλεσμα η εσωτερική ένταση φωτισμού να εξαρτάται αποκλειστικά από την ακτινοβολία χωρίς να αλλάζει εξαιτίας δράσεων των χρηστών. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι την ημέρα με καθαρό ουρανό όπου η οριζόντια ακτινοβολία παρουσιάζει υψηλές τιμές, υπάρχουν και αντίστοιχα μεγάλες τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού, οι οποίες μάλιστα, λόγω του Νοτιοδυτικού προσανατολισμού του γραφείου, διαρκούν μέχρι την δύση του ηλίου (στις 20:50). Αντίθετα, την ημέρα που υπάρχει νεφοκάλυψη, οι τιμές και των δύο μεγεθών είναι σημαντικά χαμηλότερες.



Σχήμα 2-4 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για δύο ημέρες με διαφορετική κατάσταση ουρανού, χωρίς παρουσία χρήστη.

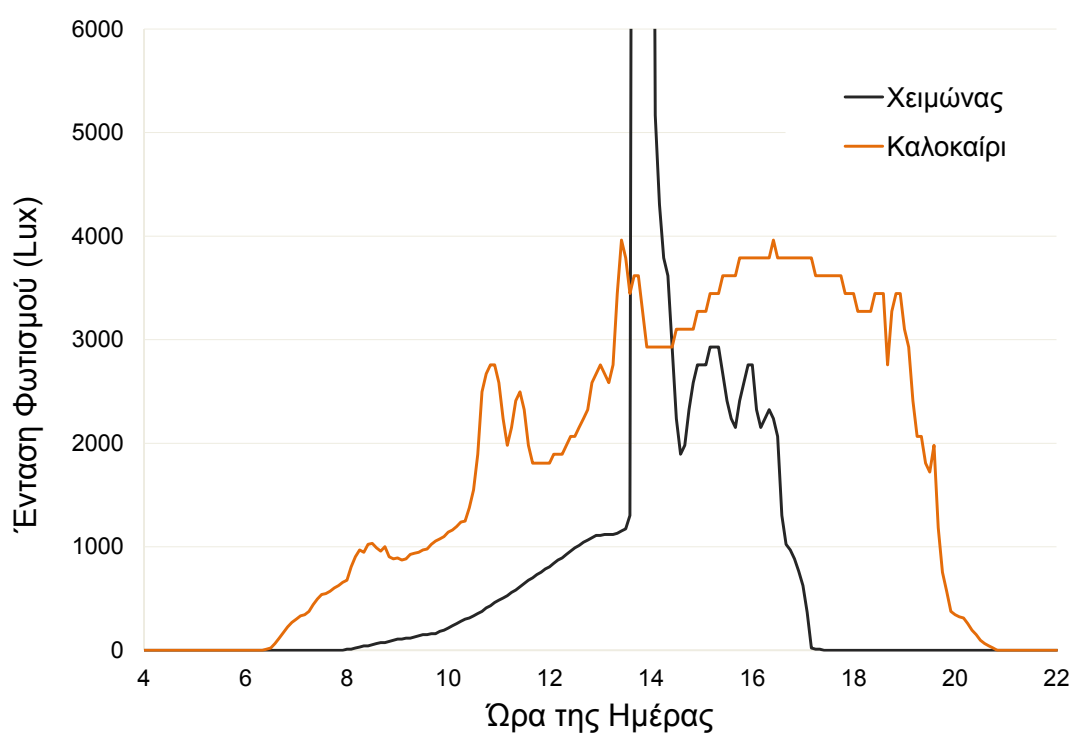
### 2.3.2 Επίδραση της εποχής στην εσωτερική ένταση φωτισμού

Η μορφή και οι τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού (μόνο από την ύπαρξη φυσικού φωτός) εμφανίζουν επίσης εποχικές διαφοροποιήσεις. Η διαφορετική γωνία ηλιακού ύψους μέσα στο έτος έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει άμεση εισχώρηση φυσικού φωτός στο χώρο κατά τους χειμερινούς μήνες για τους οποίους η γωνία ηλιακού ύψους είναι μικρή ενώ αντίθετα τους θερινούς μήνες το φυσικό φως δεν εισχωρεί άμεσα. Φυσικά τα παραπάνω εξαρτώνται και από τον προσανατολισμό του κάθε χώρου.

Στο Σχήμα 2-5 παρουσιάζονται δύο ημερήσιες χρονοσειρές έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του Γραφείου 1, χωρίς παρουσία χρηστών. Η μία αφορά μία ημέρα του Ιανουαρίου (1 Ιανουαρίου) για την οποία η γωνία ηλιακού ύψους έχει μέγιστη τιμή τις 30°, και η άλλη μία ημέρα του Ιουλίου (15 Ιουλίου) για την οποία η μέγιστη τιμή της γωνίας του ηλιακού ύψους είναι 70°. Οι συνθήκες ουρανού είναι παρόμοιες και στις δύο ημέρες όπως φαίνεται από το αντίστοιχο Σχήμα 2-6 στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές της οριζόντιας και κάθετης ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια του Γραφείου. Το χειμώνα τόσο η ακτινοβολία όσο και η εσωτερική ένταση φωτισμού εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το καλοκαίρι. Εντούτοις για ένα χρονικό διάστημα (περίπου 30 min), υπάρχει άμεση διείσδυση φυσικού φωτός στην επιφάνεια εργασίας και έτσι οι τιμές έντασης φωτισμού ξεπερνούν τα 15 kLux. Τέτοιο φαινόμενο δεν παρατηρείται το καλοκαίρι.

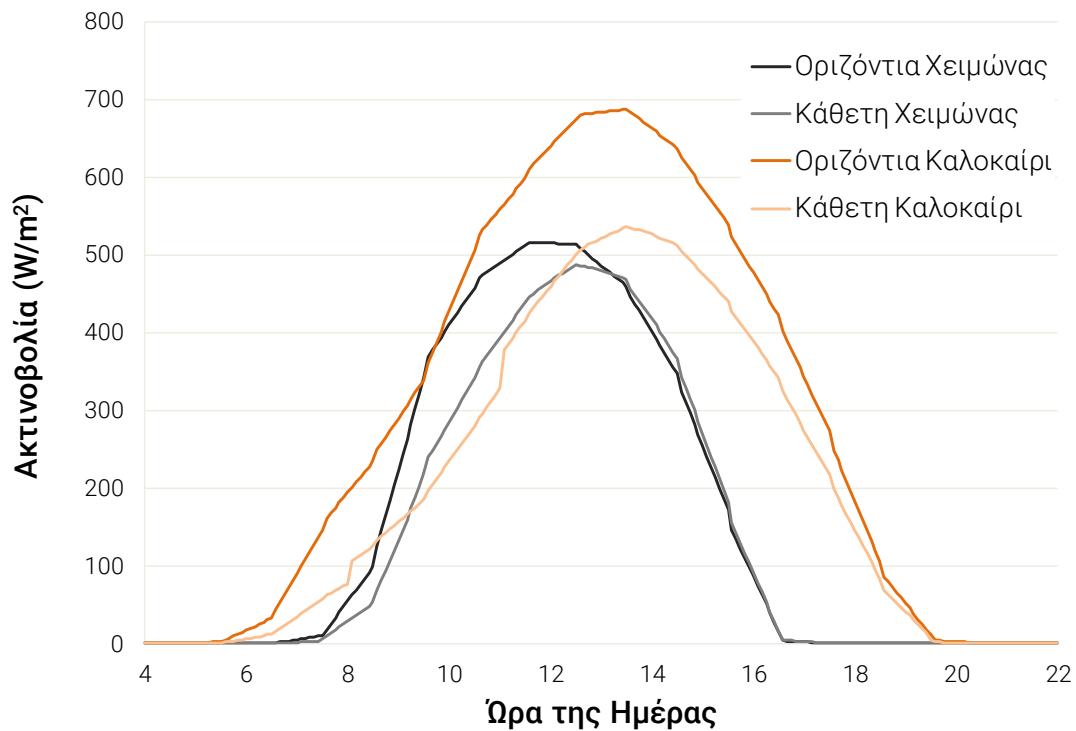
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-6 η οριζόντια ακτινοβολία το χειμώνα είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με το καλοκαίρι, ωστόσο οι αντίστοιχες κάθετες συνιστώσες στην επιφάνεια του κτιρίου εμφανίζουν τιμές με μικρότερη απόκλιση μεταξύ τους. Το καλοκαίρι, σε αντίθεση με το χειμώνα, η κάθετη ακτινοβολία είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με την οριζόντια, λόγω της μεγάλης τιμής της γωνίας ηλιακού ύψους. Στα δύο Σχήματα γίνεται επίσης εμφανής και η διαφορά στην διάρκεια της ημέρας ανάμεσα στις δύο εποχές.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν σε σκέψεις σχετικά με τις αντίστοιχες δράσεις που θα έκαναν οι χρήστες του χώρου. Αν και το χειμώνα οι τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού είναι γενικά χαμηλότερες σε σχέση με το καλοκαίρι, εντούτοις υπάρχουν οχλήσεις λόγω της άμεσης διείσδυσης του φυσικού φωτός που μπορεί να οδηγήσει σε κλείσιμο των περσίδων. Επομένως η εποχή του έτους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών.



Σχήμα 2-5 Καταγραφές έντασης φωτισμού για μία ημέρα του Χειμώνα και μία του Καλοκαιριού με παρόμοια κατάσταση ουρανού, χωρίς παρουσία χρήστη.





Σχήμα 2-6 Χρονοσειρές οριζόντιας και κάθετης ακτινοβολίας για τις ημέρες του Σχήματος 2-5.

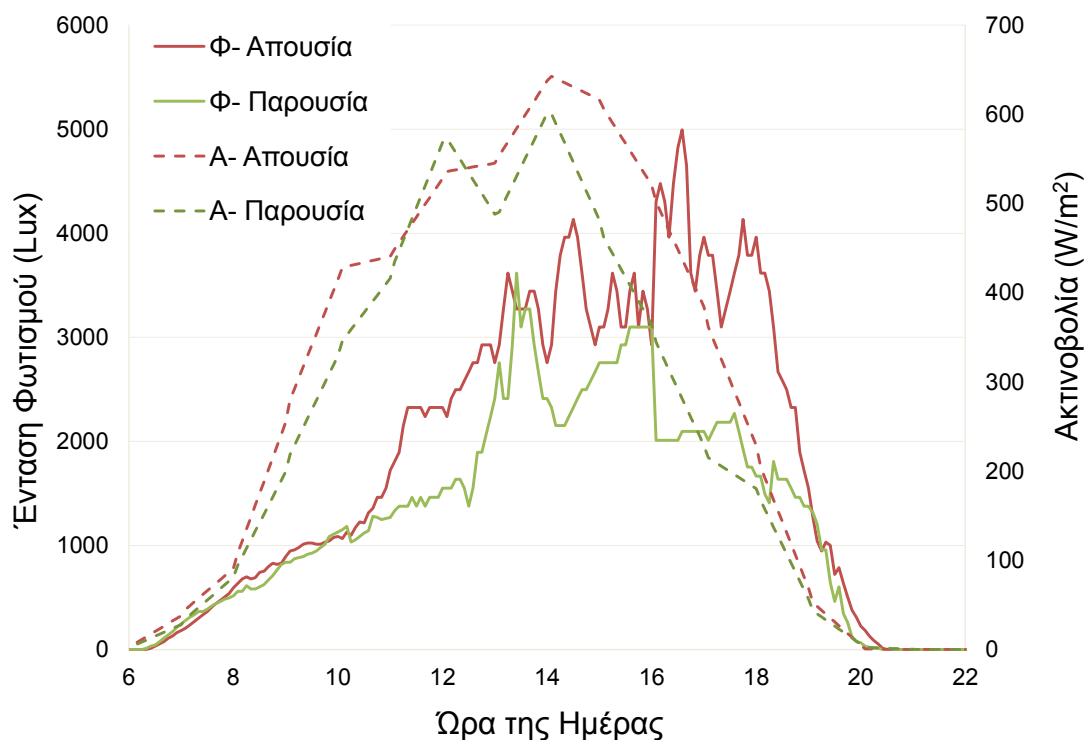
### 2.3.3 Επίδραση των δράσεων των χρηστών στην εσωτερική ένταση φωτισμού

Οι τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού δεν επηρεάζονται μόνο από της εξωτερικές συνθήκες όπως αναλύθηκε προηγουμένως αλλά αλλάζουν εξαιτίας και των δράσεων των χρηστών, οι οποίοι ελέγχουν τον τεχνητό φωτισμό και τις περσίδες με σκοπό να δημιουργήσουν συνθήκες άνεσης στο περιβάλλον τους.

Δύο παραδείγματα στα οποία φαίνεται η επίδραση των δράσεων των χρηστών του Γραφείου 1 στις τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού δίνονται στα Σχήματα 2-7 και 2-8. Επιλέχθηκαν ημέρες που να είναι κοντά χρονολογικά (έτσι ώστε να μην υπεισέρχεται η επίδραση της εποχής του χρόνου) και επίσης να έχουν κατά το δυνατό παρόμοιες εξωτερικές συνθήκες (ακτινοβολία). Στα Σχήματα αυτά δίνονται οι μετρήσεις της εσωτερικής έντασης φωτισμού για μία ημέρα με απουσία και μία ημέρα με παρουσία χρήστη καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της οριζόντιας ακτινοβολίας των ημερών αυτών.

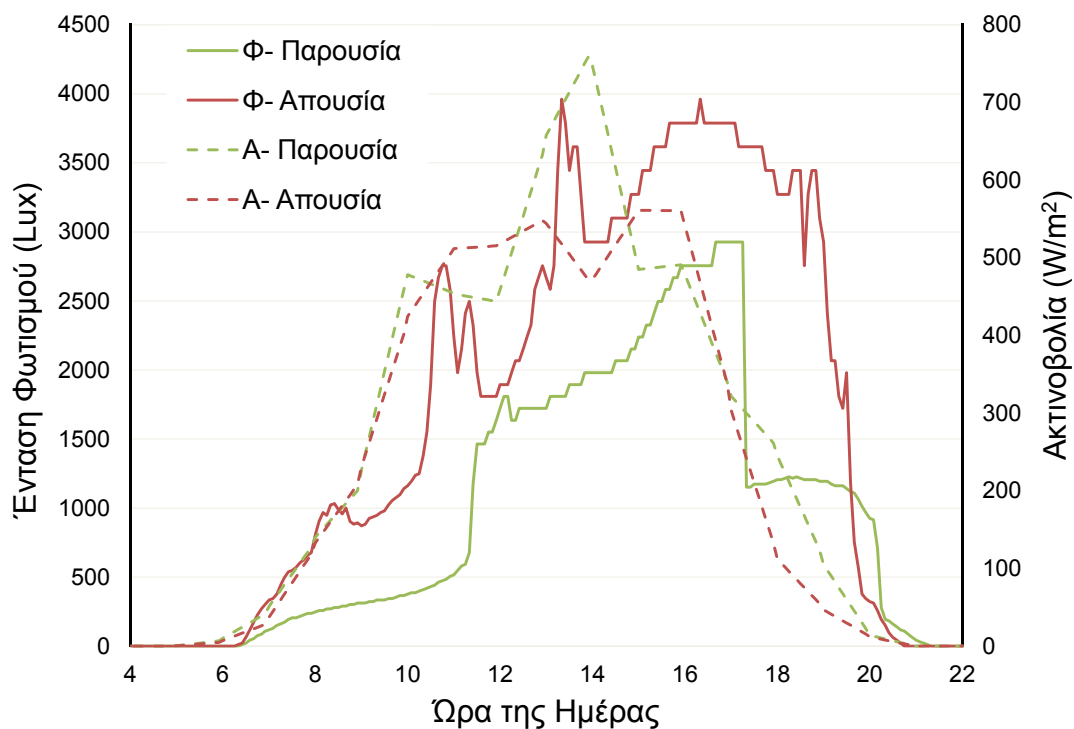
Στο Σχήμα 2-7 παρουσιάζονται δύο ημέρες του Μαΐου. Στην πρώτη ημέρα (1<sup>η</sup> Μαΐου) οι χρήστες δεν είναι παρόντες, ενώ στην δεύτερη ημέρα (3 Μαΐου), υπάρχει παρουσία χρηστών στο χώρο από τις 8:15 έως τις 20:20 (όπως προκύπτει από τον καταγράφεα παρουσίας). Παρατηρούνται διαφορές στην εσωτερική ένταση φωτισμού που εξηγούνται λόγω των αντίστοιχων διαφορών ανάμεσα στις ακτινοβολίες των δύο ημερών, ωστόσο η πιο έντονη διαφορά εμφανίζεται στις 16:00, στιγμή κατά την οποία οι χρήστες έκλεισαν τις περσίδες στα 3000 Lux και καταγράφηκε απότομη πτώση της έντασης φωτισμού. Αντίθετα, στην ημέρα

απουσίας των χρηστών, την ίδια χρονική στιγμή η ένταση φωτισμού αυξάνεται και φτάνει στο μέγιστό της στις 16:45 (λόγω του Νοτιοδυτικού προσανατολισμού του Γραφείου).



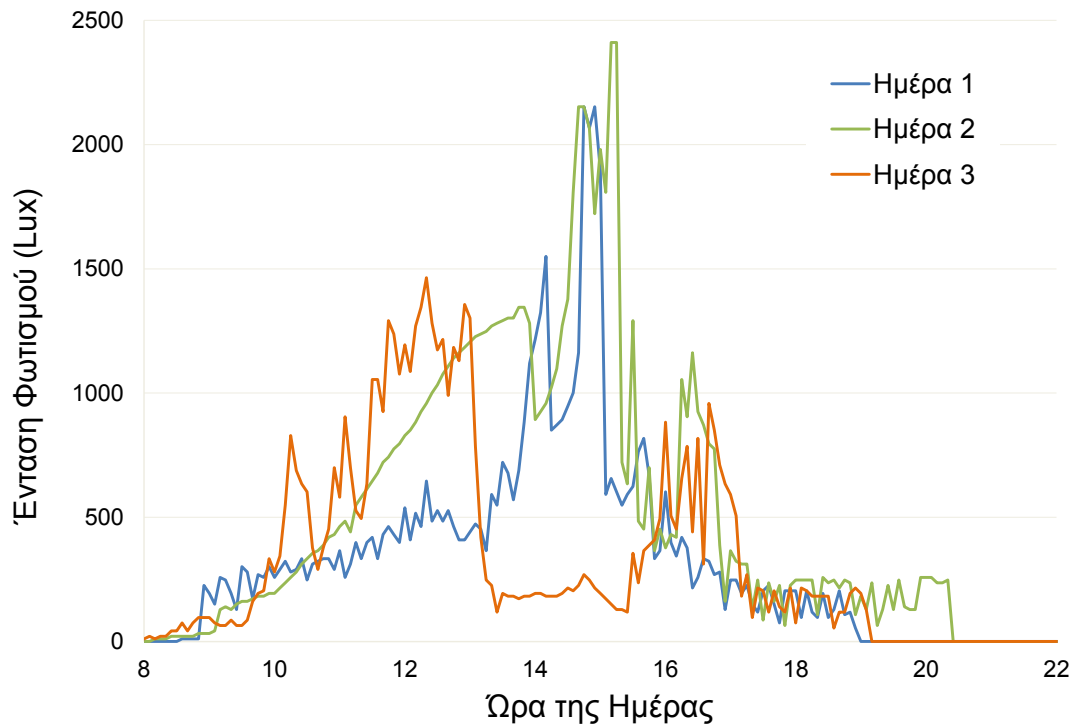
Σχήμα 2-7 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για δύο ημέρες του Μαΐου, με παρουσία και απουσία χρηστών.

Ενδιαφέρουσες περιπτώσεις που δείχνουν τις δράσεις των χρηστών, φαίνονται και στο Σχήμα 2-8 όπου παρουσιάζονται δύο ημέρες του Ιουλίου. Στην πρώτη ημέρα (15 Ιουλίου) οι χρήστες δεν είναι παρόντες, ενώ στην δεύτερη ημέρα (12 Ιουλίου), υπάρχει παρουσία χρηστών στο χώρο από τις 8:30 έως τις 20:30. Παρατηρούνται έντονες διαφορές στις δύο καμπύλες της εσωτερικής έντασης φωτισμού κατά τις πρωινές ώρες, αν και οι αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας είναι παρόμοιες. Ο λόγος είναι ότι την ημέρα παρουσίας των χρηστών, κάποιες από τις περσίδες των παραθύρων είχαν μείνει κλειστές από την προηγούμενη αναχώρηση τους με αποτέλεσμα η διείσδυση του φυσικού φωτός να είναι μικρότερη. Οι χρήστες επιλέγουν να ανοίξουν όλες τις περσίδες στις 11:20 (όπου και παρατηρείται απότομη αύξηση της έντασης φωτισμού), ενώ τις ξανακλείνουν στις 17:15 (σε επίπεδο έντασης φωτισμού 2900 Lux). Οι περσίδες παραμένουν κλειστές μετά την αναχώρηση των χρηστών, αφού δεν έχει καταγραφεί κάποια δράση ανοίγματος. Από τα παραπάνω γίνεται εμφανέστερη η ποικιλία των δράσεων των χρηστών για ημέρες με παρόμοιες εξωτερικές συνθήκες ενώ φαίνεται και η ένταση φωτισμού στον ίδιο χώρο χωρίς παρουσία χρηστών.

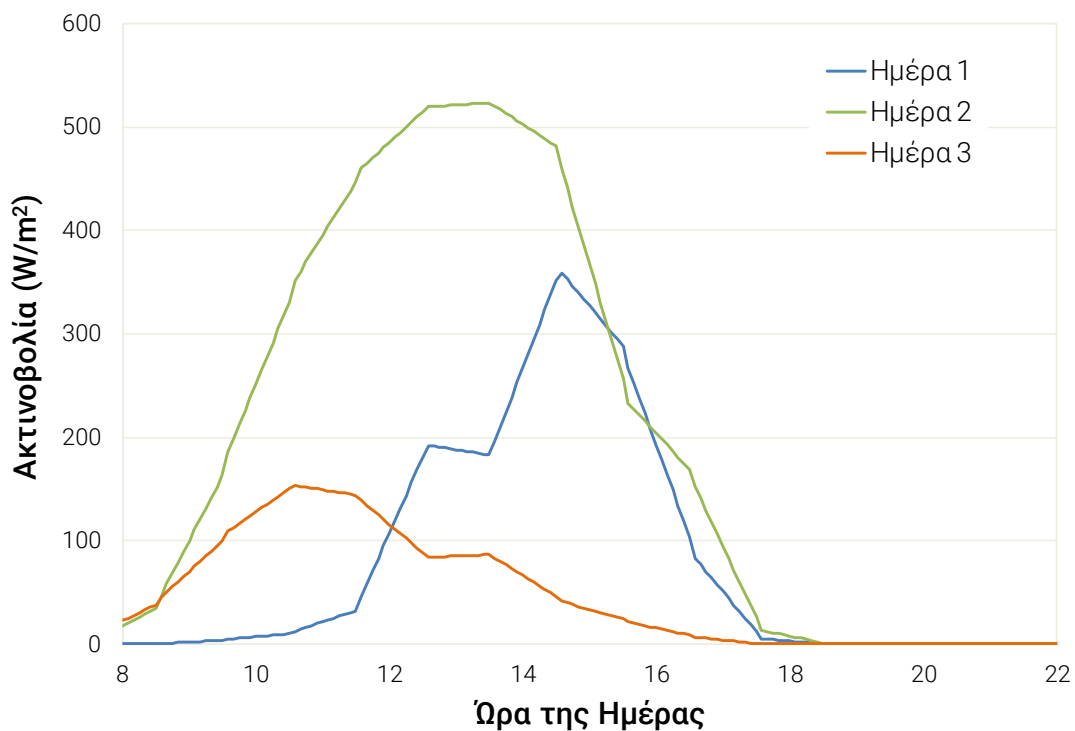


Σχήμα 2-8 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για δύο ημέρες του Ιουλίου, με παρουσία και απουσία χρηστών.

Ένα άλλο παράδειγμα που αποκαλύπτει την ποικιλία των καμπυλών της εσωτερικής έντασης φωτισμού για το ίδιο γραφείο κάτω από συνθήκες διαφορετικής ακτινοβολίας και με την παρουσία χρηστών στο χώρο δίνεται στο Σχήμα 2-9, με τις αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας στο Σχήμα 2-10. Πρόκειται και πάλι για ημέρες του ίδιου μήνα, συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι 18, 21 και 25 Ιανουαρίου. Στις ημέρες αυτές διακρίνεται και η επίδραση του τεχνητού φωτισμού στις μετρήσεις έντασης φωτισμού, που εμφανίζεται με τη μορφή θορύβου (μικρών αυξομειώσεων) στις καμπύλες. Λόγω της χαμηλής ακτινοβολίας η χρήση του τεχνητού φωτισμού είναι σχεδόν συνεχής τις Ημέρες 1 και 3 ενώ την Ημέρα 2 η χρήση του εμφανίζεται μετά το μεσημέρι.



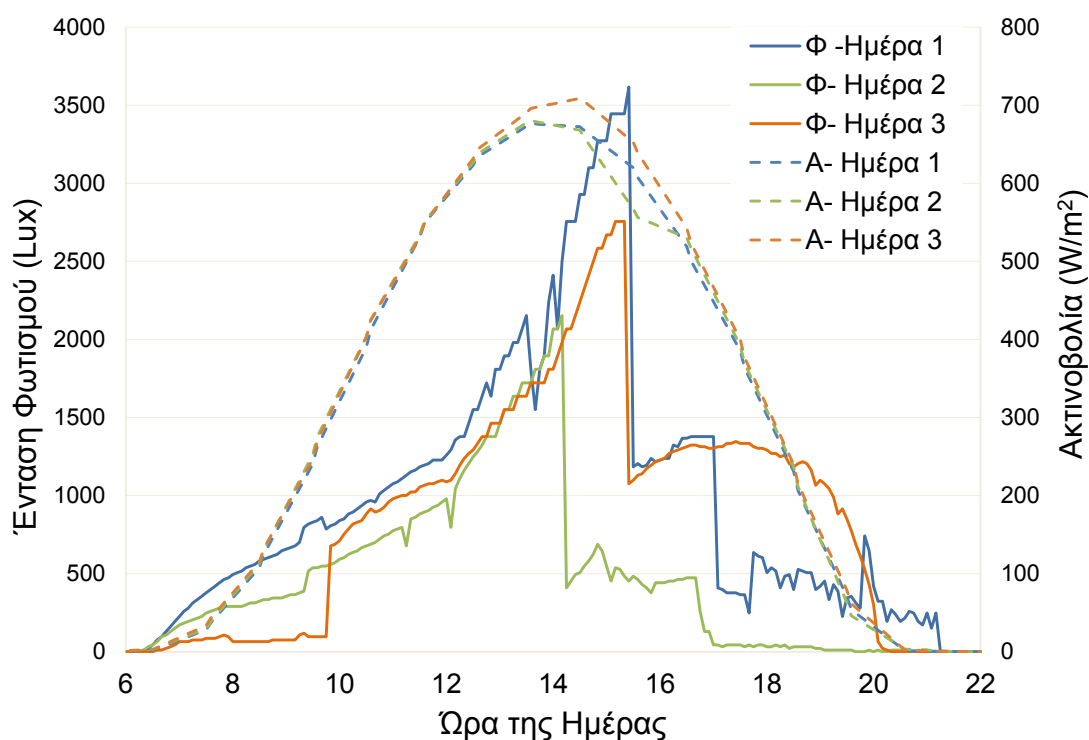
Σχήμα 2-9 Καταγραφές έντασης φωτισμού για τρεις ημέρες του Ιανουαρίου όπου γίνεται εμφανής η χρήση του τεχνητού φωτισμού.



Σχήμα 2-10 Καταγραφές ακτινοβολίας για τις τρεις ημέρες του Σχήματος 2-9.

Η στοχαστικότητα στη συμπεριφορά του χρήστη ενός γραφείου και η επίδρασή της στην καμπύλη της εσωτερικής έντασης φωτισμού φαίνεται έντονα στο Σχήμα 2-11. Σε αυτό

παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα τρεις Ημέρες παρουσίας των χρηστών του Γραφείου 1 (2, 4 και 5 Μαΐου), όπου επικρατούν παρόμοιες εξωτερικές συνθήκες. Γίνεται φανερή η διαφορά ανάμεσα στις τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού για τις οποίες ο χρήστης αισθάνθηκε όχληση και έκλεισε της περσίδες (η δράση αυτή αποτυπώνεται κάθε ημέρα στο γράφημα μέσω της έντονης στιγμιαίας πτώσης των τιμών έντασης φωτισμού). Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από τα 1350 έως τα 3500 Lux. Ενδιαφέρουσα παρατήρηση αποτελεί επίσης ότι την Ημέρα 1 ο χρήστης επιλέγει στις 17:00 να κλείσει και τις υπόλοιπες περσίδες στα 1350 Lux και στην συνέχεια να χρησιμοποιήσει τον τεχνητό φωτισμό. Αντίθετα, την Ημέρα 2 κατά την ίδια χρονική περίοδο οι περσίδες αυτές παρέμειναν ανοικτές και ο φυσικός φωτισμός είναι ανεκτός αλλά και επαρκής για τους χρήστες (δεν έγινε δηλαδή χρήση του τεχνητού φωτισμού). Σημειώνεται ότι και τις δύο αυτές μέρες οι χρήστες αναχώρησαν από το γραφείο την ίδια ώρα (20:30). Επιπλέον το γεγονός ότι την Ημέρα 1 οι περσίδες παρέμειναν κλειστές μετά την αναχώρηση των χρηστών αποτυπώνεται το πρωί της Ημέρας 2, όπου η εσωτερική ένταση φωτισμού έχει πολύ μικρές τιμές μέχρι τις 9:40 όπου οι χρήστες εισέρχονται στο χώρο και τις ανοίγουν.

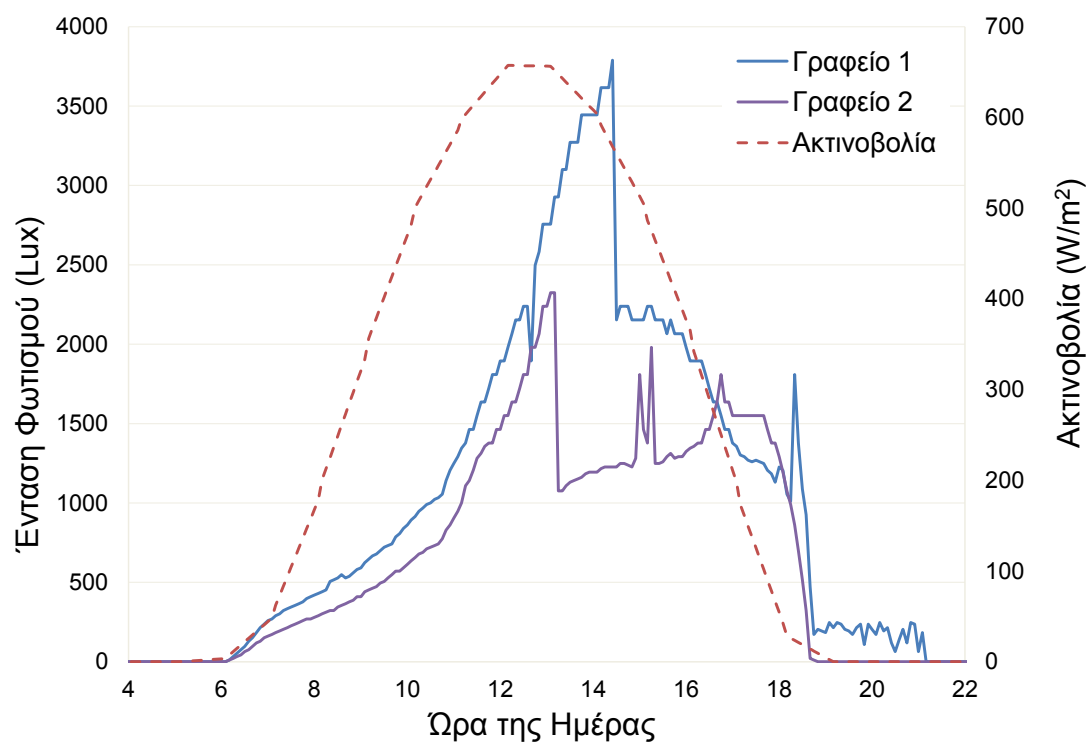


Σχήμα 2-11 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για τρεις ημέρες με όμοια κατάσταση ουρανού όπου φαίνεται η επίδραση της συμπεριφοράς του χρήστη.

### 2.3.4 Διαφορετικότητα των δράσεων χρηστών σε γραφεία με ίδιο προσανατολισμό

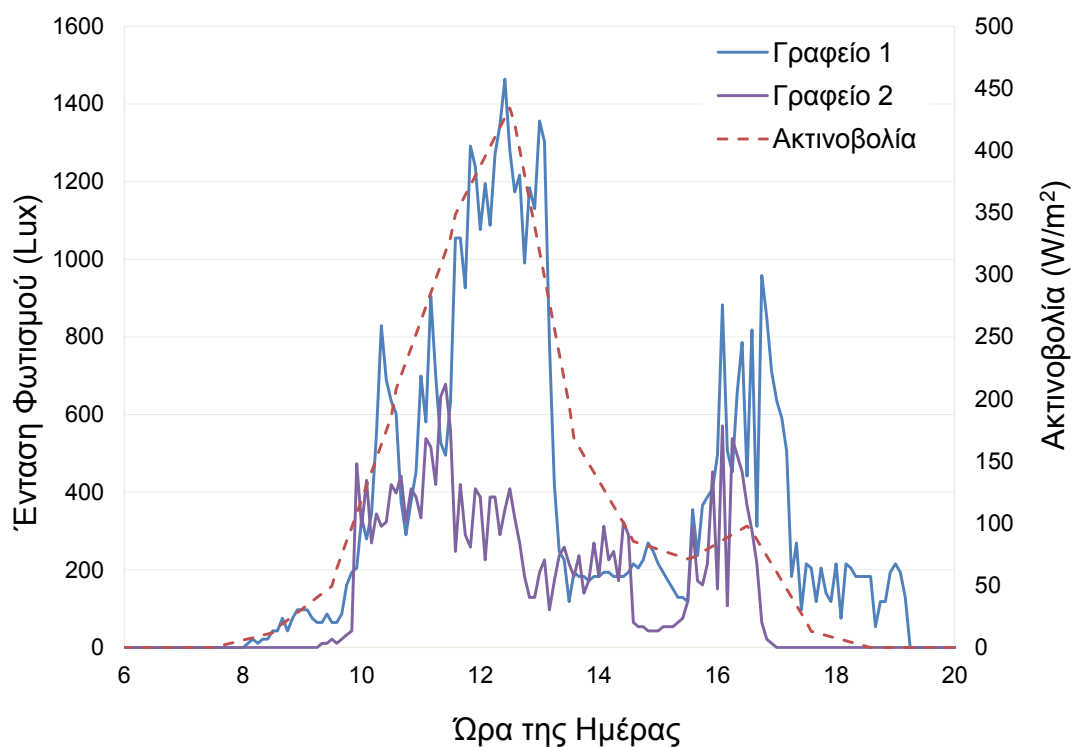
Βασικό κομμάτι της ανάλυσης των μετρήσεων, αποτελεί η διερεύνηση των πιθανών διαφορών στη συμπεριφορά των χρηστών σε χώρους με όμοια αντικειμενικά χαρακτηριστικά. Τα συμπεράσματα αυτά θα οδηγήσουν στην σωστή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη, έτσι ώστε αυτός να αντιμετωπίζεται κατάλληλα από τον αλγόριθμο πρόβλεψης που θα προταθεί στη συνέχεια.

Δύο παραδείγματα που αναδεικνύουν τέτοιες διαφορές παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-12 και 2-13. Σε αυτά παρατίθενται δύο καμπύλες εσωτερικής έντασης φωτισμού (μία για το Γραφείο 1 και μία για το Γραφείο 2) για την ίδια μέρα του έτους, σε κοινό διάγραμμα με την επικρατούσα ακτινοβολία. Υπενθυμίζεται ότι τα δύο αυτά γραφεία έχουν ίδιο προσανατολισμό (βρίσκονται μάλιστα το ένα δίπλα στο άλλο) και επίσης έχουν ίδια επιφάνεια και μέγεθος παραθύρων. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2-12 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εσωτερικής έντασης φωτισμού για μία καθαρή ημέρα του Μαρτίου (28 Μαρτίου). Είναι φανερές οι διαφορές ανάμεσα στις δύο χρονοσειρές των εντάσεων φωτισμού οι οποίες οφείλονται σε διαφορετικές ρυθμίσεις των περσίδων και του τεχνητού φωτισμού. Ο χρήστης του Γραφείου 1 επιλέγει να κάνει χρήση των περσίδων στα 3700 Lux, ενώ αντίθετα ο χρήστης του Γραφείου 2 κάνει την ίδια κίνηση σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο (2400 Lux).



Σχήμα 2-12 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για την ίδια ημέρα με καθαρό ουρανό, σε δύο γραφεία με όμοιο προσανατολισμό.

Αντίστοιχες διαφορές παρατηρούνται και στο Σχήμα 2-13 όπου δίνονται οι καμπύλες της εσωτερικής έντασης φωτισμού για τα ίδια γραφεία μία ημέρα του Ιανουαρίου (11 Ιανουαρίου). Η ημέρα είναι μερικώς νεφελώδης, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να είναι χαμηλότερη και να γίνεται χρήση του τεχνητού φωτισμού από τους χρήστες. Ωστόσο και πάλι είναι φανερό ότι ο χρήστης του Γραφείου 2 επιλέγει να εργάζεται σε χαμηλότερα επίπεδα εσωτερικής έντασης φωτισμού, ενώ παράλληλα δεν ανέχεται μεγάλες αυξομειώσεις στην ένταση φωτισμού που επικρατεί. Τέλος επιλέγει να κλείνει τελείως τις περσίδες κατά την αναχώρησή του από το γραφείο (14:30).

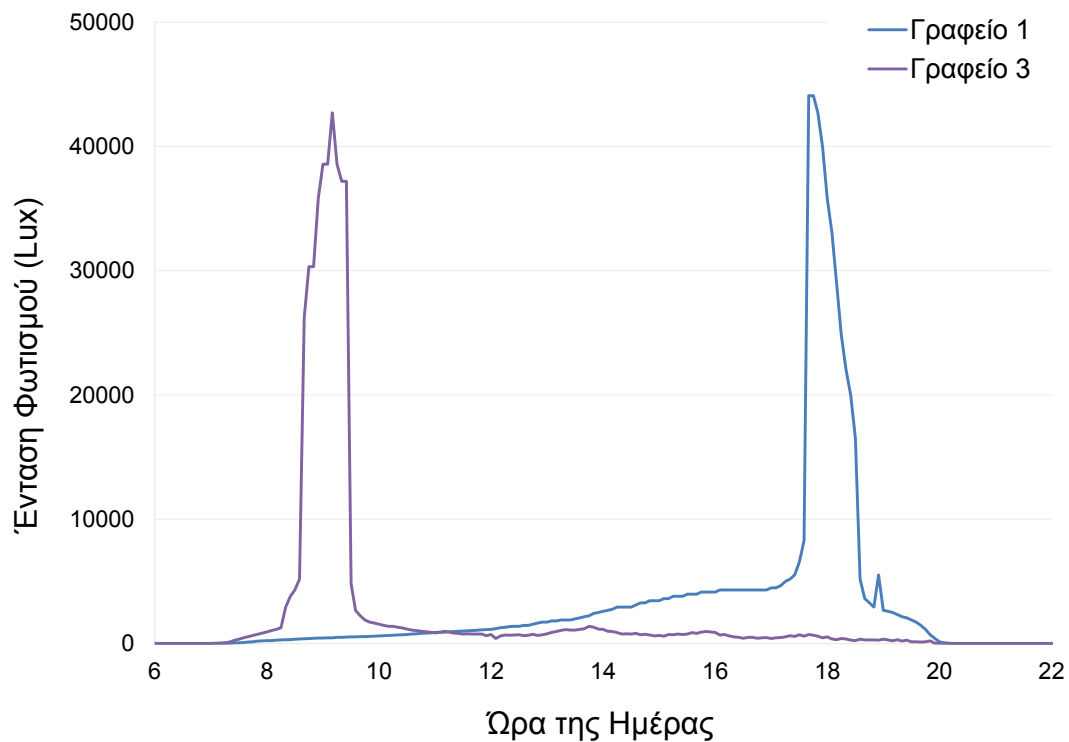


Σχήμα 2-13 Καταγραφές έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας για την ίδια ημέρα με μερικώς νεφελώδη ουρανό, σε δύο γραφεία με όμοιο προσανατολισμό.

### 2.3.5 Επίδραση του προσανατολισμού στην εσωτερική ένταση φωτισμού

Στις προηγούμενες παραγράφους δόθηκαν παραδείγματα που αποκαλύπτουν την επίδραση της κατάστασης του ουρανού και της εποχής στην εσωτερική ένταση φωτισμού ενός χώρου. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθεί η επίδραση του προσανατολισμού στην παραπάνω ένταση φωτισμού. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-14 οι καμπύλες της εσωτερικής έντασης φωτισμού για το Γραφείο 1 με Νοτιοδυτικό προσανατολισμό και για το Γραφείο 3 με Βορειοανατολικό προσανατολισμό. Οι ημέρες που παρουσιάζονται (1 και 11 Απριλίου) επιλέχθηκαν ώστε να έχουν πλήρη ηλιοφάνεια έτσι ώστε να εμφανιστούν οι υψηλότερες τιμές έντασης φωτισμού (άμεσο ηλιακό φως) στην επιφάνεια των δύο γραφείων κατά την ανατολή και δύση του ηλίου. Φυσικά, εάν οι χρήστες ήταν παρόντες στο γραφείο θα

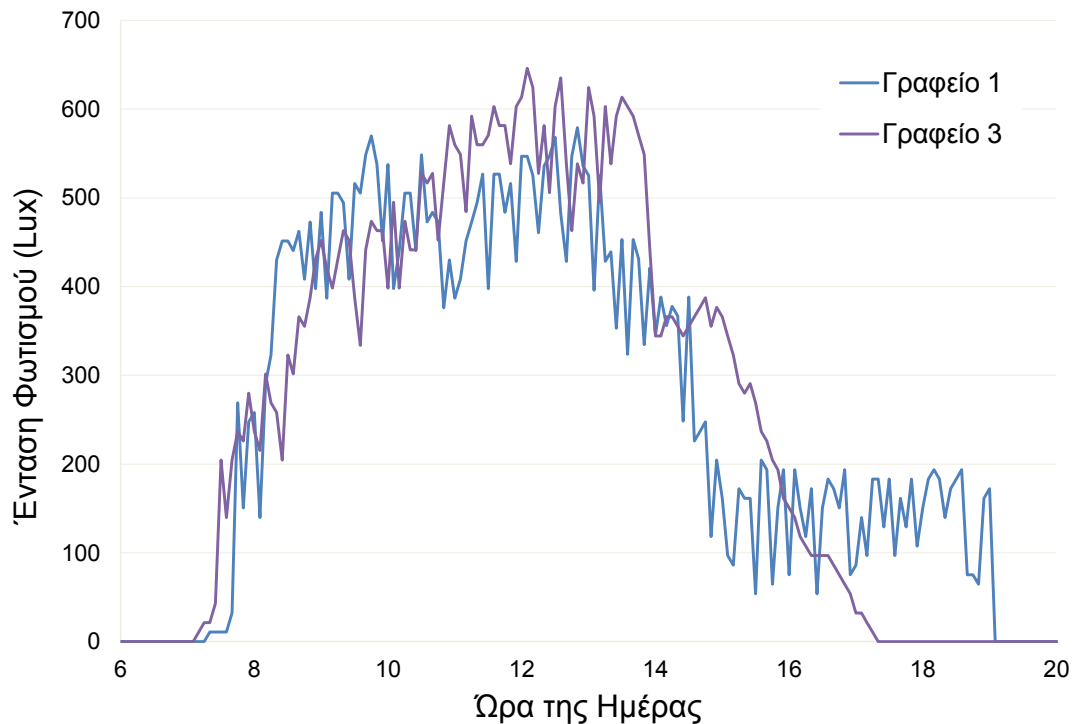
είχαν περιορίσει τις ακραίες αυτές τιμές κάνοντας χρήση των μέσων σκίασης. Από το Σχήμα γίνεται φανερή η έντονη διαφορά στην μορφή της καμπύλης της έντασης φωτισμού λόγω του διαφορετικού (αντίθετου) προσανατολισμού και ενισχύεται λοιπόν η πεποίθηση ότι και ο προσανατολισμός του κτιρίου θα πρέπει να θεωρείται ως κρίσιμη μεταβλητή εισόδου για τον αλγόριθμο που θα σχεδιαστεί.



Σχήμα 2-14 Καταγραφές έντασης φωτισμού για ημέρα με καθαρό ουρανό, στο Γραφείο 1 (με ΝΔ προσανατολισμό) και στο Γραφείο 3 (με ΒΑ προσανατολισμό), χωρίς παρουσία χρήστη.

Ο προσανατολισμός του γραφείου παύει να έχει σημασία όταν ο ουρανός είναι νεφοσκεπής. Στην περίπτωση αυτή σχεδόν μηδενίζεται η άμεση ακτινοβολία και παραμένει μόνο η διάχυτη. Ένα παράδειγμα τέτοιων ημερών φαίνεται στο Σχήμα 2-15 όπου δίνονται οι χρονοσειρές της εσωτερικής έντασης φωτισμού για τα ίδια γραφεία αντίθετου προσανατολισμού (Γραφείο 1 και Γραφείο 3) για μία νεφοσκεπή μέρα (20 Ιανουαρίου και 17 Φεβρουαρίου). Το στοιχείο του διαφορετικού προσανατολισμού δεν αποτυπώνεται καθόλου, ενώ εμφανής είναι μόνο η χρήση του τεχνητού φωτισμού και στα δύο γραφεία κατά τις ώρες παρουσίας των χρηστών.



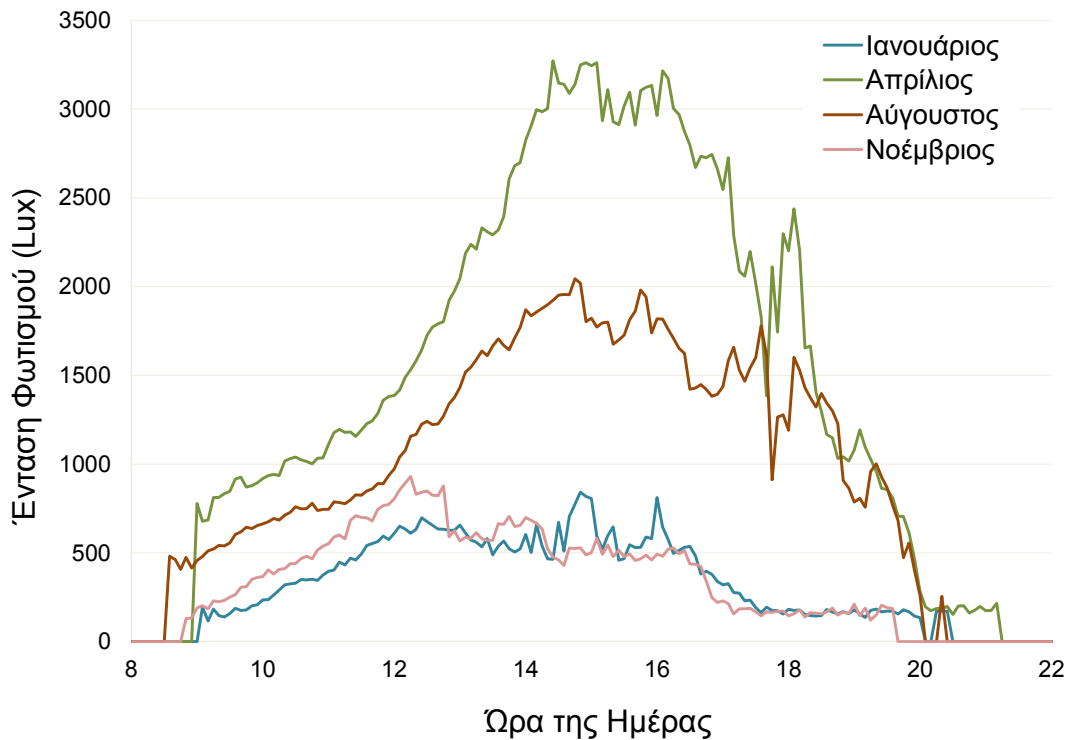


Σχήμα 2-15 Καταγραφές έντασης φωτισμού για ημέρα με νεφροσκεπή ουρανό, στο Γραφείο 1 (με ΝΔ προσανατολισμό) και στο Γραφείο 3 (με ΒΑ προσανατολισμό), με παρουσία χρήστη.

### 2.3.6 Μέσο ημερήσιο προφίλ εσωτερικής έντασης φωτισμού ανά μήνα

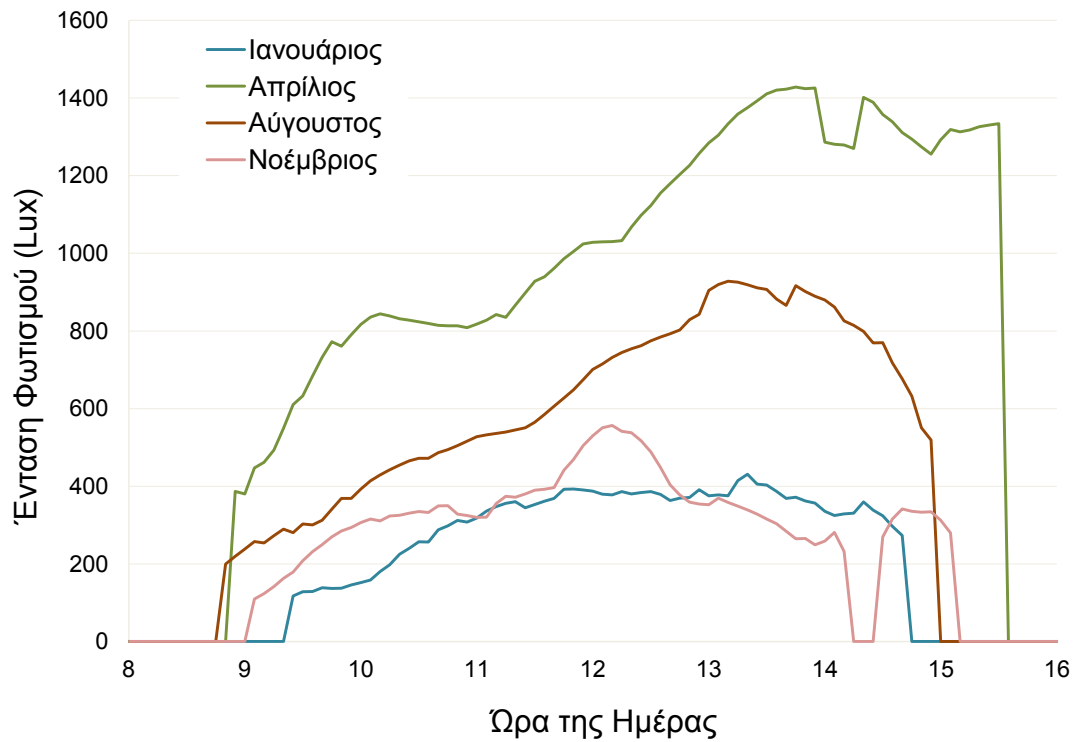
Όλοι οι παράγοντες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (κατάσταση ουρανού, εποχή, προσανατολισμός, δράσεις των χρηστών) επηρεάζουν την μορφή και τις τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο κάθε γραφείο, όπως αυτή αποτυπώνεται και στο μέσο ημερήσιο προφίλ ανά μήνα που παρουσιάζεται στη συνέχεια (Σχήμα 2-16, Σχήμα 2-17, Σχήμα 2-18). Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ώρες παρουσίας των χρηστών στο κάθε γραφείο.

Αναλυτικότερα στο Σχήμα 2-16, παρουσιάζονται για το Γραφείο 1 οι μήνες Ιανουάριος, Απρίλιος, Αύγουστος και Νοέμβριος ως αντιπροσωπευτικοί μήνες της κάθε εποχής του έτους. Ο Απρίλιος είναι ο μήνας στον οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού, ενώ αντίθετα οι χαμηλότερες τιμές συναντώνται τον Ιανουάριο και τον Νοέμβριο. Το Γραφείο αυτό εμφανίζει ένα ευρύ διάστημα παρουσίας των χρηστών από τις 8:30 ως τις 21:30 λόγω και της συνύπαρξης πολλών χρηστών. Επιπλέον οι τιμές της έντασης φωτισμού που εμφανίζονται στα παρακάτω Σχήματα κυμαίνονται από τα 250 Lux (τους χειμερινούς μήνες) μέχρι τα 3250 Lux τον Απρίλιο. Το ευρύ αυτό φάσμα τιμών δείχνει ότι οι χρήστες δεν έχουν συγκεκριμένες τιμές άνεσης, αλλά αντίθετα προσπαθούν να εκμεταλλεύονται τον φυσικό φωτισμό που είναι διαθέσιμος στο χώρο.



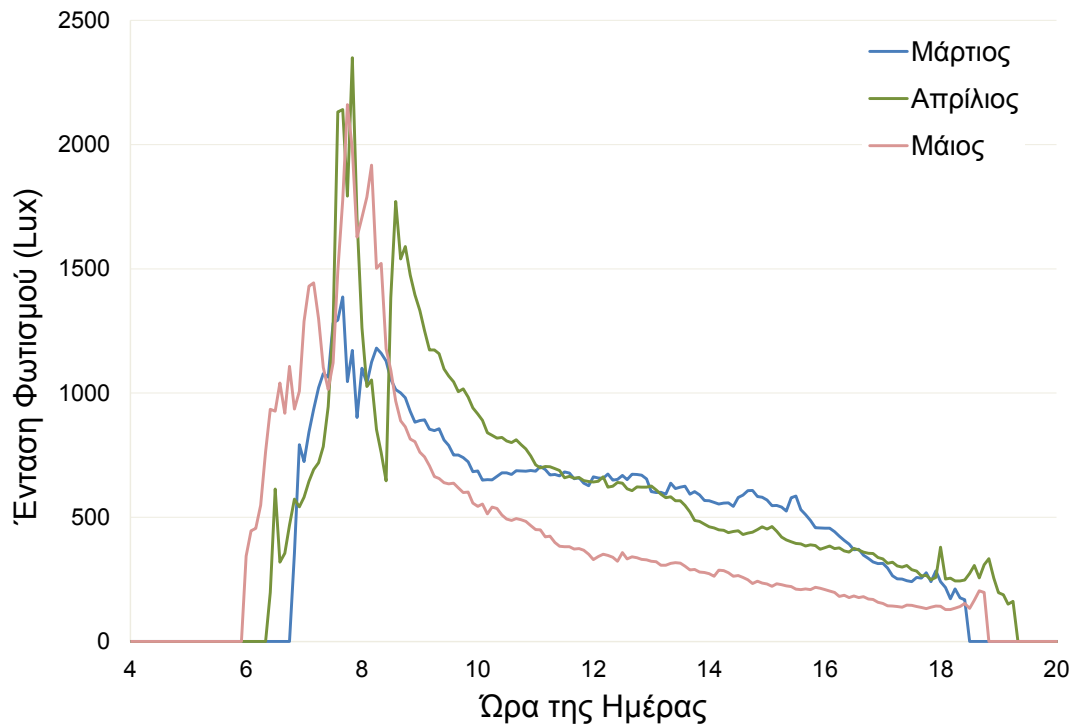
Σχήμα 2-16 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού ανά μήνα για τις ώρες παρουσίας του χρήστη, Γραφείο 1.

Στο Σχήμα 2-17 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για το Γραφείο 2 οι οποίες γενικώς εμφανίζουν παρόμοια μορφή. Υπάρχει όμως μία σημαντική διαφορά. Οι τιμές έντασης φωτισμού του Γραφείου 2 (από 150 ως 1400 Lux) είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με αυτές του Γραφείου 1. Αναλογιζόμενοι ότι τα δύο γραφεία έχουν ίδιο προσανατολισμό, επιφάνεια παραθύρων και ότι οι θέσεις εργασίας στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις απέχουν το ίδιο από αυτά, είναι φανερό ότι ο μόνος λόγος εμφάνισης των διαφορών αυτών είναι οι διαφορετικές προτιμήσεις των χρηστών τους. Ο χρήστης του Γραφείου 2 επιλέγει να διατηρεί στο χώρο χαμηλά επίπεδα έντασης φωτισμού κάνοντας συχνότερη χρήση των περσίδων. Εμφανίζει επομένως μικρότερη ανοχή στο φυσικό φως, ωστόσο δεν κάνει συχνή χρήση ούτε του τεχνητού φωτισμού. Η σύγκριση αυτή, τονίζει το πόσο μπορούν να διαφέρουν οι επιλογές των χρηστών και οι συνθήκες έντασης φωτισμού στις οποίες αυτοί αισθάνονται άνεση.



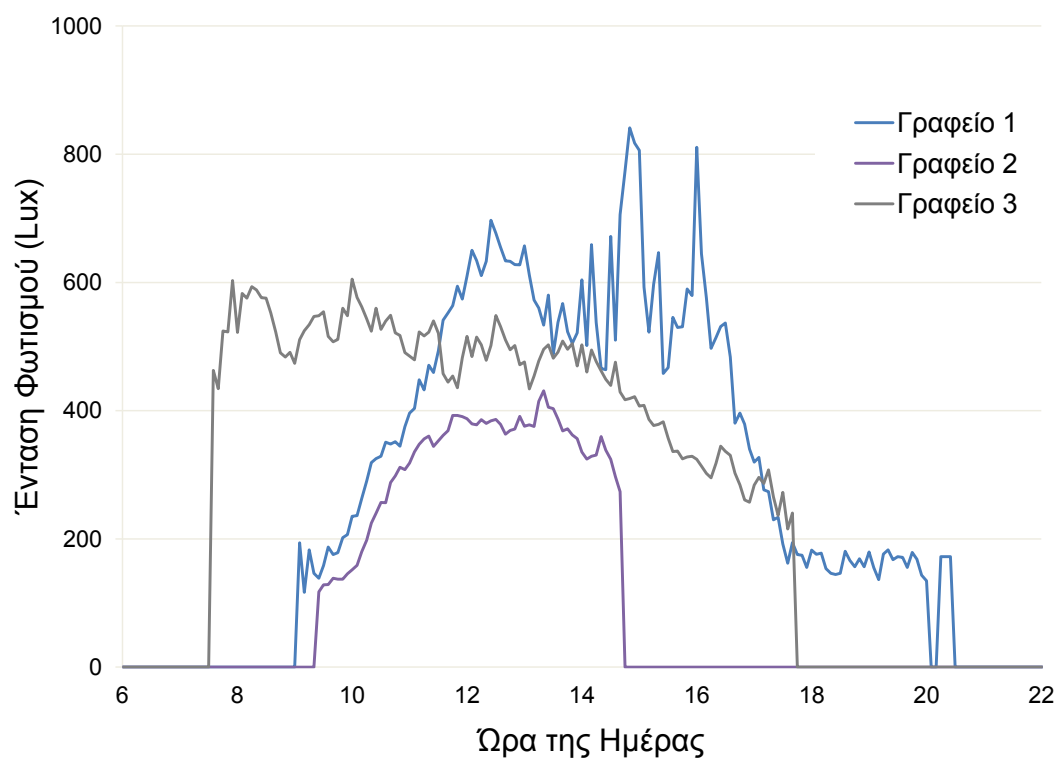
Σχήμα 2-17 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού ανά μήνα για τις ώρες παρουσίας του χρήστη, Γραφείο 2.

Στο Σχήμα 2-18 δίνονται τα ημερήσια προφίλ έντασης φωτισμού για τους τρεις μήνες της άνοιξης για το Γραφείο 3 (που έχει αντίθετο προσανατολισμό από τα άλλα δύο). Φαίνεται έντονα η εκτίναξη της τιμής της έντασης φωτισμού κατά την ανατολή του ηλίου, το ευρύ ωράριο του χρήστη (από τις 6:00 ως τις 19:00) και το γεγονός ότι ο χρήστης χρησιμοποιεί συχνά κατά την παρουσία του τον τεχνητό φωτισμό.

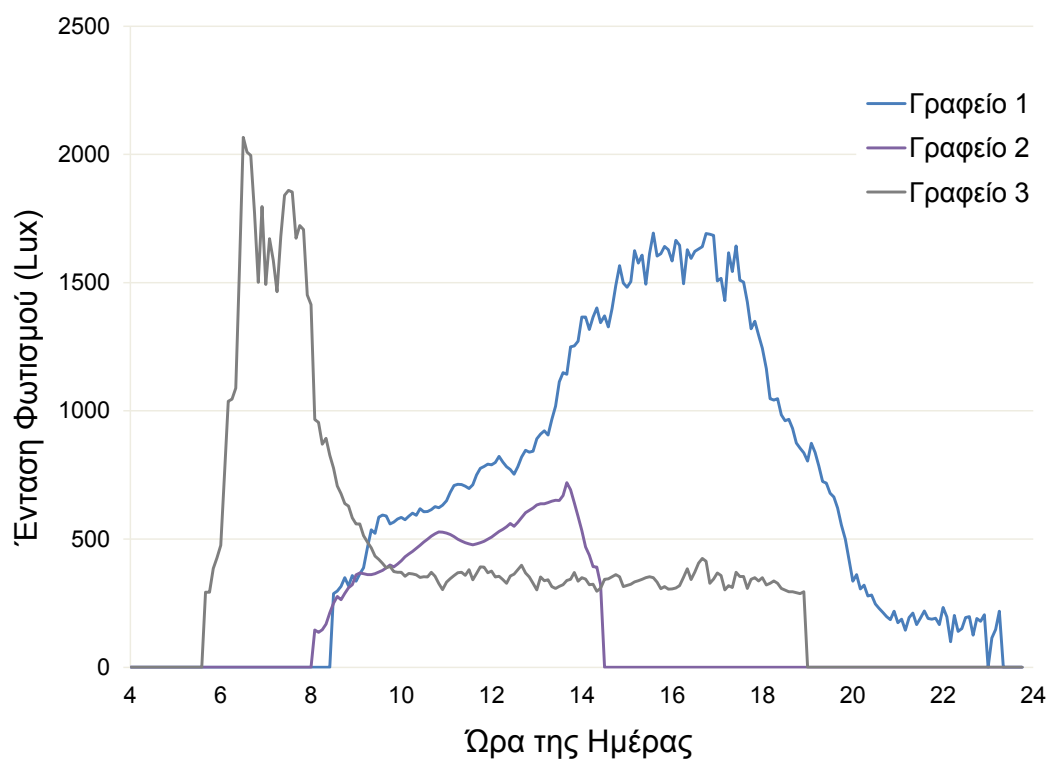


Σχήμα 2-18 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού ανά μήνα για τις ώρες παρουσίας του χρήστη, Γραφείο 3.

Για να φανούν εντονότερα οι διαφορές στη συμπεριφορά των χρηστών παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-19 και 2-20 οι μηνιαίες καμπύλες έντασης φωτισμού και για τα τρία γραφεία τους μήνες Ιανουάριο και Ιούνιο αντίστοιχα. Είναι εμφανής και στα δύο σχήματα η επιλογή του χρήστη του Γραφείου 2 να διατηρεί την ένταση φωτισμού σε χαμηλότερα επίπεδα, σε σχέση με τους άλλους, ενώ αντίθετα οι χρήστες του Γραφείου 1 επιλέγουν υψηλότερες τιμές. Τέλος, από την σύγκριση των μορφών των καμπυλών των δύο σχημάτων είναι εμφανής και η επίδραση των καιρικών συνθηκών στο προφίλ της έντασης φωτισμού. Τον Ιανουάριο λόγω της πιο συχνής παρουσίας νεφών μειώνεται η επίδραση του προσανατολισμού στις καμπύλες (για αυτό και είναι πιο όμοιες), ενώ τον Ιούνιο, όπου η πλειονότητα των ημερών εμφανίζει ηλιοφάνεια, οι μορφές των καμπυλών των γραφείων αντίθετου προσανατολισμού αποκλίνουν.



Σχήμα 2-19 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού για το μήνα Ιανουάριο στα τρία γραφεία.



Σχήμα 2-20 Μέσο ημερήσιο προφίλ έντασης φωτισμού για το μήνα Ιούνιο στα τρία γραφεία.

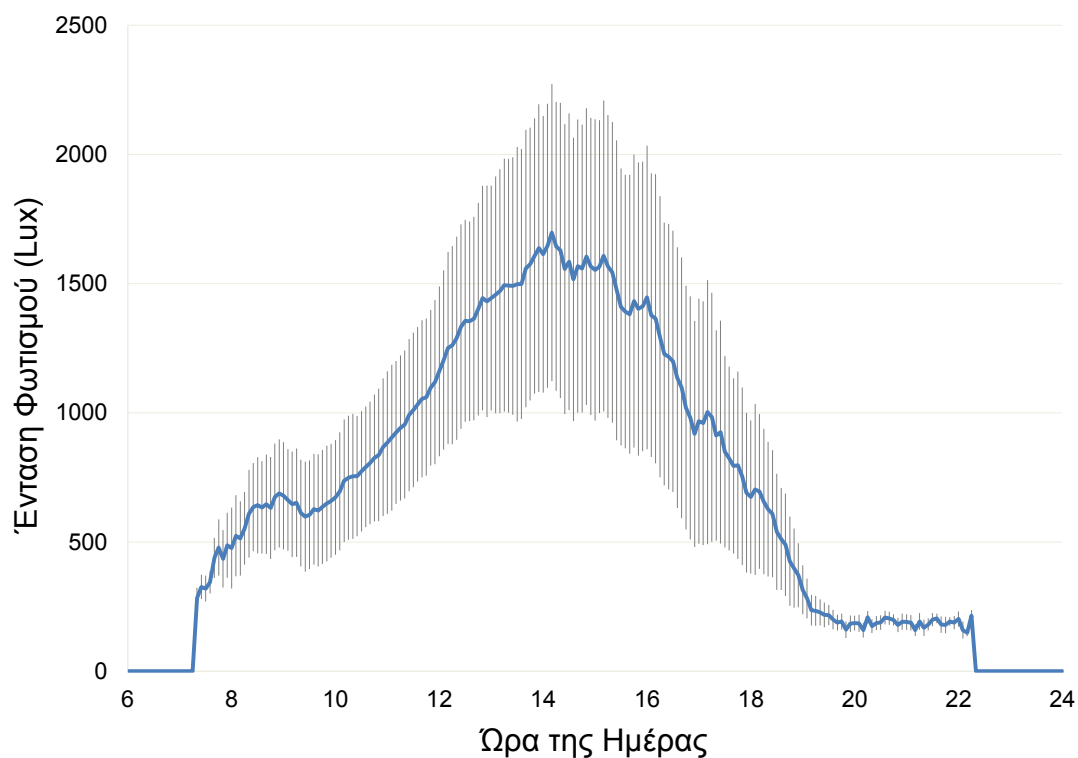
### 2.3.7 Αποκλίσεις στο μέσο ημερήσιο προφίλ εσωτερικής έντασης φωτισμού

Αφού αναλύθηκε η επίδραση των χρηστών στην εσωτερική ένταση φωτισμού, καθώς και οι διαφορές που εντοπίζονται στην συμπεριφορά τους, παρακάτω θα δοθούν στοιχεία

σχετικά με την σταθερότητα της συμπεριφοράς αυτής. Όπως αποτυπώθηκε στα Σχήματα 2-9 και 2-11, οι χρήστες εμφανίζουν μία στοχαστικότητα στην συμπεριφορά τους, επιλέγοντας να κάνουν δράσεις όχι πάντα στην ίδια τιμή έντασης φωτισμού αλλά σε μία ζώνη εντάσεων φωτισμού (τιμές που τους προκαλούν όχληση). Όσο πιο μεγάλη είναι η ζώνη αυτή, τόσο πιο δύσκολο είναι να προβλεφθούν με ακρίβεια οι δράσεις του κάθε χρήστη. Αντίθετα, οι χρήστες με μικρές διακυμάνσεις γύρω από μία μέση τιμή έντασης φωτισμού θεωρούνται συνεπείς και άρα πιο εύκολο να μοντελοποιηθούν. Στα Σχήματα 2-21, 2-22 και 2-23 δίνονται οι μέσες ημερήσιες καμπύλες έντασης φωτισμού για όλο το έτος για κάθε ένα από τα τρία γραφεία, μαζί με την τυπική απόκλιση που αυτές εμφανίζουν ανά πεντάλεπτο.

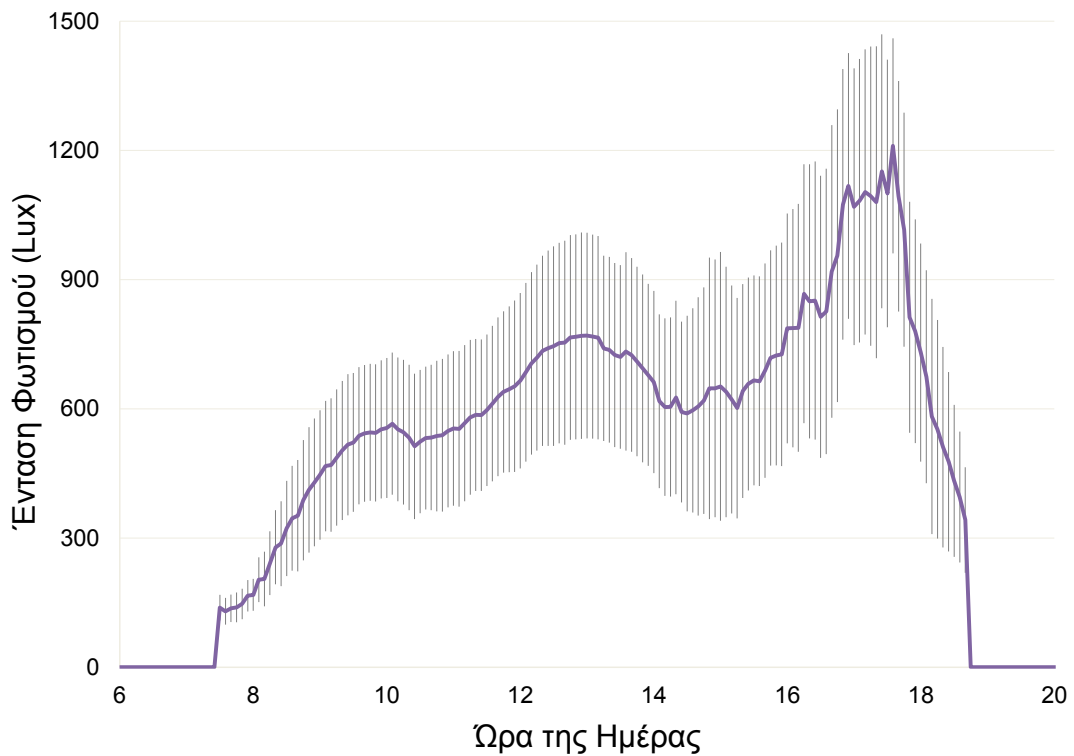
Πρέπει να τονιστεί ότι η συχνότητα παρουσίας του χρήστη σε κάθε πεντάλεπτο της ημέρας που παρουσιάζεται στα σχήματα δεν είναι η ίδια. Η διάρκεια του φωτεινού διαστήματος της ημέρας και το ωράριο εργασίας αλλάζουν συνεχώς μέσα στο έτος. Άρα οι τιμές έντασης φωτισμού που δίνονται, κυρίως στην αρχή και στο τέλος της καμπύλης, προκύπτουν από ανάλυση μικρότερου αριθμού ημερών.

Στο Σχήμα 2-21 που αφορά στο Γραφείο 1 (πολλών χρηστών) καταγράφονται διαστήματα απασχόλησης από τις 7:00 ως τις 22:00. Η τιμή έντασης φωτισμού που παρουσιάζεται για κάθε πεντάλεπτο περιλαμβάνει όλες τις καταγραφές ενός έτους όπου υπήρχε παρουσία χρήστη, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, την εποχή και τις δράσεις των χρηστών (δηλαδή περιπτώσεις τόσο με ανοικτές όσο και με κλειστές περσίδες, ή αντίστοιχες καταστάσεις του τεχνητού φωτισμού). Τις νυχτερινές ώρες (μετά τις 20:00) φαίνεται καθαρά η τιμή της έντασης φωτισμού όταν υπάρχει μόνο τεχνητός φωτισμός.



Σχήμα 2-21 Μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού και τυπική απόκλιση για ένα έτος, για το Γραφείο 1.

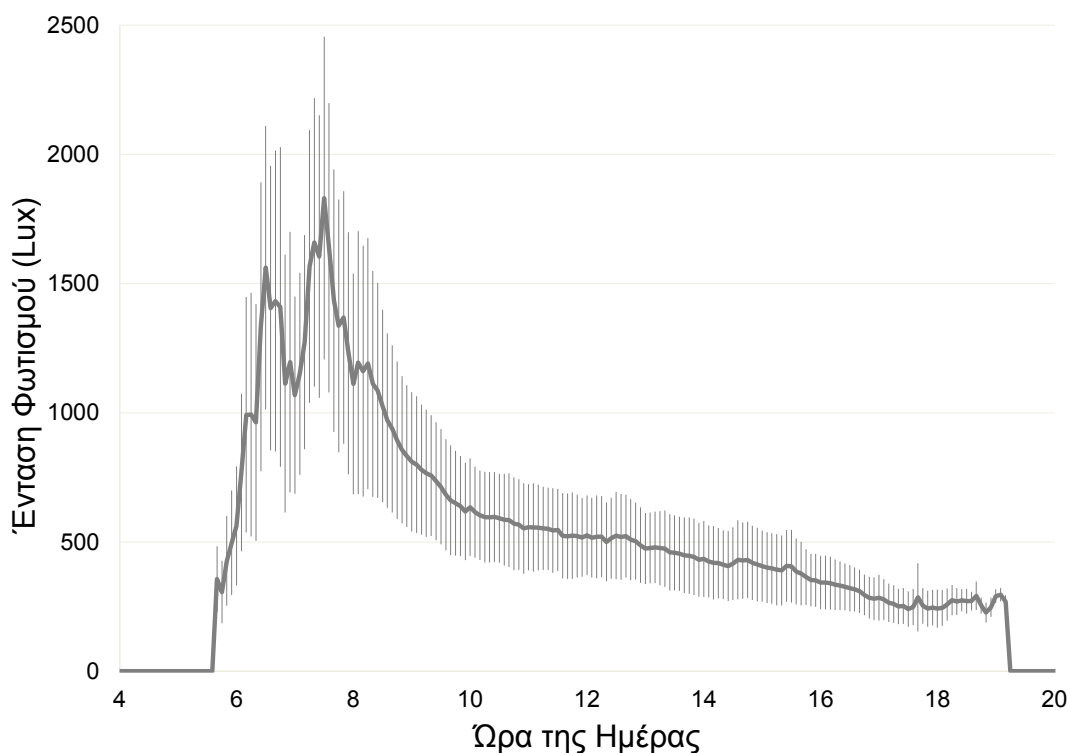
Στο Σχήμα 2-22 που αφορά στο Γραφείο 2, ο χρήστης έχει ένα πιο περιορισμένο ωράριο (συνήθως από τις 8:00 έως τις 16:00). Οι τιμές που παρουσιάζονται στο σχήμα σε ώρες εκτός αυτού του διαστήματος προέρχονται από μικρότερο αριθμό δειγμάτων και επομένως δεν οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα. Συγκρίνοντας αυτήν την καμπύλη με την αντίστοιχη του Γραφείου 1 που έχει τον ίδιο προσανατολισμό, προκύπτει ξανά ότι αυτός ο χρήστης προτιμά να διατηρεί στο γραφείο χαμηλότερα επίπεδα έντασης φωτισμού. Ενδεικτικά, ενώ στις 10:00 τα δύο γραφεία έχουν συγκρίσιμα επίπεδα έντασης φωτισμού (600-700 Lux), στις 12:00 το Γραφείο 2 έχει 30% χαμηλότερη ένταση φωτισμού (κατά μέση τιμή) και στις 14:00 η τιμή είναι χαμηλότερη κατά 65%. Τα παραπάνω αποδεικνύουν τις διαφορετικές επιθυμίες των χρηστών των δύο γραφείων. Επιπρόσθετα ο χρήστης του Γραφείου 2 είναι πιο σταθερός στις συνήθειές του γεγονός που φαίνεται και από τις μικρότερες τιμές της τυπικής απόκλισης.



Σχήμα 2-22 Μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού και τυπική απόκλιση για ένα έτος, για το Γραφείο 2.

Το Γραφείο 3 (Σχήμα 2-23) παρουσιάζει μία τελείως διαφορετική εικόνα καθώς έχει τον αντίθετο (Βορειοανατολικό) προσανατολισμό. Ο χρήστης συνηθίζει να έρχεται πολύ νωρίς (6:00 – 7:00) και έτσι είναι εμφανής στο Σχήμα η επίδραση της ανατολής του ηλίου στην ένταση φωτισμού, όπου και μετράται η μέγιστη τιμή της. Μετά το πέρας αυτής, στην εξωτερική επιφάνεια του Γραφείου προσπίπτει ουσιαστικά μόνο διάχυτη ακτινοβολία με συνέπεια οι τιμές έντασης φωτισμού να μειώνονται σταδιακά και να μην παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις. Στις χρονικές αυτές περιόδους είναι σύνηθες για τον συγκεκριμένο χρήστη να κάνει χρήση του τεχνητού φωτισμού, αφού μόνο ο φυσικός φωτισμός δεν είναι επαρκής για αυτόν.





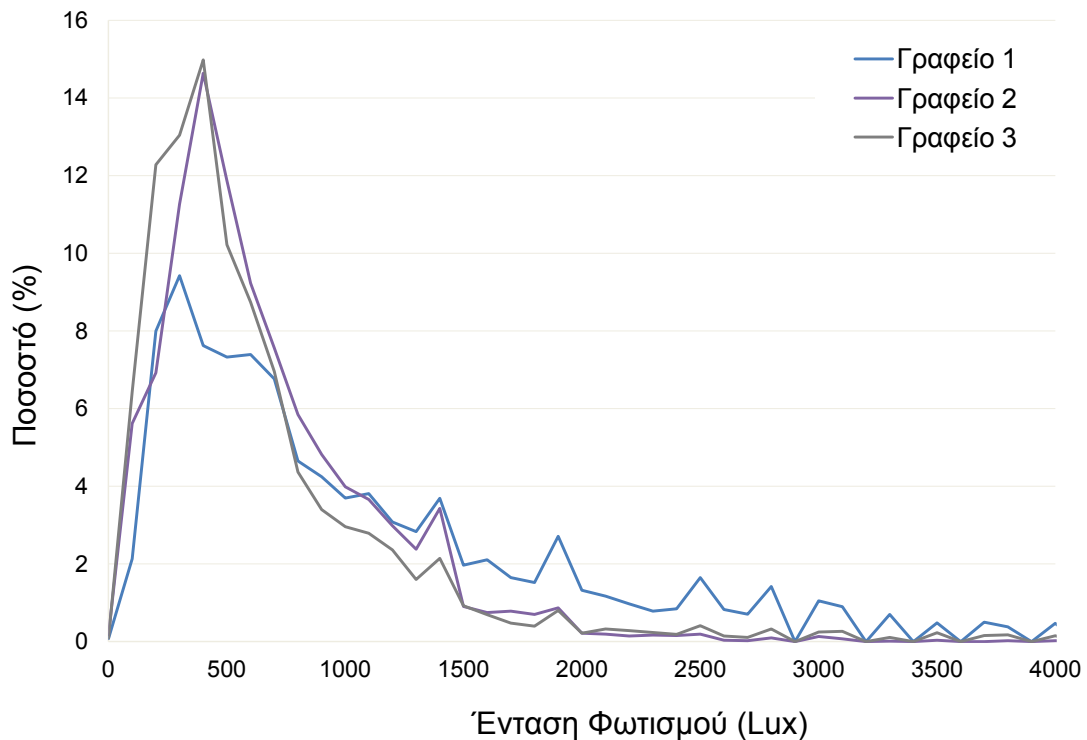
Σχήμα 2-23 Μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού και τυπική απόκλιση για ένα έτος, για το Γραφείο 3.

### 2.3.8 Κατανομή τιμών εσωτερικής έντασης φωτισμού

Κατά την παρουσία ενός χρήστη στο γραφείο, στη διάρκεια ενός έτους, εμφανίζεται ένα πολύ μεγάλο εύρος εντάσεων φωτισμού. Η κατανομή αυτών των τιμών έντασης φωτισμού παρουσιάζεται ξεχωριστά για κάθε γραφείο στο Σχήμα 2-24, με στόχο να αποδοθεί η συχνότητα εμφάνισης κάθε τιμής (με βήμα 100 Lux). Το στοιχείο αυτό δεν είναι ορατό στα σχήματα που δόθηκαν προηγουμένως. Όπως φαίνεται οι συνηθέστερες τιμές και στα τρία γραφεία κυμαίνονται μεταξύ 300 και 400 Lux, ωστόσο το Γραφείο 1 παρουσιάζει γενικώς υψηλότερες τιμές. Η τιμή της έντασης φωτισμού κάτω από την οποία βρίσκεται το 5-50-95% των μετρήσεων (κατά την παρουσία χρηστών) ανά γραφείο παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3 Τιμές της κατανομής έντασης φωτισμού για τα τρία Γραφεία.

Επίπεδα Τιμών	Γραφείο 1	Γραφείο 2	Γραφείο 3
5%	193.8 Lux	86 Lux	86.1 Lux
50%	731.9 Lux	495.1 Lux	430.6 Lux
95%	2927 Lux	1464 Lux	1808 Lux



Σχήμα 2-24 Κατανομή τιμών εσωτερικής έντασης φωτισμού (κατά τις ώρες παρουσίας χρηστών) για τα τρία Γραφεία.

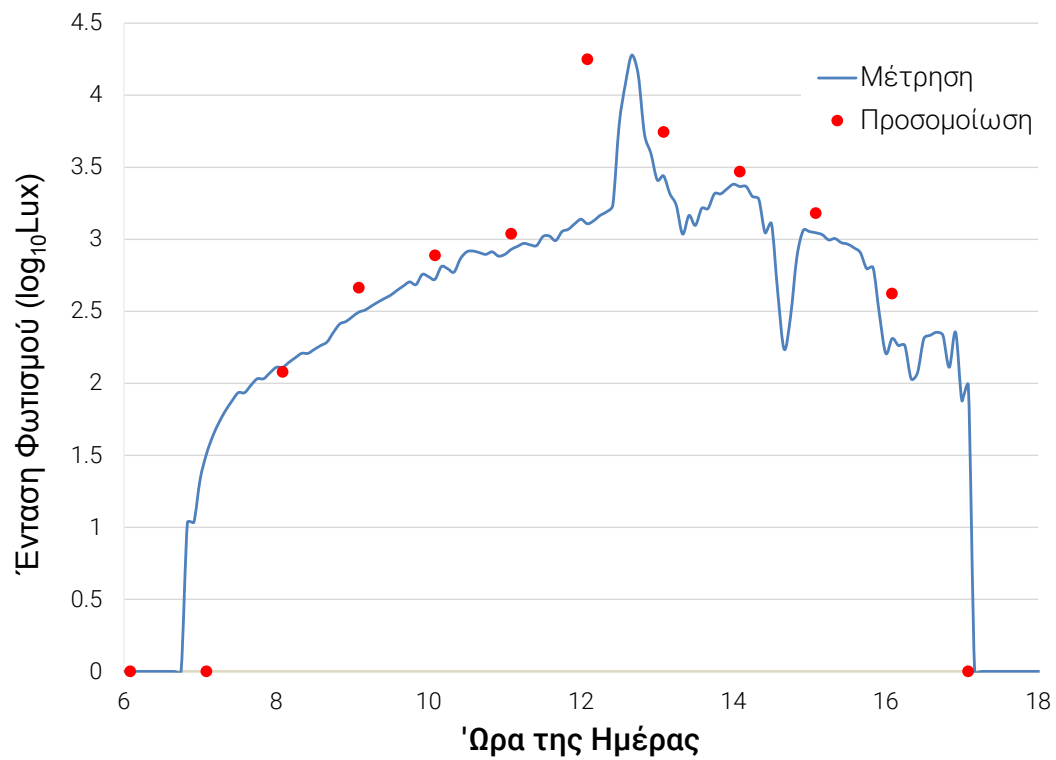
## 2.4 Προσομοιώσεις Έντασης φωτισμού

Επιπρόσθετα στα δεδομένα έντασης φωτισμού και ακτινοβολίας που συλλέχθηκαν για τα τρία γραφεία, έγιναν και προσομοιώσεις της εσωτερικής έντασης φωτισμού των μελετώμενων γραφείων με χρήση ενός εμπορικού λογισμικού, ώστε να δημιουργηθεί μία πλήρης βάση δεδομένων με τις τιμές έντασης φωτισμού που θα επικρατούσαν στους χώρους για όλους τους προσανατολισμούς, για ποικίλες αποστάσεις της θέσης εργασίας από τα παράθυρα και για διαφορετικές καταστάσεις ουρανού για ένα πλήρες έτος. Τα στοιχεία αυτά συμπληρώνουν τα δεδομένα των μετρήσεων και θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του γενικευμένου αλγόριθμου πρόβλεψης με χρήση ΤΝΔ.

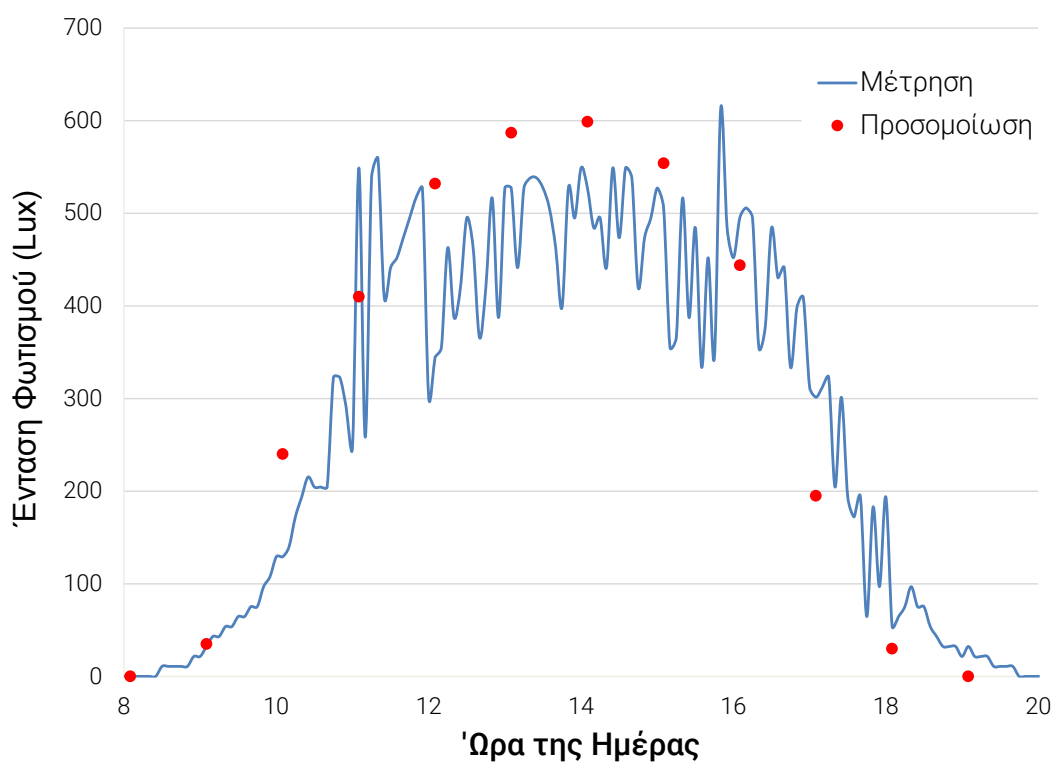
Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Dialux Evo, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως τόσο από ερευνητές [121][122][123] όσο και από επαγγελματίες, με σκοπό να προσομοιώσουν τον φυσικό και τον τεχνητό φωτισμό σε εσωτερικούς χώρους. Το Dialux Evo χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς του τον αλγόριθμο photon mapping [124], σε αντίθεση με τις προηγούμενες εκδόσεις του προγράμματος (Dialux), στις οποίες γινόταν χρήση της μεθόδου Radiosity [125]. Ανάμεσα στις δύο μεθόδους η πρώτη υπερτερεί αφού μπορεί να υπολογίσει ακριβέστερα τις τιμές έντασης φωτισμού σε χώρους με φωτιστικά οροφής (area light sources) [30].

Κατά τον σχεδιασμό των τριών γραφείων χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό οι παρακάτω συντελεστές ανάκλασης (reflectance factors) για τις επιφάνειες: 0.7 για την οροφή, 0.5 για τους τοίχους και 0.2 για το δάπεδο. Επιπρόσθετα ελήφθη συντελεστής συντήρησης (maintenance factor) ίσος με 0.8, το δε επίπεδο εργασίας (task area) θεωρήθηκε ότι βρίσκεται 0.8 m από το δάπεδο. Για να συλλεχθούν όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα για την εκπαίδευση του αλγορίθμου, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις (ανά ώρα) για τα τρία γραφεία σε οκτώ διαφορετικούς προσανατολισμούς. Οι προσομοιώσεις έγιναν για 3 ημέρες για τον κάθε μήνα, και εξετάστηκαν για την κάθε μία και οι τρεις καταστάσεις ουρανού που είναι διαθέσιμες στο λογισμικό (καθαρός, μερικώς νεφελώδης και νεφοσκεπής). Επιπλέον έγιναν προσομοιώσεις για τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις της θέσης εργασίας από τα παράθυρα (0.5 m, 1 m, 3.3m και 5.5m). Τέλος μελετήθηκε η επίδραση της σταδιακής ρύθμισης των περσίδων στην ένταση φωτισμού (δηλ. να μην είναι πλήρως αλλά 50, 60, 75% και 100% κλειστές). Συγκεντρώθηκε έτσι ένας μεγάλος όγκος δεδομένων που θα χρησιμεύσει για την εκπαίδευση ενός γενικευμένου μοντέλου πρόβλεψης.

Βασικό μέλημα για την επιλογή λογισμικού υπήρξε η αξιοπιστία των προσομοιώσεων που αυτό εκτελεί σε σχέση με τα αντίστοιχα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων. Συγκρίσεις που έγιναν ανάμεσα στα αποτελέσματα του λογισμικού και στα δεδομένα παρόμοιων ημερών έδειξαν ότι οι προσομοιώσεις μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Στα Σχήματα 2-25 και 2-26 δίνεται η σύγκριση μεταξύ προσομοιώσεων και μετρήσεων της έντασης φωτισμού στο Γραφείο 1 για μία ημέρα με καθαρό ουρανό και μία με νεφοσκεπή ουρανό αντίστοιχα. Φαίνεται ότι οι τιμές συγκλίνουν ικανοποιητικά και για τις δύο περιπτώσεις. Φυσικά κάποιες αποκλίσεις είναι αναμενόμενες αφού στην πραγματικότητα η κατάσταση του ουρανού δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, όσο λεπτομερώς και να γίνει η εισαγωγή των στοιχείων των χώρων, πάντα υπάρχουν επιπρόσθετοι παράγοντες που διαφοροποιούν τη μέτρηση από την προσομοίωση (ανακλάσεις από γειτνιάζοντα κτίρια, σκιάσεις από εξωτερικά πρόβολα, σκιάσεις από αντικείμενα του εσωτερικού χώρου κλπ.).



Σχήμα 2-25 Σύγκριση μεταξύ καταγραφών και προσομοιώσεων της έντασης φωτισμού για μία ημέρα με καθαρό ουρανό στο Γραφείο 1.



Σχήμα 2-26 Σύγκριση μεταξύ καταγραφών και προσομοιώσεων της έντασης φωτισμού για μία ημέρα με νεφροκεπή ουρανό στο Γραφείο 1.

### 2.4.1 Επίδραση της απόστασης της θέσης εργασίας από τα παράθυρα

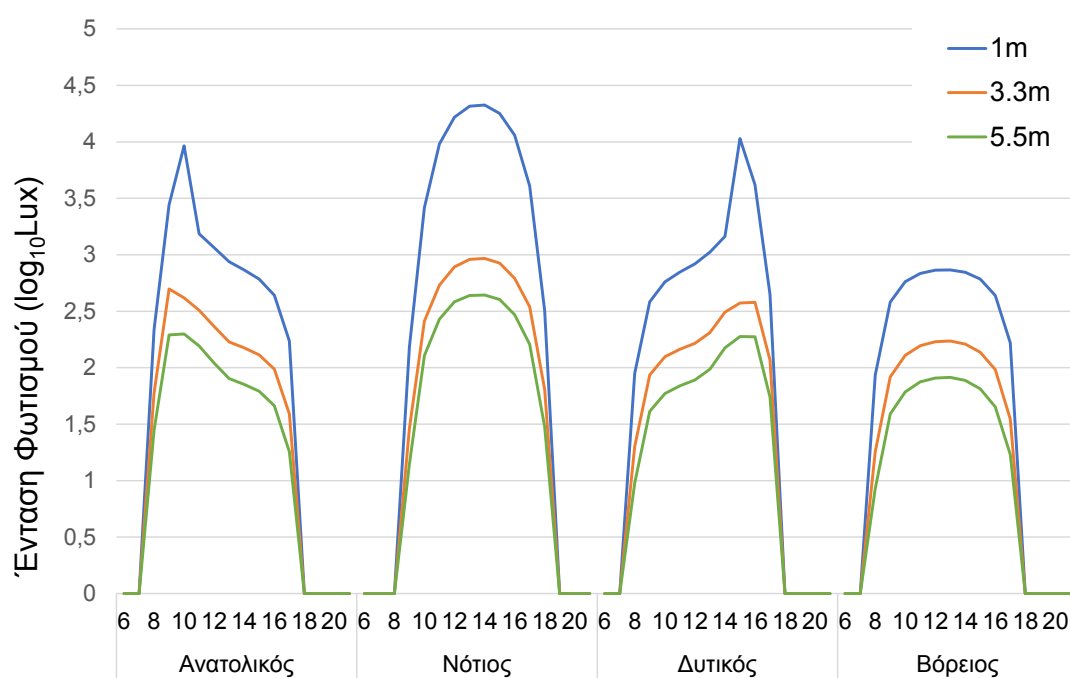
Η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας είναι συνάρτηση της απόστασής της από τα παράθυρα. Αυτή μελετήθηκε μέσω των αντίστοιχων προσομοιώσεων καθώς οι πραγματικές θέσεις εργασίας (για τις οποίες έγιναν μετρήσεις) βρίσκονταν όλες σε απόσταση περίπου 1m από τα παράθυρα. Μελετήθηκαν οκτώ διαφορετικοί προσανατολισμοί γραφείου ώστε να καλύπτονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις και τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις από τα παράθυρα (0.5m, 1m, 3.3m και 5.5m). Όπως ήταν αναμενόμενο υπάρχει μία σταθερή μείωση της έντασης φωτισμού όσο η θέση εργασίας απομακρύνεται από τα παράθυρα. Ωστόσο το ποσοστό μείωσης της τιμής της έντασης φωτισμού ανάλογα με την απόσταση από τα παράθυρα δεν είναι σταθερό και διαφέρει τόσο ανάμεσα στους προσανατολισμούς όσο και ανάμεσα στις εποχές του έτους.

Στο Σχήμα 2-27 δίνονται οι τιμές της έντασης φωτισμού, όπως αυτές προσομοιώθηκαν, για ένα χώρο όμοιο με το Γραφείο 1 στους τέσσερις βασικούς προσανατολισμούς και για τρεις διαφορετικές αποστάσεις από το παράθυρο. Οι προσομοιώσεις αφορούν στον Ιανουάριο (συγκεκριμένα στην 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου) και ο ουρανός έχει θεωρηθεί καθαρός. Είναι εμφανές ότι η ημερήσια καμπύλη της έντασης φωτισμού έχει διαφορετική μορφή για κάθε προσανατολισμό, ενώ επίσης φαίνεται η μείωσή της συναρτήσει της απόστασης. Οι διαφορές μεταξύ των τιμών είναι πολύ μεγάλες γι' αυτό στα σχήματα η ένταση φωτισμού αποδίδεται με λογαριθμικές τιμές. Η ένταση φωτισμού εκτινάσσεται στα 10 kLux για Ανατολικό και Δυτικό προσανατολισμό και στα 25 kLux για τον Νότιο. Αυτό συμβαίνει όταν οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν άμεσα στην επιφάνεια εργασίας, δηλαδή για μικρές αποστάσεις από το παράθυρο και συγκεκριμένες ώρες της ημέρας. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι όσο η απόσταση από τα παράθυρα μεγαλώνει, η ένταση τέτοιων φαινομένων περιορίζεται (αφού δεν υπάρχει άμεση πρόσπτωση ηλιακού φωτός στο επίπεδο εργασίας) και επομένως η αντίστοιχη ένταση φωτισμού μειώνεται σημαντικά. Το ποσοστό μείωσης της έντασης φωτισμού, όσο η θέση εργασίας απομακρύνεται από τα παράθυρα, διατηρεί μία αναλογική σχέση κατά τα χρονικά διαστήματα για τα οποία δεν υπάρχει άμεση διείσδυση φυσικού φωτός στην πλησιέστερη στα παράθυρα θέση. Αυτό το ποσοστό μπορεί να μεταβάλλεται και ανάλογα με την εποχή του έτους σε κάθε προσανατολισμό, όπως θα αναλυθεί περαιτέρω στην επόμενη υποπαράγραφο.

Στον Πίνακα 2-4 συγκεντρώνονται οι χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες υπάρχει σταθερό ποσοστό μείωσης της έντασης φωτισμού στις αποστάσεις 3.3 και 5.5m σε σχέση με τη ένταση φωτισμού αναφοράς (στο 1m) για τους οκτώ προσανατολισμούς για μία ημέρα ανά εποχή. Εξαιρούνται δηλαδή τα φαινόμενα ανατολής – δύσης. Γενικά το ποσοστό μείωσης της έντασης φωτισμού στα 3.3m κυμαίνεται στο 70-80% της έντασης φωτισμού στο 1m και αντίστοιχα στα 5.5m το ποσοστό αυτό φτάνει το 90%.

Πίνακας 2-4 Χρονικές περίοδοι με σταθερό ποσοστό μείωσης της έντασης φωτισμού ανάλογα με την απόσταση από το παράθυρο

Προσανατολισμός/ Ημέρα	15η Ιανουαρίου	15η Απριλίου	15η Ιουλίου	15η Οκτωβρίου
Ανατολικός	11:00- 17:00	11:00- 20:00	11:00- 20:00	11:00- 18:00
Βόρειος	08:00- 17:00	07:00- 20:00	07:00- 20:00	08:00- 19:00
Βορειοανατολικός	08:00- 17:00	10:00- 20:00	10:00- 20:00	08:00- 18:00
Βορειοδυτικός	08:00- 17:00	07:00- 18:00	07:00- 17:00	08:00- 18:00
Δυτικός	08:00- 14:00	07:00- 16:00	07:00- 17:00	08:00- 15:00
Νότιος	10:00- 16:00	07:00- 20:00	07:00- 20:00	10:00- 16:00
Νοτιοανατολικός	14:00- 17:00	11:00- 20:00	10:00- 20:00	13:00- 18:00
Νοτιοδυτικός	08:00- 11:00	07:00- 16:00	07:00- 17:00	08:00- 14:00

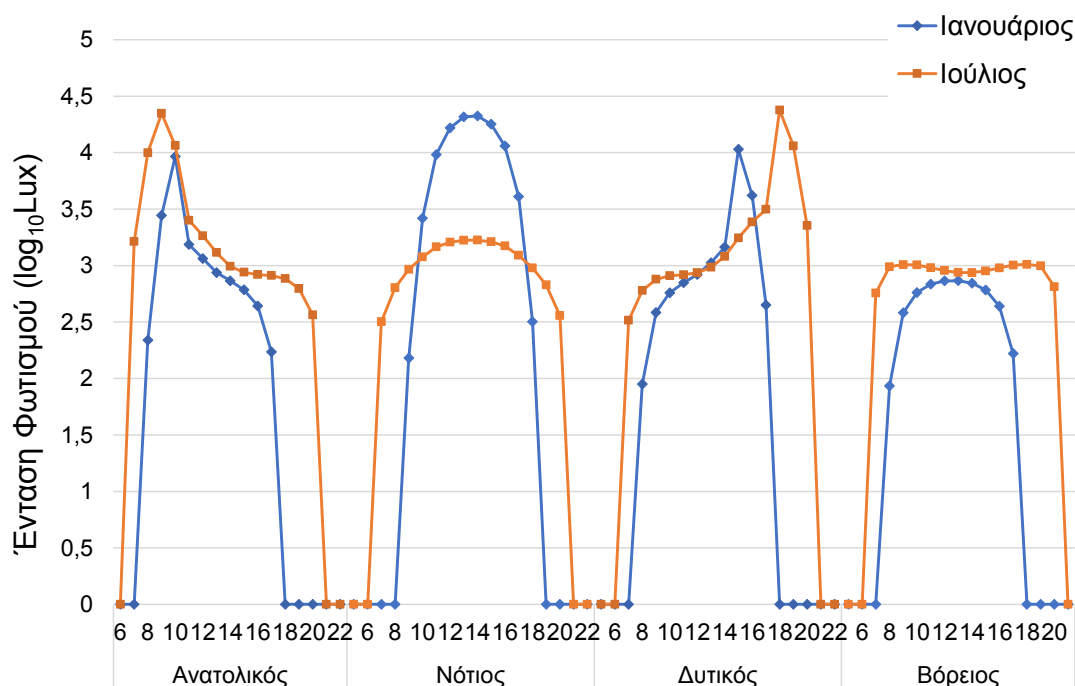


Σχήμα 2-27 Προσομοίωση εσωτερικής έντασης φωτισμού για χώρο όμοιο με το Γραφείο 1 για τέσσερις προσανατολισμούς και τρεις αποστάσεις της θέσης εργασίας από τα παράθυρα.

## 2.4.2 Επίδραση της εποχής και του προσανατολισμού στην ένταση φωτισμού

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-27, οι υψηλότερες τιμές έντασης φωτισμού (25kLux) εμφανίζονται για απόσταση 1m από το παράθυρο για νότιο προσανατολισμό κατά το μήνα Ιανουάριο. Το φαινόμενο αυτό έχει ήδη παρουσιαστεί με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις στο Σχήμα 2-5 και οφείλεται στο χαμηλό ηλιακό ύψος και την άμεση διείσδυση του φυσικού φωτός στο χώρο.

Η επίδραση της εποχής, για κάθε προσανατολισμό, στην ένταση φωτισμού φαίνεται ολοκληρωμένα στο Σχήμα 2-28. Σε αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (σε ωριαίες τιμές) για μία μέρα του Ιανουαρίου και μία του Ιουλίου, με καθαρό ουρανό. Από τη σύγκριση, είναι εμφανείς οι διαφορές στο εύρος της ημέρας ανά εποχή, αλλά κυρίως στις μέγιστες τιμές της έντασης φωτισμού που οφείλονται στην άμεση διείσδυση του ηλιακού φωτός στον χώρο. Όπως είδαμε παραπάνω, η μέγιστη ένταση φωτισμού για Νότιο Προσανατολισμό είναι υψηλότερη τον Ιανουάριο σε σχέση με τον Ιούλιο λόγω του χαμηλού ηλιακού ύψους. Αντίθετα, η μέγιστη ένταση φωτισμού για Ανατολικό και Δυτικό προσανατολισμό εμφανίζεται τον Ιούλιο λόγω της πορείας του ηλίου. Ο Βόρειος προσανατολισμός δεν παρουσιάζει έντονες εποχικές διαφοροποιήσεις, αφού στην πραγματικότητα μία επιφάνεια στραμμένη στο βορρά δέχεται άμεσο ηλιακό φως για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα.

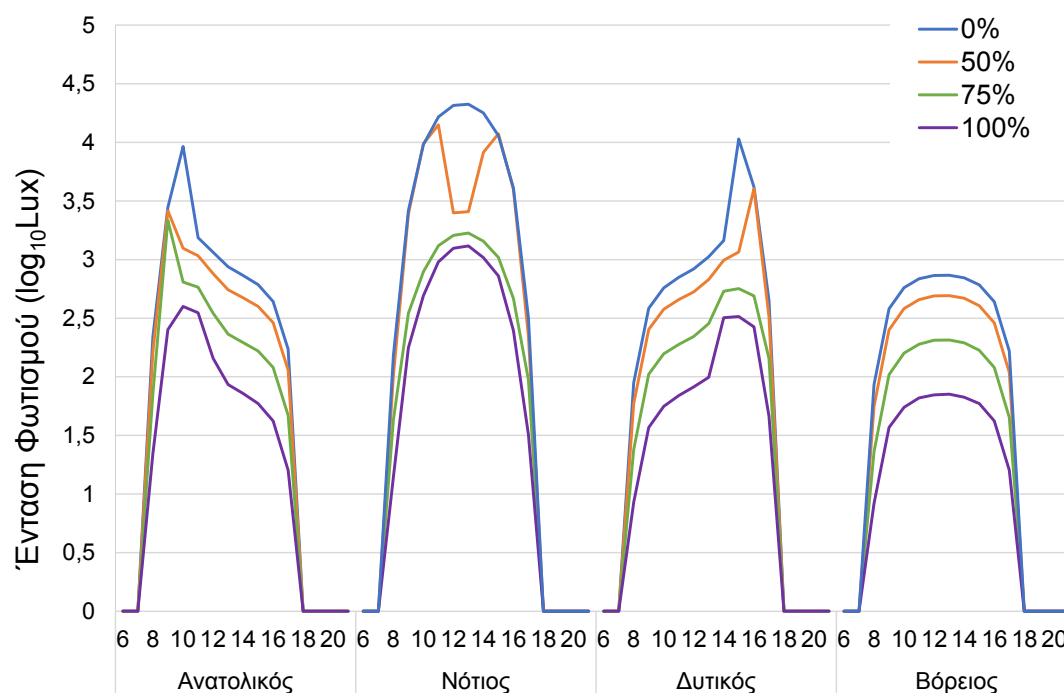


Σχήμα 2-28 Προσομοίωση εσωτερικής έντασης φωτισμού για μία ημέρα του Ιανουαρίου και μία του Ιουλίου, με καθαρό ουρανό, για τέσσερις προσανατολισμούς.

### 2.4.3 Επίδραση της ρύθμισης των περσίδων στην ένταση φωτισμού

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης, έγινε και διερεύνηση σχετικά με την εναπομένουσα ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας όταν γίνεται σταδιακό κλείσιμο των περσίδων. Για το σκοπό αυτό, έγιναν ωριαίες προσομοιώσεις της έντασης φωτισμού για ένα έτος, στην επιφάνεια εργασίας, όταν αυτή βρίσκεται σε απόσταση 1m από τα παράθυρα. Αυτές πραγματοποιήθηκαν για όλους τους προσανατολισμούς και για πέντε διαφορετικά επίπεδα ρύθμισης περσίδας (από τελείως ανοικτή 0% έως τελείως κλειστή 100%). Όπως είναι φυσικό, το ποσοστό μείωσης της έντασης φωτισμού σε σχέση με τη ρύθμιση των περσίδων δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από όλους τους παράγοντες που αναλύθηκαν και προηγουμένως (εποχή, προσανατολισμός, απόσταση από τα παράθυρα).

Ενδεικτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών για τους τέσσερις βασικούς προσανατολισμούς και για τον μήνα Ιανουάριο δίνονται στο Σχήμα 2-29. Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση αφορά την μείωση της έντασης φωτισμού για Νότιο Προσανατολισμό και περσίδα κλειστή κατά 50%. Πριν και μετά το μεσημέρι η μισόκλειστη περσίδα δεν έχει καμιά επίδραση στην ένταση φωτισμού καθώς ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά και το φως του προσπίπτει άμεσα στην επιφάνεια εργασίας.



Σχήμα 2-29 Προσομοίωση περιορισμού της εσωτερικής έντασης φωτισμού με σταδιακή ρύθμιση των περσίδων, για τέσσερις προσανατολισμούς.



## Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση κατάστασης του ουρανού και υπολογισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας

Για να συσχετιστεί σωστά η εσωτερική ένταση φωτισμού με τις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν κάθε στιγμή, θα πρέπει να κατανοηθεί και να αναλυθεί το φυσικό μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας, ή ακριβέστερα η *πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας* (solar irradiance) σε  $W/m^2$ . Αυτή εξαρτάται πρωταρχικά από την ώρα της ημέρας, την ημέρα του έτους και τις γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας. Η μορφή και οι μέγιστες τιμές της ημερήσιας καμπύλης της εξαρτώνται επίσης από την κλίση και τον προσανατολισμό της εξεταζόμενης επιφάνειας και από την αντίστοιχη κατάσταση του ουρανού. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα [126][127][128][129][130][131] με σκοπό την ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας και τον υπολογισμό των συνιστωσών της (άμεση και διάχυτη ακτινοβολία).

### 3.1 Υπολογισμοί για οριζόντιο επίπεδο

Στην παρούσα διατριβή, το μοντέλο των Reindl, Beckman και Duffie [129] ενσωματώθηκε στον προτεινόμενο αλγόριθμο πρόβλεψης για την εύρεση της εσωτερικής έντασης φωτισμού συναρτήσει των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το μοντέλο αυτό (Εξίσωση 3.1) μπορεί να υπολογίσει το *κλάσμα διάχυσης*  $k_d$  (diffuse fraction) με βάση τη μετρούμενη ολική ωριαία οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία. Το κλάσμα αυτό ορίζεται ως ο λόγος της διάχυτης προς την οριζόντια ωριαία ηλιακή ακτινοβολία (Εξίσωση 3.2) και εξαρτάται από τον *δείκτη καθαρότητας ουρανού*  $k_t$  (clearness index) και την *γωνία ηλιακού ύψους* (solar altitude angle)  $\alpha$ .

Ο δείκτης  $k_t$  (Εξίσωση 3.3) ορίζεται ως ο λόγος της ολικής ωριαίας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας προς την αντίστοιχη ωριαία εξωγήινη ακτινοβολία  $I_0$ . Η εξωγήινη ακτινοβολία περιγράφει την ηλιακή ακτινοβολία που περνά κάθετα από μία φανταστική επιφάνεια μόλις έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Μικρή τιμή του  $k_t$  αντιστοιχεί σε νεφοσκεπή ουρανό όπου το σύνολο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας έχει μόνο διάχυτη συνιστώσα, ενώ αντίθετα υψηλή τιμή του  $k_t$  αντιστοιχεί σε καθαρό ουρανό όπου το κλάσμα διάχυσης  $k_d$  ελαχιστοποιείται με συνέπεια να μεγιστοποιείται το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας.

$$\begin{aligned} \text{Εάν } 0 \leq k_t \leq 0.3 \text{ τότε } k_d &= 1.020 - 0.254k_t + 0.0123\sin(\alpha) \\ \text{Εάν } 0.3 < k_t < 0.78 \text{ τότε } k_d &= 1.400 - 1.749k_t + 0.177\sin(\alpha) \\ \text{Εάν } k_t \geq 0.78 \text{ τότε } k_d &= 0.486k_t - 0.182\sin(\alpha) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$k_d = \frac{I_{dif}}{I_{glo,hor}} \quad (3.2)$$

$$k_t = \frac{I_{glo,hor}}{I_0 \cdot \cos \theta_z} \quad (3.3)$$

όπου  $I_0$  είναι η εξωγήινη ακτινοβολία:

$$I_0 = I_{sc} \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \frac{2\pi \times n}{365.25} \right) \quad \text{W/m}^2 \quad (3.4)$$

η οποία εξαρτάται από την *ημέρα του έτους*  $n$  ( $n=1$  έως 365) και την *ηλιακή σταθερά* (solar constant)  $I_{sc}$ . Η ηλιακή σταθερά αποτελεί μία εκτίμηση της μέσης ετήσιας εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας. Η πιο ευρέως αποδεκτή τιμή της είναι  $1367 \text{ W/m}^2$ .

Αν θεωρηθεί μία οριζόντια επιφάνεια πάνω στη Γη, η κάθετη ευθεία πάνω σε αυτήν ονομάζεται ζενίθ. Η γωνία ανάμεσα στο ζενίθ και την ευθεία που συνδέει τον ήλιο με την επιφάνεια ονομάζεται ζενιθιακή γωνία του ηλίου  $\theta_z$  και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.5:

$$\theta_z = \cos^{-1} [\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta] \quad (3.5)$$

Η γωνία  $\theta_z$  εξαρτάται με τη σειρά της από την ηλιακή απόκλιση  $\delta$ , το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  και την ωριαία γωνία του ηλίου  $\omega$ . Η γωνία αυτή είναι επίσης συμπληρωματική της γωνίας ηλιακού ύψους  $\alpha$ .

Η γωνία ηλιακού ύψους  $\alpha$  ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με την επιφάνεια και το οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους λαμβάνοντας χαμηλές τιμές τον χειμώνα, όπου η ημερήσια πορεία του ηλίου είναι χαμηλά στον ορίζοντα.

Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ισημερινού και σε μία ευθεία γραμμή που ενώνει το κέντρο του ηλίου με το κέντρο της γης. Η  $\delta$  παρουσιάζει εποχικές διακυμάνσεις λόγω της κλίσης του άξονα περιστροφής της γης και της αντίστοιχης περιφοράς της γης γύρω από τον ήλιο. Αναλυτικότερα, η τιμή της είναι  $0^\circ$  κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία (21 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου αντίστοιχα). Η μέγιστη τιμή της ( $23.45^\circ$ ) εμφανίζεται στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) ενώ η ελάχιστη ( $-23.45^\circ$ ) στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο) στο βόρειο ημισφαίριο της γης. Η διακύμανσή των τιμών της κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου είναι μικρότερη από  $0.5^\circ$ . Υπολογίζεται τέλος με βάση την Εξίσωση 3.6, όπως προτάθηκε από τον Cooper [132]:

$$\delta = \frac{23.45\pi}{180} \sin\left(\frac{2\pi(n+284)}{365}\right) \quad (\text{rad}) \quad (3.6)$$

Η ωριαία γωνία του ηλίου  $\omega$  περιγράφει την γωνιακή απόκλιση της θέσης του ηλίου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι για κάθε ώρα της ημέρας. Πιο συγκεκριμένα, η ωριαία γωνία είναι ο αριθμός των μοιρών κατά τις οποίες πρέπει η Γη να περιστραφεί προκειμένου ο ήλιος να βρεθεί ακριβώς πάνω από τον τοπικό μεσημβρινό. Λαμβάνει αρνητικές τιμές το πρωί και θετικές το απόγευμα, ενώ ισούται με μηδέν την μεσημβρία. Υπολογίζεται με χρήση της Εξίσωσης 3.7:

$$\omega = 15^\circ (t_{sol} - 12\text{h}) \quad (3.7)$$

όπου  $t_{sol}$  είναι η ηλιακή ώρα που υπολογίζεται με βάση την ωριαία ζώνη της εκάστοτε τοποθεσίας όπως προκύπτει από την Εξίσωση 3.8:

$$t_{sol} = t_{std} + \frac{L_{std} - L_{loc}}{15^\circ} + \frac{E_t}{60} \quad (3.8)$$

Στην εξίσωση αυτή  $t_{std}$  είναι η τοπική ώρα,  $L_{std}$  είναι το γεωγραφικό μήκος που αντιστοιχεί στον μεσημβρινό τοπικής ώρας ( $30^\circ$  για την Ελλάδα) και  $L_{loc}$  είναι το τοπικό γεωγραφικό μήκος ( $22.94^\circ$  για την Θεσσαλονίκη).

Η τιμή της παραμέτρου  $E_t$  προκύπτει από την Εξίσωση 3.9, γνωστή ως *εξίσωση του χρόνου* (equation of time):

$$E_t = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (\text{min}) \quad (3.9)$$

όπου

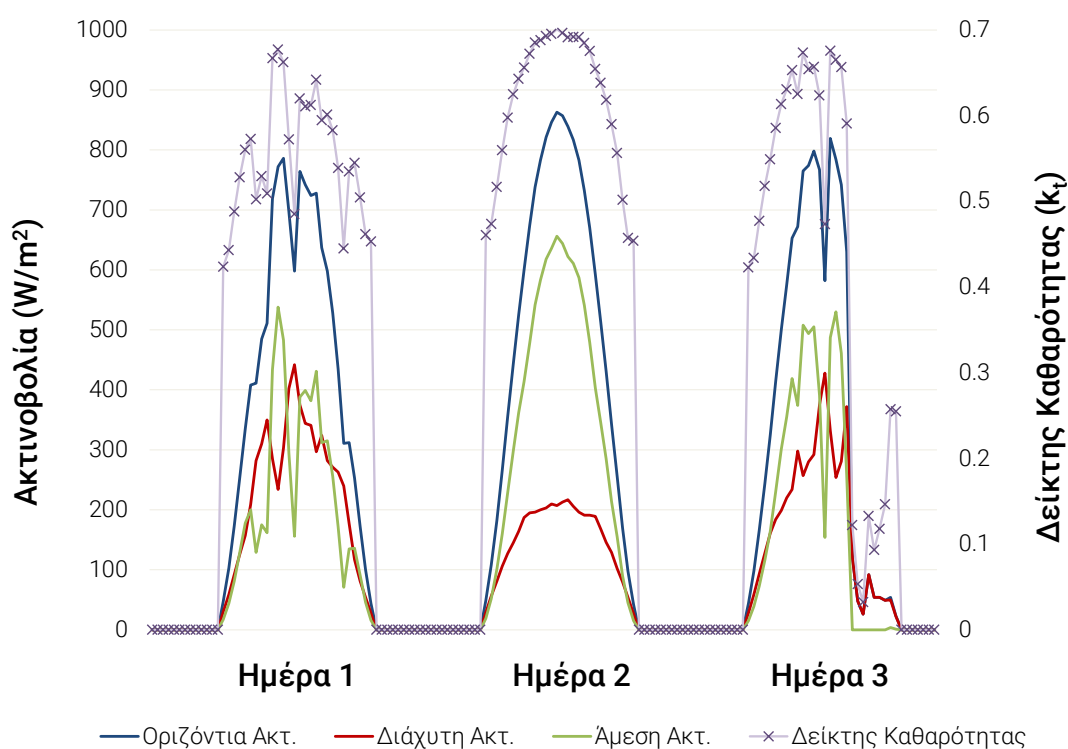
$$B = 360^\circ \times \frac{n-81}{364} \quad (3.10)$$

και  $n$  είναι η μέρα του έτους ( $n=1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην Εξίσωση 3.8 τόσο το  $t_{sol}$  όσο και οι τρεις προσθετέοι αποδίδονται αριθμητικά σε ώρες ενώ το  $E_t$  αποδίδεται σε λεπτά. Ο δεύτερος προσθετέος αποτελεί μία προσαρμογή του γεωγραφικού μήκους στις ζώνες ώρας στις οποίες είναι χωρισμένη η γη (για την Θεσσαλονίκη π.χ. η τιμή αυτή είναι 0.47 ώρες). Ο τρίτος προσθετέος είναι ένας μικρός παράγοντας προσαρμογής που χρειάζεται για να ληφθεί υπ' όψη ο μη

ομοιόμορφος τρόπος με τον οποίο η γη κινείται γύρω από τον ήλιο (-3.7 min για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου).

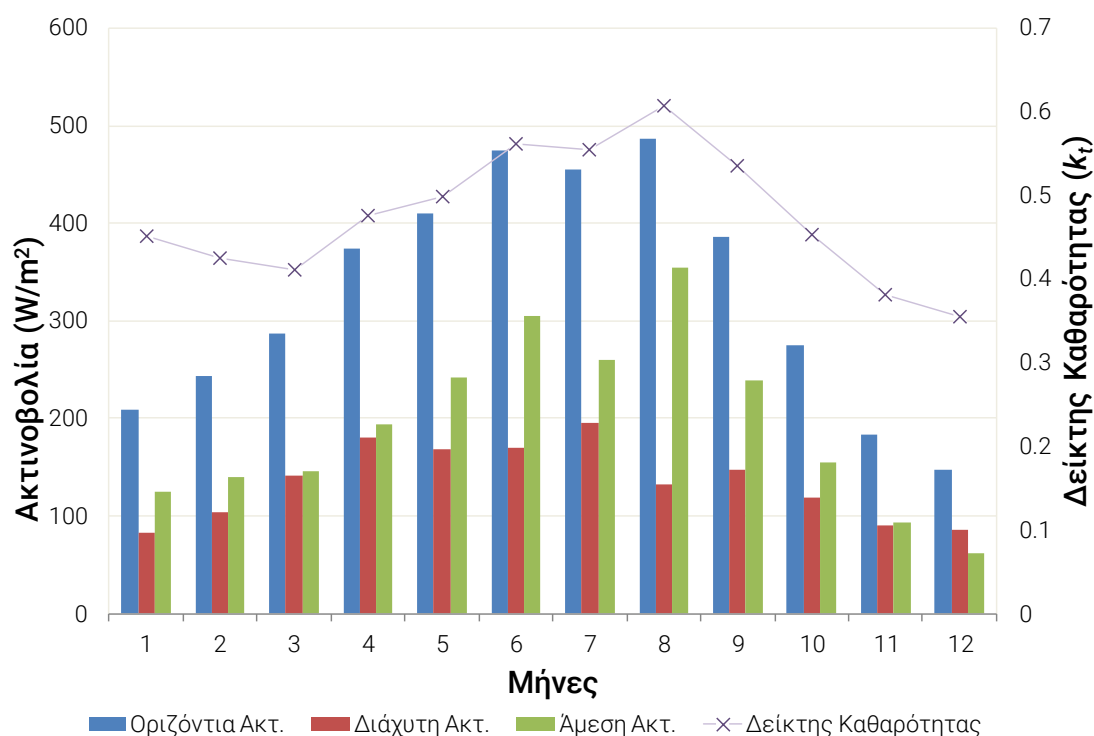
Στα πλαίσια της διατριβής χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα προσέγγιση έτσι ώστε να γίνει η ανάλυση της οριζόντιας ακτινοβολίας στις δύο συνιστώσες της (άμεση και διάχυτη). Τα δεδομένα οριζόντιας ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από ένα Φ/Β σταθμό στέγης κοντά στο μελετώμενο κτίριο και καλύπτουν διάστημα ενός έτους, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2. Αναλυτικότερα, αφού υπολογίστηκε η αντίστοιχη στα δεδομένα εξωγήινη ακτινοβολία (Εξίσωση 3.4), χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Reindl για να υπολογιστούν οι τιμές της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας αντίστοιχα. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζονται η μετρούμενη ολική ακτινοβολία και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί για την άμεση, τη διάχυτη ακτινοβολία καθώς και τον δείκτη καθαρότητας ουρανού  $k_t$  για ένα τριήμερο του Ιουλίου. Όπως φαίνεται, κατά τη δεύτερη ημέρα ο ουρανός είναι καθαρός ενώ τις άλλες δύο, εμφανίζονται αραιές νεφώσεις. Κατά το απόγευμα της 3<sup>ης</sup> ημέρας για λίγες ώρες ο ουρανός είναι νεφοσκεπής, επομένως μηδενίζεται τελείως η άμεση ακτινοβολία.



Σχήμα 3-1 Υπολογισμός δείκτη καθαρότητας ουρανού και συνιστωσών ακτινοβολίας με χρήση του μοντέλου Reindl για ένα τριήμερο του Ιουλίου..

Οι διακυμάνσεις των παραπάνω μεγεθών κατά τη διάρκεια ενός έτους φαίνονται στο Σχήμα 3-2. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της ολικής, της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) σε κοινό διάγραμμα με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη

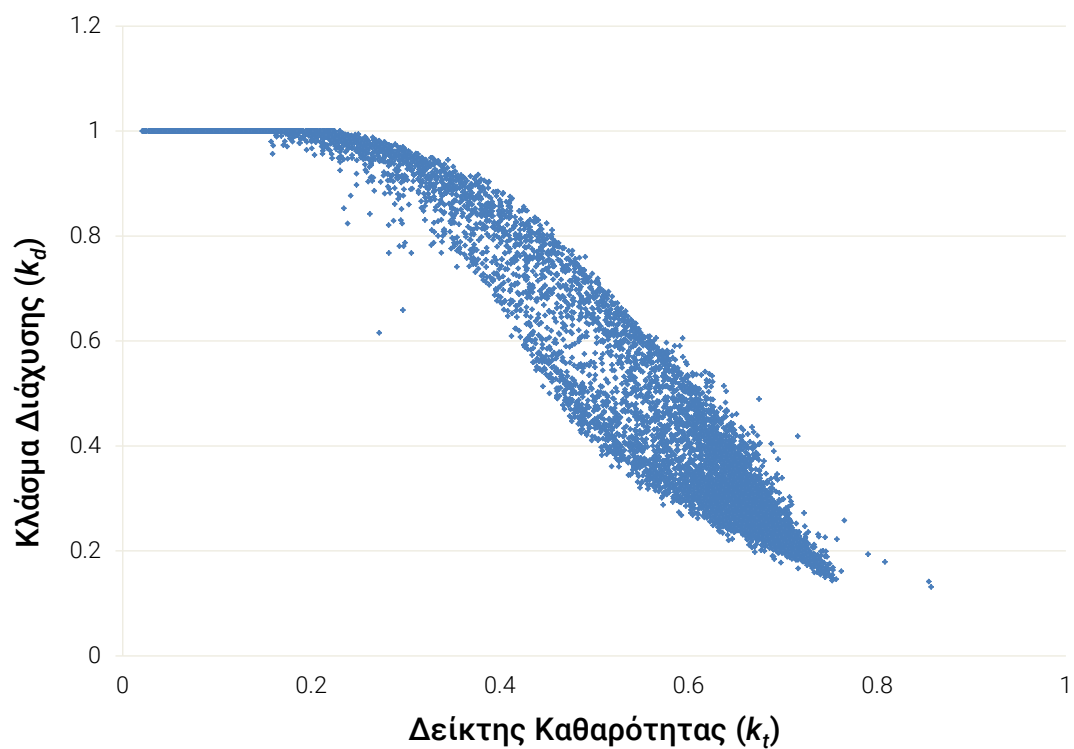
καθαρότητας ουρανού ( $k_t$ ) για την περίοδο των μετρήσεων. Πρέπει να επισημανθεί ότι η μέση τιμή ανά μήνα αφορά μόνο στις ώρες του φωτεινού διαστήματος της ημέρας.



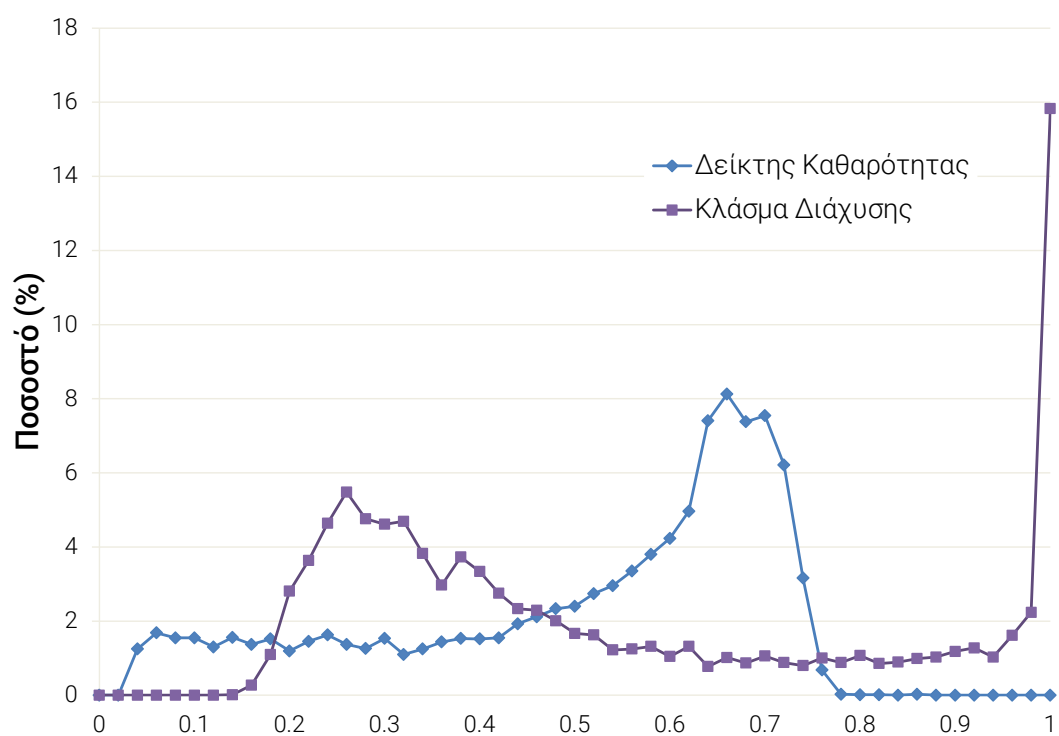
Σχήμα 3-2 Μέσες μηνιαίες τιμές για τον δείκτη καθαρότητας ουρανού και τις συνιστώσες της ακτινοβολίας για την περίοδο των μετρήσεων.

Επιπλέον, στο Σχήμα 3-3 δίνεται το διάγραμμα διασποράς για τον δείκτη καθαρότητας ουρανού ( $k_t$ ) και το κλάσμα διάχυσης ( $k_d$ ), για το διάστημα μελέτης. Σε αυτό φαίνεται ότι όταν ο δείκτης καθαρότητας ( $k_t$ ) έχει μικρές τιμές (μικρότερες του 0.2), το κλάσμα διάχυσης ( $k_d$ ) μεγιστοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι σε τέτοιες περιπτώσεις το σύνολο της ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη είναι διάχυτη και ο ουρανός είναι πλήρως νεφοσκεπής. Αντίθετα, όσο οι τιμές του  $k_t$  αυξάνονται, μειώνονται οι αντίστοιχες τιμές του κλάσματος διάχυσης, με αποτέλεσμα η διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας να περιορίζεται και να γίνεται πιο έντονη η άμεση συνιστώσα της. Ωστόσο πρέπει να παρατηρηθεί ότι ποτέ η τιμή του κλάσματος διάχυσης δεν γίνεται ίση με την μονάδα, πάντα δηλαδή υπάρχει και η συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας, ανεξάρτητα από την καθαρότητα του ουρανού.

Οι κατανομές των τιμών των δύο παραπάνω μεγεθών παρουσιάζονται για ένα έτος στο Σχήμα 3-4. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι σε ποσοστό 16% του χρόνου το κλάσμα διάχυσης ισούται με τη μονάδα, επικρατούν δηλαδή συνθήκες νεφοσκεπή ουρανού.



Σχήμα 3-3 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ του κλάσματος διάχυσης και του δείκτη καθαρότητας ουρανού για το διάστημα ενός έτους.



Σχήμα 3-4 Κατανομή τιμών του δείκτη καθαρότητας ουρανού και του κλάσματος διάχυσης για το διάστημα ενός έτους.

### 3.2 Υπολογισμοί σε κεκλιμένο επίπεδο

Αφού γίνει ο υπολογισμός της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας σε μία οριζόντια επιφάνεια, μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές για κεκλιμένες επιφάνειες (με κλίση  $\theta_p$ ), μέσω της Εξίσωσης 3.11. Στην περίπτωση αυτή η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από τρεις συνιστώσες, την άμεση, τη διάχυτη (που προκύπτει από την σκέδαση του φωτός στον ουρανό) και την ανακλώμενη (που προέρχεται από την ανάκλαση του φωτός στο έδαφος ή σε άλλες γειτνιάζουσες επιφάνειες).

$$I_{glo,til} = I_{dir} \cdot \cos\theta_i + I_{dif} \cdot F_{sky} + I_{glo,hor} \cdot \rho_g \cdot F_{grd} \quad (3.11)$$

όπου:

$I_{dir}$  είναι η άμεση ακτινοβολία,

$F_{sky}$  είναι το κλάσμα του ουρανού που βλέπει μία επίπεδη επιφάνεια με γωνία κλίσης  $\theta_p$  και δίνεται από την Εξίσωση 3.12:

$$F_{sky} = \frac{1 + \cos\theta_p}{2} \quad (3.12)$$

$F_{grd}$  είναι το κλάσμα της ανακλώμενης ενέργειας εδάφους που θα συλλεχθεί από την επιφάνεια και υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.13):

$$F_{grd} = \frac{1 - \cos\theta_p}{2} = 1 - F_{sky} \quad (3.13)$$

Η παράμετρος  $\rho_g$  είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους που εξαρτάται από το περιβάλλον και στους υπολογισμούς που έγιναν έχει ληφθεί ίση με 0.6. Η  $\theta_i$  είναι η γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην εισερχόμενη δέσμη της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και σε μία ευθεία κάθετη στην επιφάνεια και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.14.

$$\theta_i = \cos^{-1} \left[ \sin\theta_z \cdot \sin\theta_p \cdot \cos(\gamma - \text{orien}) + \cos\theta_z \cos\theta_p \right] \quad (3.14)$$

Στην παραπάνω εξίσωση  $\theta_z$  είναι η ζενιθιακή γωνία,  $\theta_p$  είναι η κλίση της επιφάνειας,  $\text{orien}$  είναι ο προσανατολισμός της επιφάνειας και  $\gamma$  είναι το αζιμούθιο, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της καθέτου στην κεκλιμένη επιφάνεια και του τοπικού μεσημβρινού πάνω στο οριζόντιο επίπεδο. Το αζιμούθιο ισούται με  $0^\circ$  όταν η επιφάνεια είναι

προσανατολισμένη στο Νότο, ενώ λαμβάνει θετικές τιμές προς τη Δύση και αρνητικές προς την Ανατολή.

$$\sin\gamma = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\sin\theta_z} \quad (3.15)$$

όπου  $\delta$  είναι η ηλιακή απόκλιση και  $\omega$  η ωραία γωνία του ηλίου.

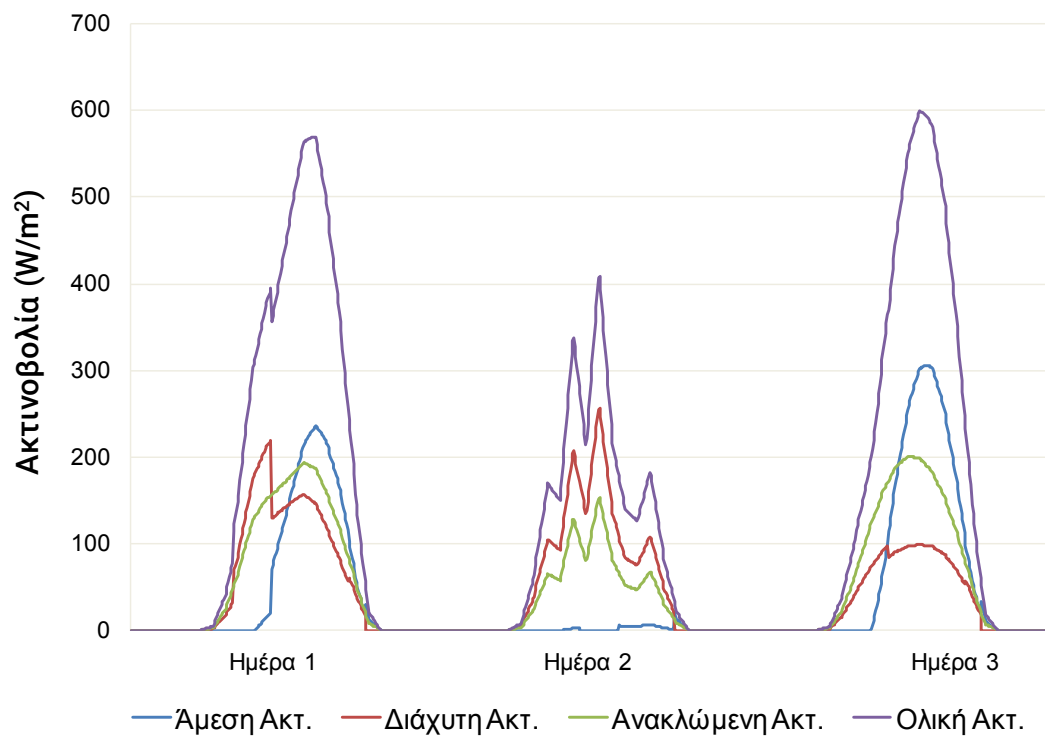
Ειδικά στην περίπτωση που ενδιαφέρει στην περίπτωση που εξετάζεται στα πλαίσια της διατριβής, δηλαδή στις κάθετες επιφάνειες των κτιρίων ( $\theta_p=90^\circ$ ), η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια  $I_{glo,vert}$  υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.16:

$$I_{glo,vert} = I_{dir} \cos\theta_i + \frac{I_{dif}}{2} + \frac{\rho_g \cdot I_{glo,hor}}{2} \quad (3.16)$$

Μία απεικόνιση των τριών συνιστωσών και της ολικής κάθετης ακτινοβολίας  $I_{glo,vert}$  όπως υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις της οριζόντιας ακτινοβολίας  $I_{glo,hor}$  και τις τιμές του  $k_t$  φαίνεται στο Σχήμα 3-5. Στο Σχήμα αυτό παρουσιάζονται για ένα τριήμερο του Σεπτεμβρίου οι τρεις προσθετοί και το άθροισμα της Εξίσωσης 3.16 για την κάθετη επιφάνεια ενός κτιρίου με Νοτιοδυτικό προσανατολισμό. Λόγω της καθετότητας της επιφάνειας, η άμεση ακτινοβολία αρχίζει να εμφανίζεται γύρω στις 10 π.μ. όταν ο ήλιος περνά μπροστά από το κτίριο, ενώ πριν από την ώρα αυτή παρουσιάζει μηδενική τιμή. Πρέπει να παρατηρηθεί ότι την Ημέρα 2 δεν υπάρχει καθόλου άμεση ακτινοβολία καθώς επικρατούν συνθήκες νεφοσκεπή ουρανού, με αποτέλεσμα η τιμή της διάχυτης ακτινοβολίας να είναι πολύ υψηλή (σχεδόν πλησιάζει την τιμή της άμεσης ακτινοβολίας). Τέλος, η μορφή της ανακλώμενης ακτινοβολίας ακολουθεί αυτήν της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας και δεν επηρεάζεται από τις άλλες δύο συνιστώσες.

Καθεμία από τις τρεις παραπάνω συνιστώσες έχει μία ειδική σημασία στην διαμόρφωση της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο χώρο και για το λόγο αυτό θα ενσωματωθούν όλες στο μοντέλο πρόβλεψής της που θα αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 5.





Σχήμα 3-5 Υπολογισμός συνιστωσών ακτινοβολίας σε κάθετη επιφάνεια, με χρήση της Εξίσωσης 3.16 για τρεις ημέρες του Σεπτεμβρίου με διαφορετική κατάσταση ουρανού.

## Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση συμπεριφοράς χρηστών

Ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί βασικό στοιχείο στο σχεδιασμό φωτισμού. Για το λόγο αυτό ακολουθούνται γενικές αρχές που λαμβάνουν υπόψη το είδος της εργασίας που εκτελείται σε κάθε χώρο, την εκμετάλλευση του φυσικού φωτός, την ομοιομορφία της έντασης φωτισμού και την αποφυγή θαμβώσεων. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε κοινή σχεδίαση του φωτισμού ενός χώρου ανεξάρτητα από τις ιδιαίτερες επιθυμίες που μπορεί να έχει ο χρήστης του. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.2.1, η συμπεριφορά των χρηστών σε σχέση με την διαχείριση του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων μπορεί να διαφέρει σημαντικά, αφού το σύνολο των δράσεων ενός χρήστη δεν μπορεί να εξηγηθεί αποκλειστικά με περιβαλλοντικά (μετρήσιμα) αίτια αλλά προκαλείται και από προσωπικές επιλογές, συνήθειες και ιδιαιτερότητες. Επομένως είναι αναγκαία η κατανόηση της διαφορετικής συμπεριφοράς του κάθε χρήστη και η αντίστοιχη μοντελοποίησή της, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της βέλτιστης έντασης φωτισμού για τον κάθε χρήστη στο χώρο εργασίας του και επομένως να διαμορφωθεί η προσωποποιημένη διαχείριση των συστημάτων φωτισμού και περσίδων.

Στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα μαθηματικά εργαλεία με σκοπό την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη, όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 1.3. Στις προσεγγίσεις αυτές συνήθως οι δράσεις του χρήστη εμφανίζονται ως συνάρτηση μίας ή περισσότερων περιβαλλοντικών μεταβλητών. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται διαχωρίζονται κυρίως σε ντετερμινιστικά και σε στοχαστικά. Στην πρώτη κατηγορία ο χρήστης θεωρείται βέβαιο ότι θα εκτελέσει μία δράση όταν μία μεταβλητή (π.χ. η εσωτερική ένταση φωτισμού) υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου, ενώ στη δεύτερη κατηγορία μοντέλων η δράση του χρήστη αποτελεί πιθανοτική συνάρτηση των τιμών της εξεταζόμενης μεταβλητής. Τα πιθανοτικά μοντέλα πρόβλεψης έχουν επικρατήσει, καθώς είναι κοινώς αποδεκτό ότι η συμπεριφορά των χρηστών είναι σε μεγάλο βαθμό στοχαστική. Ωστόσο, οι μεθοδολογίες που έχουν μέχρι σήμερα προταθεί εμφανίζουν διάφορες αδυναμίες κατά την ενσωμάτωσή τους σε αλγόριθμους πρόβλεψης δράσεων ή συνθηκών άνεσης.

Αναζητείται λοιπόν μία μεθοδολογία για την βήμα προς βήμα διαμόρφωση ενός πιθανοτικού μοντέλου με βάση τις καταγραφές των δράσεων του χρήστη υπό διάφορες συνθήκες. Η συμπεριφορά του χρήστη είναι στοχαστική και πολυπαραγοντική, αλλά είναι εφικτό να προσομοιωθεί αν υπάρχουν τα δεδομένα συμπεριφοράς του για διάφορες συνθήκες. Στην παρούσα διατριβή θα αναπτυχθεί μία νέα μεθοδολογία μοντελοποίησης που θα βασίζεται στα δεδομένα των μετρήσεων (όπως περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2) και θα αφορά στον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων που κάνει ο χρήστης για να επιτύχει συνθήκες άνεσης στον χώρο του. Με την προσέγγιση αυτή θα διαμορφωθούν προσωποποιημένα μοντέλα συμπεριφοράς για τους υπό μελέτη χρήστες και θα

ενσωματωθούν στους αλγόριθμους πρόβλεψης της διατριβής (Κεφάλαια 5 και 6), αντί να υιοθετηθεί κάποιο από τα γενικευμένα μοντέλα που προτείνονται στη βιβλιογραφία [33][93][133], που θα οδηγούσε σε ανακριβή αποτελέσματα.

#### **4.1 Κατανόηση δράσεων χρηστών**

Το πρώτο βήμα για την εξαγωγή ενός μοντέλου που θα περιγράφει τις προτιμήσεις του κάθε χρήστη σχετικά με τα επίπεδα έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του και θα προβλέπει τις αντίστοιχες δράσεις του είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς και των κινήσεών του. Συγκεκριμένα, πρέπει να αναζητηθούν οι αιτίες που ωθούν τον κάθε χρήστη να χρησιμοποιήσει των τεχνητό φωτισμό ή τις περσίδες. Η προφανής αιτία είναι η ρύθμιση της έντασης φωτισμού στο χώρο, ωστόσο δεν είναι η μοναδική.

Οι χρήστες πραγματοποιούν δράσεις που αφορούν στον φωτισμό ή και στις περσίδες τόσο κατά την άφιξη ή την αναχώρησή τους από το χώρο εργασίας (δράσεις άφιξης/ αναχώρησης), όσο και κατά την παραμονή τους σε αυτόν (ενδιάμεσες δράσεις). Μεταξύ των δύο κατηγοριών δράσεων υπάρχει μία σημαντική διαφορά. Οι δράσεις που γίνονται κατά την άφιξη ή την αναχώρηση ενός χρήστη είναι συνήθως δράσεις συνήθειας και δεν μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με την δυσφορία του κάθε χρήστη. Αντίθετα, οι ενδιάμεσες δράσεις ωθούνται συνήθως από κάποια όχληση. Πιο αναλυτικά, είναι πιθανό ένας χρήστης να ανοίγει τον τεχνητό φωτισμό κατά την είσοδό του στο γραφείο, χωρίς να νιώθει πραγματικά ότι η ένταση φωτισμού μέσα σε αυτό είναι χαμηλότερη από αυτή που επιθυμεί, απλά και μόνο επειδή έχει συνηθίσει να κάνει την κίνηση αυτή. Το ίδιο μπορεί να συμβαίνει για παράδειγμα και με την χρήση των περσίδων, όπου κάποιος χρήστης μπορεί να τις κατεβάξει πριν την αναχώρησή του για λόγους ασφάλειας, ιδιωτικότητας ή άλλους, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι η ένταση φωτισμού που επικρατούσε εκείνη τη στιγμή στο χώρο ήταν ενοχλητική για αυτόν. Αντίθετα, όταν ο χρήστης κατά την παραμονή του στο γραφείο χρησιμοποιήσει τον τεχνητό φωτισμό ή κλείσει τις περσίδες, είναι πιο πιθανό να το κάνει επειδή στην πραγματικότητα η ένταση φωτισμού δεν είχε την επιθυμητή τιμή. Επιπρόσθετα, κατά τις δράσεις άφιξης, ακόμα και όταν αυτές δεν γίνονται από συνήθεια αλλά λόγω όχλησης, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί σωστά η τιμή κατωφλίου της μεταβλητής (π.χ. εσωτερικής έντασης φωτισμού) στην οποία θα είχε νιώσει όχληση ο χρήστης και θα είχε δράσει. Στα σημεία αυτά μπορεί να αποτυπωθεί μόνο η αντίδραση του χρήστη σε μία δεδομένη τιμή που είχε η μεταβλητή κατά τη χρονική στιγμή της άφιξης του χρήστη.

Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα μόνο των ενδιάμεσων δράσεων για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών, αφού τα υπόλοιπα δεδομένα δεν θα έδιναν ασφαλή συμπεράσματα για αυτούς. Μία τέτοια προσέγγιση δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη, αφού τα περισσότερα μοντέλα της βιβλιογραφίας είτε δεν κάνουν αυτόν τον διαχωρισμό, είτε περιορίζονται στις δράσεις άφιξης/ αναχώρησης.

Αυτό συμβαίνει γιατί οι δράσεις αυτές είναι κατά κανόνα συχνότερες από τις ενδιάμεσες δράσεις. Ωστόσο, στην παρούσα διατριβή ο μεγάλος όγκος δεδομένων που συγκεντρώθηκαν επιτρέπει την αποκλειστική αξιοποίηση των ενδιάμεσων δράσεων.

Ένας ακόμα διαχωρισμός γίνεται στην κατηγορία των ενδιάμεσων δράσεων και αφορά στο είδος της δράσης που εκτελείται, δηλαδή αν πρόκειται για άνοιγμα ή κλείσιμο του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων. Συγκεκριμένα, για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του κάθε χρήστη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν μόνο τα δεδομένα των δράσεων που αφορούν σε άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού και σε κλείσιμο των περσίδων. Η απόφαση αυτή στηρίχθηκε στην παρατήρηση ότι όταν ένας χρήστης νιώσει ότι η ένταση φωτισμού είναι σε χαμηλά επίπεδα θα ανοίξει άμεσα τον τεχνητό φωτισμό (αφού θα αισθανθεί όχληση), όπως επίσης κατά παρόμοιο τρόπο θα κατεβάσει τις περσίδες όταν η θάμβωση από το φυσικό φως γίνει μη αποδεκτή για αυτόν. Ωστόσο, οι αντίθετες δράσεις (κλείσιμο του τεχνητού φωτισμού/ανέβασμα περσίδων) μπορεί να καθυστερήσουν να γίνουν ή να μην γίνουν καθόλου, αφού αυτές δεν ωθούνται από την όχληση αλλά από άλλους πιο τυχαίους παράγοντες όπως η αμέλεια, η συγκέντρωση στην εργασία [33][67][79].

Συνοψίζοντας, αφού μελετήθηκαν διάφοροι παράγοντες που ωθούν ένα χρήστη να δράσει, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν μόνο τα δεδομένα των ενδιάμεσων δράσεων που αφορούν σε άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού και κλείσιμο των περσίδων, καθώς οι δράσεις αυτές θεωρήθηκε ότι είναι αποτέλεσμα της όχλησης του χρήστη. Όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 1.2.2., από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη ρύθμιση του φωτισμού και των περσίδων, ο βασικότερος είναι η ένταση φωτισμού στον χώρο και μάλιστα στην επιφάνεια εργασίας. Ο παράγοντας αυτός έχει βρεθεί να συνδέεται στενά με την οπτική όχληση των χρηστών και αποτελεί την κύρια αιτία που τους ωθεί να χειριστούν τις περσίδες ή τον τεχνητό φωτισμό [55]. Άλλοι παράγοντες που έχουν διερευνηθεί είναι η εξωτερική ακτινοβολία, η θάμβωση καθώς και η εσωτερική/εξωτερική θερμοκρασία (κυρίως για την χρήση των περσίδων). Ωστόσο, αυτοί είτε σχετίζονται άμεσα με τη ένταση φωτισμού (ακτινοβολία) είτε είναι δύσκολο να καταγραφούν (θάμβωση).

Η μεθοδολογία μοντελοποίησης που αναπτύσσεται βασίζεται τέλος στην θεώρηση ότι ο κάθε χρήστης, επιλέγει να δημιουργεί ένα περιβάλλον στο οποίο αισθάνεται άνεση, όταν είναι ελεύθερος να ρυθμίζει την ένταση φωτισμού στο χώρο του. Επομένως, οι τιμές της έντασης φωτισμού στις οποίες ο χρήστης δρα αποτυπώνουν τα κατώφλια εκείνα στα οποία αισθάνεται όχληση και επομένως παρεμβαίνει. Οι τιμές αυτές κατωφλίου θα αξιοποιηθούν από το μοντέλο συμπεριφοράς για να γίνει η πιθανοτική αποτύπωση της όχλησης του χρήστη, ενώ αντίστοιχα οι τιμές για τις οποίες ο χρήστης δε δρα (και επομένως αισθάνεται άνεση στο χώρο του) θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη του αλγόριθμου ασαφούς λογικής για την πρόβλεψη της έντασης φωτισμού άνεσης που θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο 6.

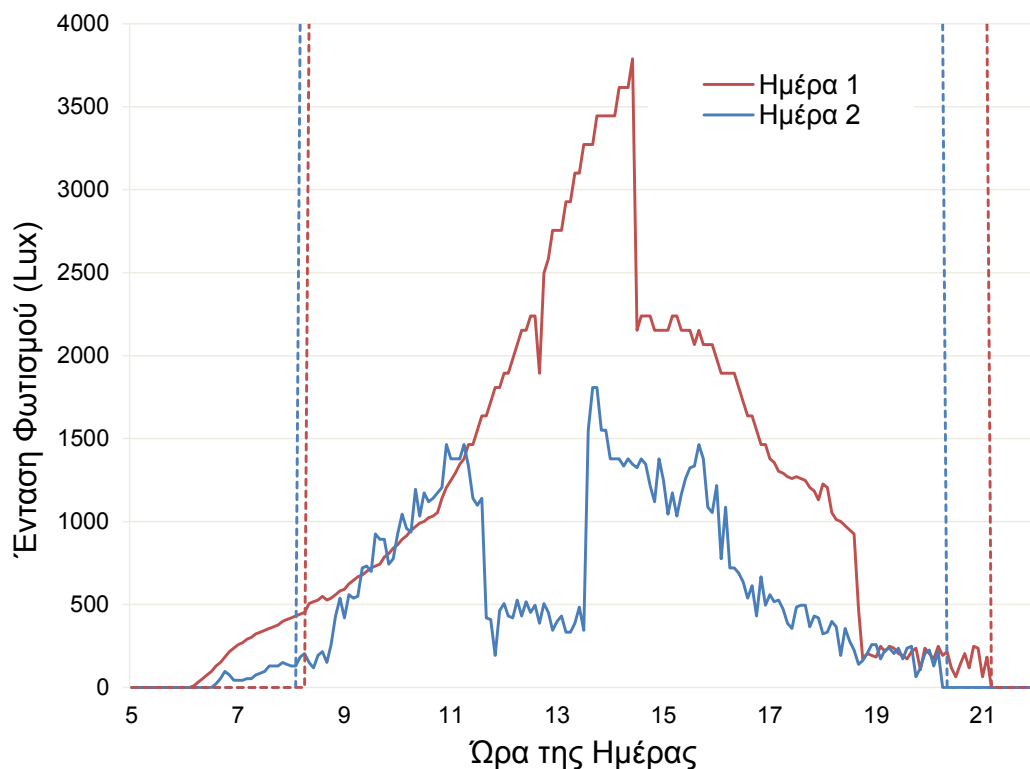
## 4.2 Καταγραφή και ανίχνευση δράσεων χρηστών

Οι δράσεις του χρήστη αποτυπώνονται στις αντίστοιχες χρονοσειρές των μετρήσεων ως απότομες μεταβολές της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας. Σε κάθε δράση μπορεί επίσης να αντιστοιχηθεί ένα ζεύγος τιμών έντασης φωτισμού, η ένταση φωτισμού πριν τη δράση που προκάλεσε όχληση και η ένταση φωτισμού μετά τη δράση που αντιστοιχεί σε συνθήκες άνεσης. Από την ανάλυση των δεδομένων διαπιστώνεται παράλληλα η στοχαστικότητα που υπάρχει στη συμπεριφορά κάθε χρήστη.

Στο Σχήμα 4-1 βλέπουμε για παράδειγμα την καταγραφή της έντασης φωτισμού στο γραφείο 1 για δύο διαδοχικές ημέρες του Μαρτίου. Την Ημέρα 1 ο χρήστης φτάνει στο γραφείο στις 8:20 (η παρουσία του χρήστη παρουσιάζεται με τις κάθετες διακεκομμένες γραμμές). Είναι μία ημέρα με καθαρό ουρανό, η ένταση φωτισμού συνεχώς αυξάνεται και στις 11:35 όταν η ένταση φωτισμού είναι 3800 Lux ο χρήστης αποφασίζει να κατεβάσει την περσίδα (Ενδιάμεση Δράση 1) προκαλώντας μείωση της έντασης φωτισμού κατά 1600 Lux. Στη συνέχεια, η εσωτερική ένταση φωτισμού μειώνεται ομαλά και κοντά στη δύση του ηλίου (στις 18:35) ο χρήστης ανάβει τα φώτα (Ενδιάμεση Δράση 2) και τα σβήνει κατά την αναχώρησή του στις 21:05 (Δράση Αναχώρησης).

Την επόμενη ημέρα (Ημέρα 2) ο χρήστης φτάνει στο γραφείο στις 8:20 και δεν κάνει καμία δράση άφιξης. Η ημέρα είναι συννεφιασμένη και η ένταση φωτισμού χαμηλότερη σε σχέση με την Ημέρα 1. Έτσι, στις 8:40 αισθάνεται όχληση και ανάβει τα φώτα (Ενδιάμεση Δράση 3). Παρατηρείται επίσης ότι η ένταση φωτισμού σταδιακά αυξάνεται αλλά ο χρήστης κρατά τα φώτα ανοιχτά. Στις 11:35 ο χρήστης κατεβάζει τις περσίδες (Ενδιάμεση Δράση 4) και τις ξανανεβάζει στις 13:35 (Ενδιάμεση Δράση 5). Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, μέχρι και την αναχώρησή του στις 20:15 τα φώτα είναι ανοικτά. Αυτό προκύπτει από την καταγραφή του αισθητήρα παρουσίας/φωτός και επίσης φαίνεται στην κυμάτωση της τιμής της έντασης φωτισμού. Από τις παραπάνω δράσεις η Ενδιάμεση Δράση 5 (ανέβασμα περσίδας) δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς δεν θεωρείται δράση όχλησης και δεν είναι σαφές γιατί ο χρήστης την πραγματοποίησε. Αντίστοιχα, δεν είναι σαφές γιατί αμέλησε να σβήσει τα φώτα και μάλιστα αφού η ένταση φωτισμού ήταν τόσο υψηλή που έκλεισε τις περσίδες. Όμοια με τα προηγούμενα, μία τέτοια δράση (σβήσιμο φωτός) επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του χρήστη.

Από το Σχήμα 4-1, προκύπτει ότι τα επίπεδα έντασης φωτισμού που προκάλεσαν την όχληση και δράση του χρήστη ήταν αρκετά διαφορετικά τις δύο ημέρες που παρουσιάστηκαν.

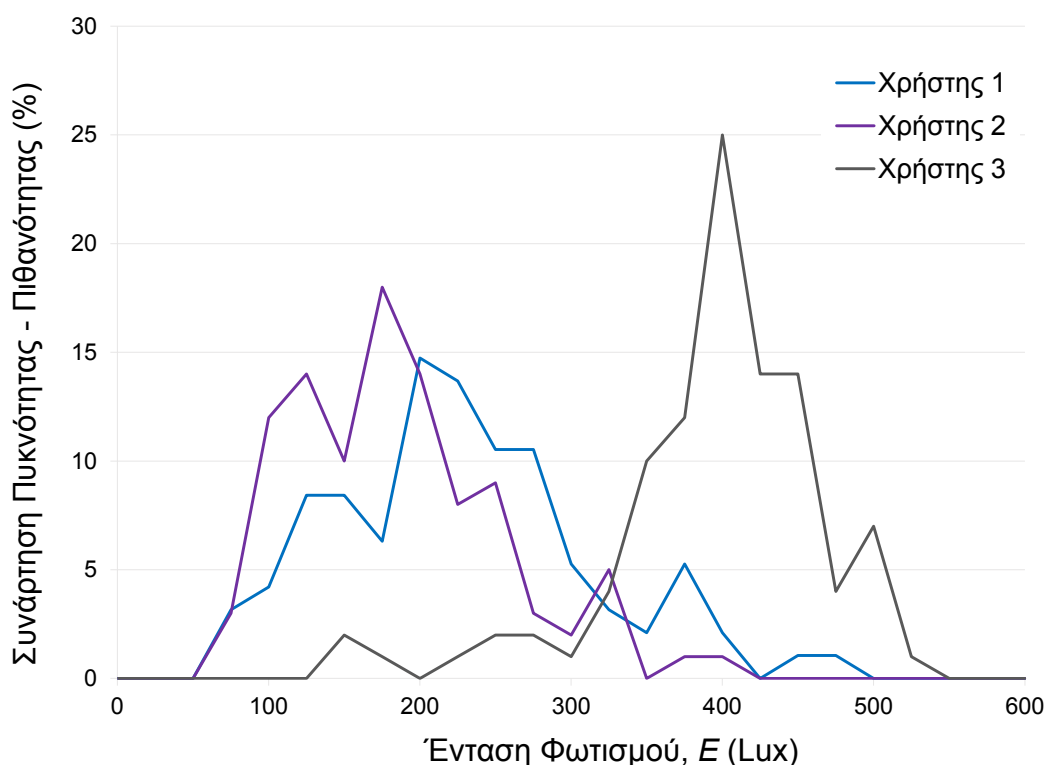


Σχήμα 4-1 Καταγραφές έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας για δύο διαδοχικές ημέρες στο ίδιο γραφείο (το διάστημα παρουσίας του χρήστη παρουσιάζεται με κάθετες διακεκομμένες γραμμές).

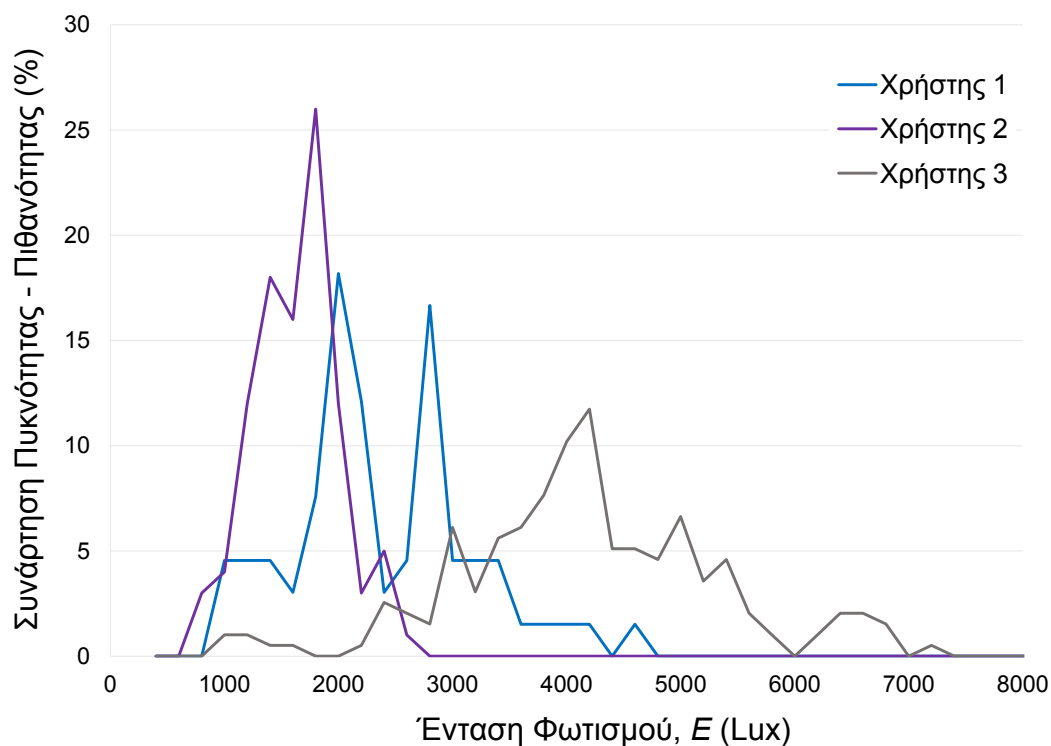
Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι ενδιαμέσες δράσεις που αφορούν στο χειρισμό του φωτισμού καταγράφονταν από τον αισθητήρα παρουσίας/φωτός. Αντίθετα, οι δράσεις που αφορούν στις περσίδες σημειώνονταν από τους χρήστες. Συγκεκριμένα καταγράφονταν η ώρα της δράσης καθώς και ο τύπος της (άνοιγμα ή κλείσιμο). Καθώς υπήρχε προβληματισμός (α) για την ακρίβεια στην ώρα αντιστοίχισης κάθε δράσης με τα δεδομένα έντασης φωτισμού και (β) για την πιθανή αμέλεια καταγραφής κάποιας δράσης, αναπτύχθηκε επιπρόσθετα ένας αλγόριθμος ανίχνευσης τέτοιων δράσεων. Ο αλγόριθμος αυτός διαβάζει τις μετρήσεις έντασης φωτισμού (με δειγματοληψία 5 min), υπολογίζει τις αντίστοιχες μεταβολές και εντοπίζει πιθανά σημεία δράσεων. Ο αλγόριθμος εκπαιδεύτηκε με τμήμα των καταγεγραμμένων από τους χρήστες συμβάντων και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για να επιβεβαιώσει τα υπόλοιπα συμβάντα, να εντοπίσει άλλα πιθανά συμβάντα που δεν είχαν καταγραφεί και τέλος να εξαγάγει ένα σύνολο με ζεύγη τιμών έντασης φωτισμού πριν και μετά από κάθε συμβάν.

Ο εκπαιδευμένος αυτός αλγόριθμος αξιοποιήθηκε και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συνέπεια στις δράσεις του κάθε χρήστη, την καθυστέρηση δράσης του καθώς και την ανοχή του σε διαφορετικά επίπεδα έντασης φωτισμού. Η χρήση του στο κομμάτι αυτό θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο. Τέλος, ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των δράσεων ενός χρήστη βασιζόμενος μόνο στις μετρήσεις έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του, χωρίς δηλαδή να πρέπει να καταγράφονται οι αντίστοιχες δράσεις.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων συλλέχθηκε ένα πλήθος περιστατικών Ενδιάμεσων Δράσεων για κάθε χρήστη το οποίο καταρχήν χωρίστηκε σε δύο σύνολα τιμών ( $M$  και  $N$ ). Το πρώτο περιλαμβάνει τις τιμές της έντασης φωτισμού ( $E$ ) στην οποία καταγράφηκαν συμβάντα ανοίγματος του φωτός και το δεύτερο περιλαμβάνει τις τιμές της  $E$  για τις οποίες έχουν καταγραφεί συμβάντα κλεισίματος των περσίδων για τον υπό μελέτη χρήστη. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Functions, PDFs) που προκύπτουν για τα δύο σύνολα τιμών των τριών χρηστών παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-2 και 4-3. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζουν μία ποικιλία ως προς το εύρος τιμών έντασης φωτισμού, ωστόσο η μορφή τους γενικά προσεγγίζει την κανονική κατανομή.



Σχήμα 4-2 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού ( $E$ ) στις οποίες πραγματοποιήθηκε άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού για κάθε ένα από τους τρεις χρήστες.

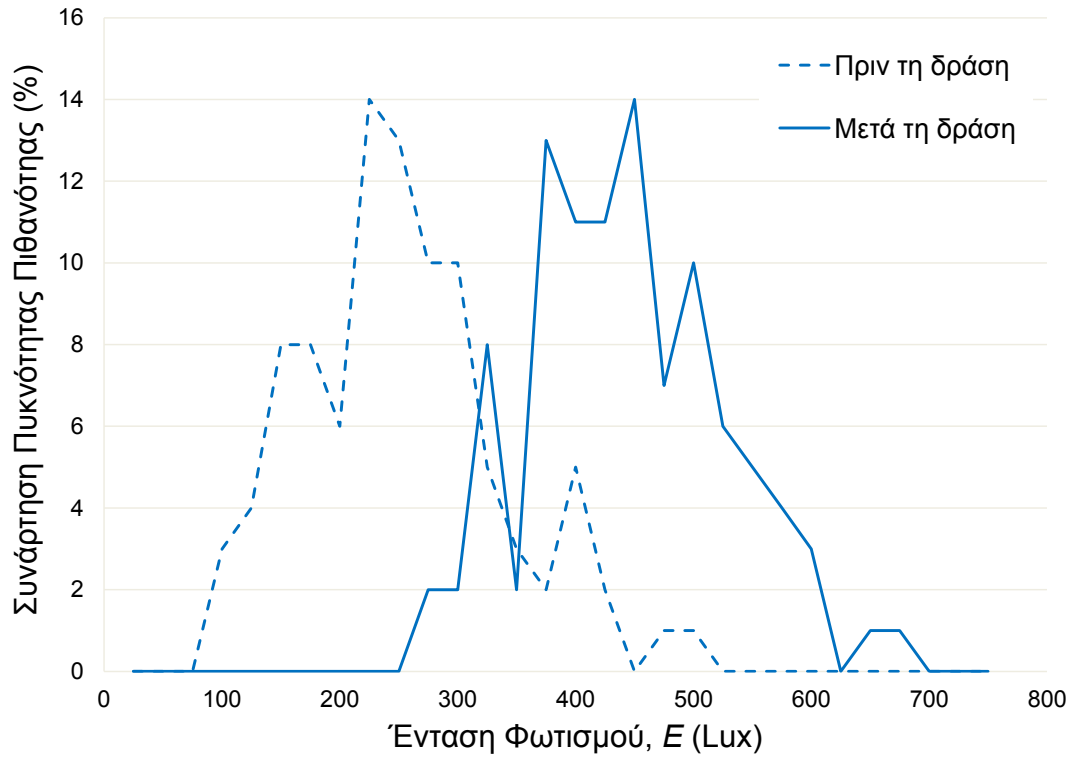


Σχήμα 4-3 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού (E) στις οποίες πραγματοποιήθηκε κλείσιμο των περσίδων για κάθε ένα από τους τρεις χρήστες.

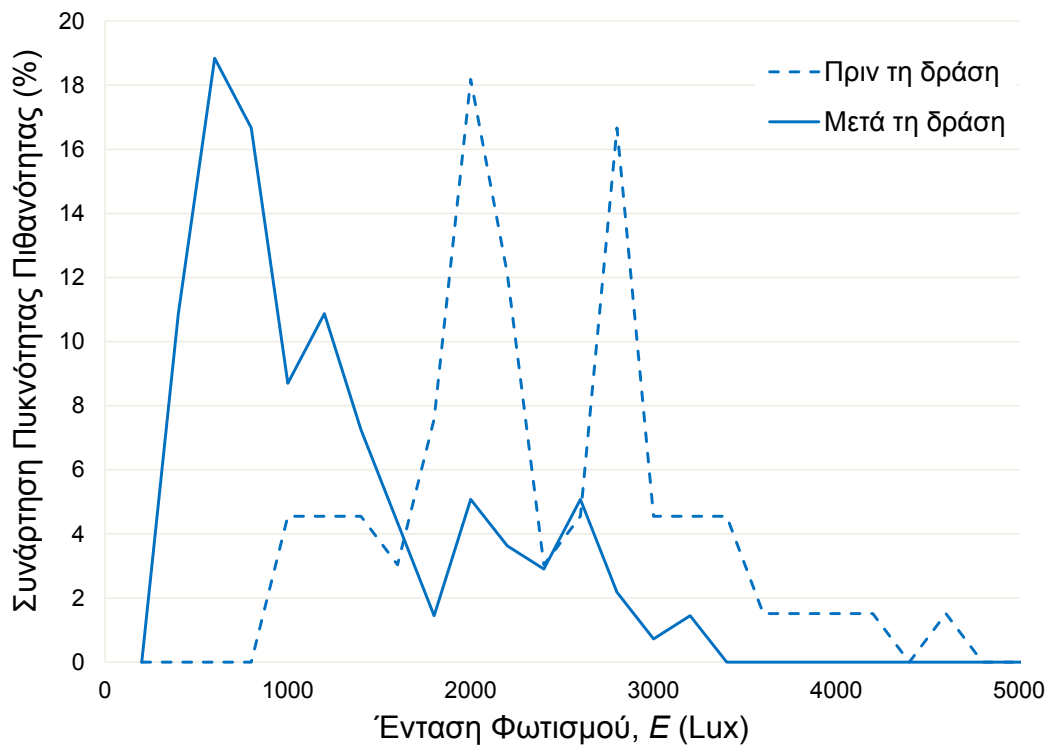
Επισημαίνεται ότι τα παραπάνω Σχήματα αναφέρονται στις τιμές της έντασης φωτισμού πριν τη δράση του κάθε χρήστη. Η ένταση φωτισμού ακριβώς μετά τη δράση καταγράφεται επίσης και αντιστοιχεί σε συνθήκες άνεσης. Οι δύο αυτές κατανομές πριν και μετά το άνοιγμα φωτός φαίνονται στο Σχήμα 4-4 ενδεικτικά για τον Χρήστη 1, ενώ οι αντίστοιχες κατανομές έντασης φωτισμού πριν και μετά το κλείσιμο περσίδας φαίνονται στο Σχήμα 4-5.

Το Σχήμα 4-4 δείχνει πως το άνοιγμα φωτός προκαλεί μία μάλλον σταθερή αύξηση της έντασης φωτισμού κατά 250-300 Lux. Αντίθετα, η μείωση της έντασης φωτισμού που προκαλείται με το κλείσιμο των περσίδων (Σχήμα 4-5) είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστεί και ποικίλλει κατά τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, από τη σύγκριση των καμπυλών πριν και μετά από κάθε δράση εξάγονται κάποια συμπεράσματα για το εύρος των εντάσεων φωτισμού για τις οποίες ο χρήστης αισθάνεται άνεση, καθώς και για τις οριακές τιμές έντασης φωτισμού για τις οποίες αρχίζουν να εμφανίζονται δράσεις. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι για τιμές έντασης φωτισμού μεταξύ 400-800 Lux περίπου επικρατούν συνθήκες άνεσης για τον Χρήστη 1 (αφού για αυτές τις τιμές δεν έχουν καταγραφεί δράσεις), ενώ στο υπόλοιπο πεδίο τιμών η άνεση του χρήστη δεν είναι βέβαιη.





Σχήμα 4-4 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού πριν και μετά την χρήση (άνοιγμα) του τεχνητού φωτισμού, για τον Χρήστη 1.



Σχήμα 4-5 Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας για τις τιμές έντασης φωτισμού πριν και μετά την χρήση (κλείσιμο) των περσίδων, για τον Χρήστη 1.

## 4.3 Μεθοδολογία μοντελοποίησης συμπεριφοράς χρήστη

### 4.3.1 Μοντελοποίηση των δράσεων των χρηστών

Η μοντελοποίηση του κάθε χρήστη στοχεύει στην εξαγωγή καμπυλών συμπεριφοράς, οι οποίες θα απεικονίζουν τις προτιμήσεις και τις αντίστοιχες δράσεις του χρήστη στο χώρο εργασίας του. Οι καμπύλες αυτές αποδίδουν την πιθανότητα για τον κάθε χρήστη να δράσει (να ανοίξει τον τεχνητό φωτισμό ή να κλείσει τις περσίδες) συναρτήσει της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του. Για τη μοντελοποίηση θεωρείται ότι υπάρχει ένα εύρος τιμών έντασης φωτισμού μέσα στο οποίο ο χρήστης νιώθει άνεση και επομένως δεν προβαίνει σε καμία δράση. Επίσης υπάρχουν τιμές κατωφλίου μετά τις οποίες ο χρήστης αρχίζει να αισθάνεται όχληση και επομένως είναι πιθανό να δράσει. Για τη διαμόρφωση αυτών των πιθανοτικών καμπυλών θα αξιοποιηθούν οι τιμές έντασης φωτισμού  $E$ , οι οποίες προκάλεσαν τις αντίστοιχες δράσεις του κάθε χρήστη. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των τιμών αυτών για τον κάθε χρήστη παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 4-2 και 4-3.

Για το κάθε σύνολο τιμών ( $M$  και  $N$ ) που περιλαμβάνει τα δεδομένα μετρήσεων των περιστατικών Ενδιάμεσων Δράσεων για κάθε χρήστη υπολογίζονται οι αντίστοιχες Αθροιστικές Συναρτήσεις Κατανομής, ΑΣΚ (Cumulative Distribution Functions, CDFs). Συγκεκριμένα υπολογίζεται μία ΑΣΚ που αφορά στην χρήση του τεχνητού φωτισμού και προκύπτει από τις τιμές του συνόλου  $M$ , και μία ΑΣΚ που αφορά στην χρήση των περσίδων και προκύπτει από τις αντίστοιχες τιμές του συνόλου  $N$ .

Αυτές οι ΑΣΚ μπορούν να προσομοιωθούν με χρήση λογιστικών συναρτήσεων (logistic functions), αφού οι αντίστοιχες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που προέκυψαν έχουν την μορφή κανονικής κατανομής. Οι λογιστικές συναρτήσεις έχουν χαρακτηριστική σιγμοειδή μορφή και παραμετροποιούνται με την χρήση δύο όρων ( $a$  και  $b$ ). Η παράμετρος  $a$  σχετίζεται με τον ρυθμό αύξησης της καμπύλης (growth rate), ενώ η παράμετρος  $b$  απεικονίζει το μέσο σημείο της καμπύλης (midpoint).

Με βάση τα παραπάνω, για τον κάθε χρήστη υπολογίζονται αρχικά:

- Η  $p(L=1|E)$  που αποτυπώνει την πιθανότητα ο χρήστης να ανοίξει τον τεχνητό φωτισμό ( $L=1$ ) σε μία τιμή έντασης φωτισμού μεγαλύτερη της  $E$  και δίνεται από την Εξίσωση 4.1:

$$p(L=1|E) = \frac{1}{1 + e^{-a(E-b)}} \quad (4.1)$$

Στην εξίσωση αυτή, οι τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $b$ , είναι διαφορετικές για κάθε χρήστη, αποδίδοντας έτσι την διαφορετικότητά του.

- Η  $p(BL=1|E)$  που αποτυπώνει την πιθανότητα ο χρήστης να κλείσει τις περσίδες ( $BL=1$ ) σε μία τιμή έντασης φωτισμού μικρότερης της  $E$  και δίνεται από την Εξίσωση 4.2:

$$p(BL=1|E) = \frac{1}{1+e^{-c(E-d)}} \quad (4.2)$$

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, οι τιμές των παραμέτρων  $c$  και  $d$  είναι διαφορετικές για κάθε χρήστη.

Υπάρχει επίσης η περίπτωση ο χρήστης να επιθυμεί να κλείσει τις περσίδες και να ανοίξει ταυτόχρονα τον τεχνητό φωτισμό, ίσως γιατί μετά το κατέβασμα των περσίδων η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας δεν είναι αρκετή για αυτόν. Τη στιγμή που ο χρήστης κατεβάζει τις περσίδες η τιμή της  $E$  λαμβάνει μία πολύ χαμηλότερη τιμή,  $E_{BL}$ . Θεωρώντας ότι η Εξίσωση 4.1 συνεχίζει να ισχύει για τον συγκεκριμένο χρήστη, δηλαδή ότι ο χρήστης αντιδρά με τον ίδιο τρόπο ως προς την επιθυμητή ένταση φωτισμού, ανεξάρτητα από την κατάσταση των περσίδων, μπορεί να προκύψει η Εξίσωση 4.3:

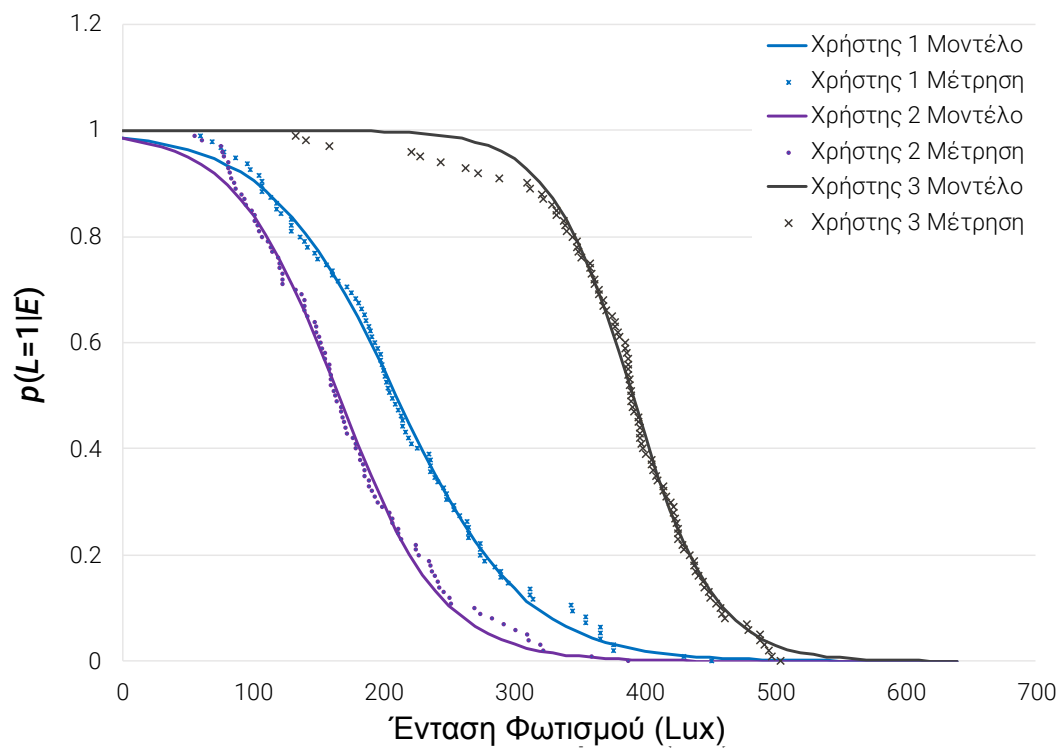
$$p(L=1|E_{BL}) = \frac{1}{1+e^{-a(E_{BL}-b)}} \quad (4.3)$$

Στην Εξίσωση αυτή οι τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $b$  είναι οι τιμές ανά χρήστη που χρησιμοποιούνται στην Εξίσωση 4.1, και η παράμετρος  $E_{BL}$  είναι η τιμή της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας με κλειστές περσίδες και αντικαθιστά την τιμή  $E$ , που χρησιμοποιείται όταν οι περσίδες είναι ανοικτές.

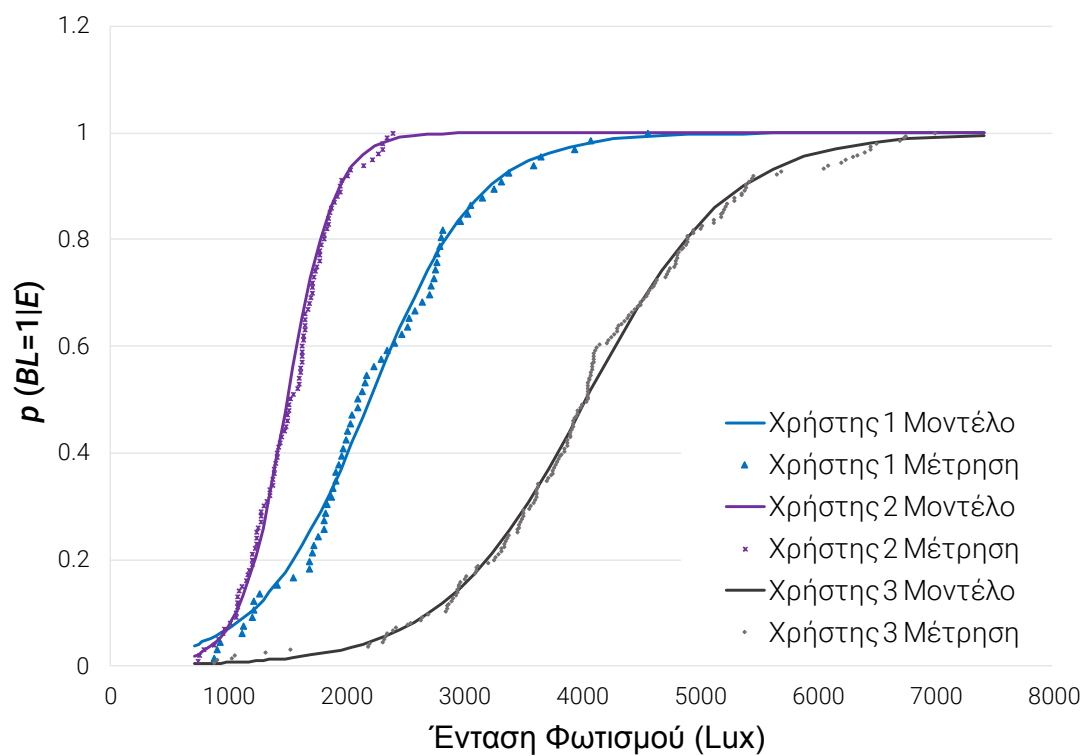
Η σύνθεση των παραπάνω Εξισώσεων οδηγεί στον υπολογισμό της συνολικής πιθανότητας ανοίγματος του τεχνητού φωτισμού (με ή χωρίς περσίδες), που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4.4. Η πιθανότητα αυτή μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό του κάθε χώρου, ανάλογα με τον χρήστη που τον χρησιμοποιεί.

$$p(L=1|E, E_{BL}) = (1-p(BL=1|E)) \cdot p(L=1|E) + p(BL=1|E) \cdot p(L=1|E_{BL}) \quad (4.4)$$

Στα Σχήματα 4-6 και 4-7 δίνονται οι μοντελοποιημένες πιθανοτικές καμπύλες των Εξισώσεων 4.1 και 4.2 μαζί με τις αντίστοιχες Αθροιστικές Συναρτήσεις Κατανομής που προκύπτουν από τα δεδομένα για τους τρεις χρήστες. Υπενθυμίζεται ότι οι αριθμοί των χρηστών (1, 2, 3) συμπίπτουν με τα αντίστοιχα Γραφεία (Γραφεία 1, 2, 3).



Σχήμα 4-6 Πιθανοτικές καμπύλες συμπεριφοράς για το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού για τους τρεις Χρήστες.



Σχήμα 4-7 Πιθανοτικές καμπύλες συμπεριφοράς για το κλείσιμο των περσίδων για τους τρεις Χρήστες.

Για να εξεταστεί η επάρκεια του προτεινόμενου μοντέλου, καθώς και η επιτυχία της παραμετρικής εκτίμησης των αντίστοιχων τιμών, στον Πίνακα 4-1 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$  μαζί με τα αντίστοιχα σφάλματα προσαρμογής (fitting errors) για τον κάθε χρήστη. Επιπρόσθετα, για να αποτιμηθεί η ακρίβεια της προσομοίωσης (goodness of fit) εφαρμόστηκε το Κριτήριο Kolmogorov – Smirnov. Το κριτήριο αυτό αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για τη σύγκριση δύο πληθυσμών και ουσιαστικά ελέγχει το κατά πόσο οι δύο πληθυσμοί προέρχονται από την ίδια κατανομή, έχει μάλιστα και το πλεονέκτημα να διακρίνει τις αποκλίσεις τόσο στη θέση όσο και στη μορφή των αθροιστικών κατανομών των δύο συνόλων. Η τιμή Kolmogorov-Smirnov  $Z$ , η στατιστική σημαντικότητα ( $p$ -value) για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) μεταξύ των μετρήσεων και των προσομοιώσεων παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 4-1. Από τις τιμές των παραμέτρων αυτών, πιστοποιείται η ακρίβεια του προτεινόμενου μοντέλου.

Πίνακας 4-1 Τιμές παραμέτρων των εξισώσεων 17-19 και αντίστοιχα σφάλματα προσαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου για τους τρεις Χρήστες.

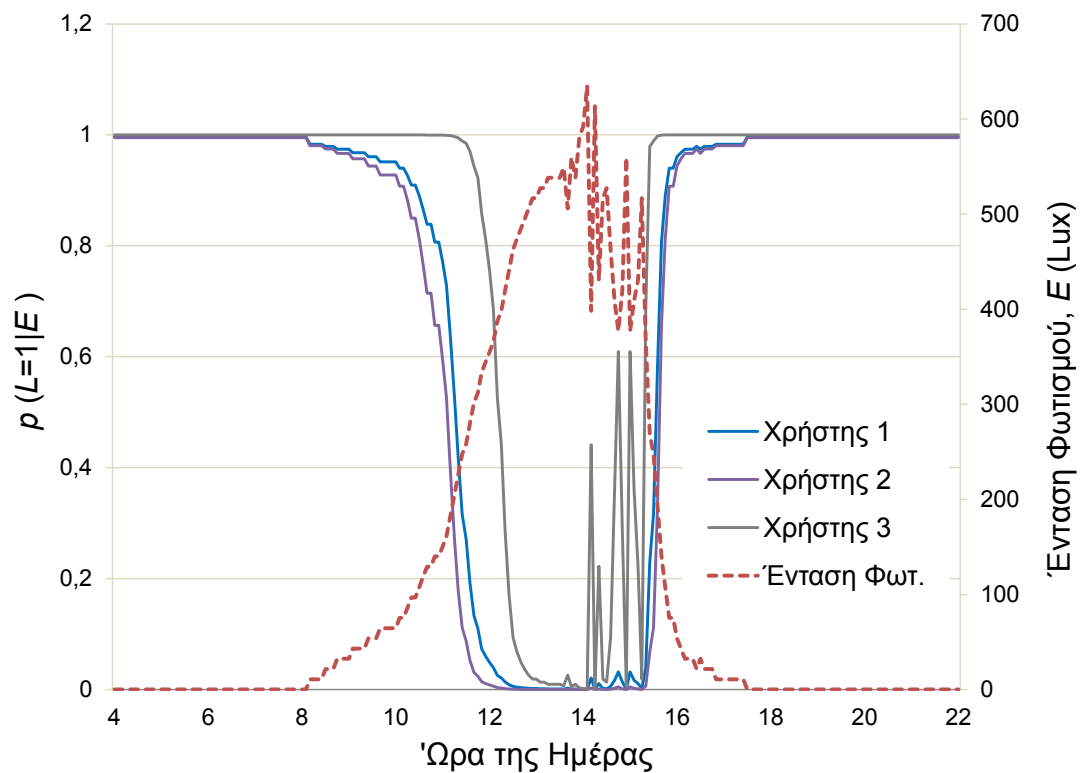
Παράμετροι και ακρίβεια της καμπύλης $p(L=1 E)$					
Χρήστης	$a$	$b$	K-S, $Z$	$p$ -value	RMSE
1	-0.02045	209.8	0.363	0.998	0.01878
2	-0.02528	165.5	0.495	0.967	0.02203
3	-0.03151	390.8	0.424	0.994	0.02242
Παράμετροι και ακρίβεια της καμπύλης $p(BL=1 E)$					
Χρήστης	$c$	$d$	K-S, $Z$	$p$ -value	RMSE
1	0.002153	2198.8	0.435	0.991	0.02978
2	0.00512	1500.2	0.636	0.813	0.03193
3	0.001656	4035.4	0.657	0.782	0.01844

Οι καμπύλες πιθανότητας που προέκυψαν για τα υπό μελέτη γραφεία με βάση την παραπάνω μεθοδολογία παρουσιάζουν σαφείς διαφορές μεταξύ των αντίστοιχων χρηστών. Τα Γραφεία 1 και 2 έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και διαμόρφωση παραθύρων. Ωστόσο, ο χρήστης του Γραφείου 2 (Χρήστης 2) παρουσιάζει γενικά την μικρότερη ανοχή στον φυσικό φωτισμό, δηλαδή κλείνει τις περσίδες σε χαμηλές τιμές έντασης φωτισμού ( $E$ ) ξεκινώντας από τα 750 Lux και φθάνοντας στα 2200 Lux. Επίσης, χρησιμοποιεί τον τεχνητό φωτισμό για μικρές τιμές έντασης φωτισμού και εμφανίζει πιθανότητα 0.5 να έχει ανάψει τα φώτα για τιμή 150 Lux.

Οι χρήστες του Γραφείου 1 (Χρήστης 1) είναι πιο ανεκτικοί στο φως της ημέρας και αρχίζουν να κλείνουν τις περσίδες όταν η ένταση φωτισμού στη επιφάνεια εργασίας υπερβαίνει τα 1000 Lux. Η αντίστοιχη πιθανότητα είναι 0.5 για τιμές έντασης φωτισμού μεγαλύτερες από 2300 Lux. Επιπλέον, οι χρήστες αυτοί χρειάζονται περισσότερο τεχνητό φωτισμό, καθώς τείνουν να τον χρησιμοποιούν με πιθανότητα 0.9 για ένταση φωτισμού κάτω από 120 Lux, και με πιθανότητα 0.5 για τιμές μικρότερες από 200 Lux.

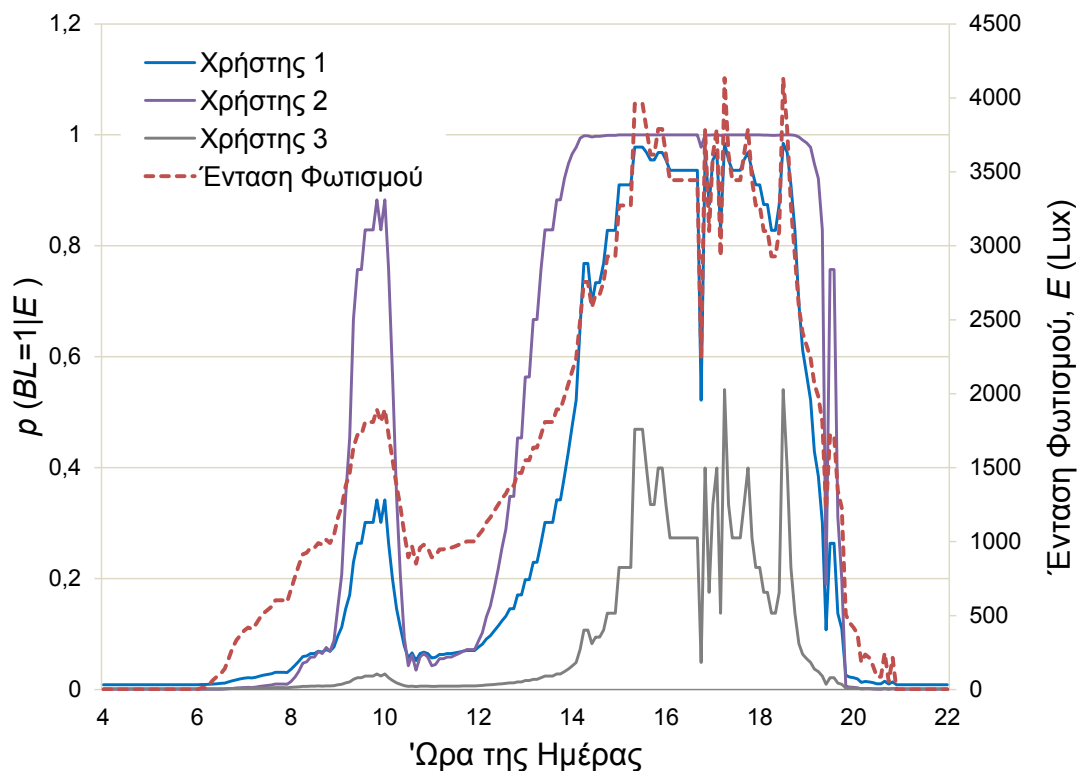
Ο Χρήστης 3 παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, το Γραφείο 3 έχει βορειοανατολικό προσανατολισμό, που σημαίνει ότι οι υψηλότερες τιμές έντασης φωτισμού καταγράφονται κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και διαρκούν για μικρό χρονικό διάστημα. Κάποιες φορές ο χρήστης κλείνει για λίγο τις περσίδες αλλά γενικότερα παρουσιάζει μεγάλη ανοχή στο εξωτερικό φως. Έχει επίσης την τάση να χρησιμοποιεί τον τεχνητό φωτισμό συχνότερα, παρουσιάζοντας πιθανότητα ίση με 0.9 να ανάψει τα φώτα για ένταση φωτισμού μικρότερη από 330 Lux, τιμή η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη των άλλων χρηστών. Ωστόσο, ακόμα και αυτή η τιμή εξακολουθεί να είναι μικρότερη από την τιμή έντασης φωτισμού των 500 Lux, η οποία είναι η ελάχιστη τιμή έντασης φωτισμού του που προτείνεται από το πρότυπο ECS 2011 [8] για χώρους γραφείων, υποδηλώνοντας ότι ένα σύστημα διαχείρισης φωτισμού συντονισμένο στις ιδιαιτέρες απαιτήσεις έντασης φωτισμού του κάθε χρήστη θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας. Η υπόθεση αυτή θα ελεγχθεί και στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα υπολογιστεί η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό που θα είχαν οι τρεις μελετώμενοι χρήστες υπό διάφορες συνθήκες προσανατολισμού και εποχής του έτους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογής των Εξισώσεων 4.1 και 4.2. Στο Σχήμα 4-8 φαίνεται μία πραγματική χρονοσειρά έντασης φωτισμού που ελήφθη στο Γραφείο 1 για μία ημέρα του χειμώνα χωρίς παρουσία χρηστών καθώς και οι υπολογισθείσες πιθανότητες ανοίγματος του τεχνητού φωτισμού,  $p(L=1|E)$ , για τους τρεις χρήστες.



Σχήμα 4-8 Εφαρμογή του μοντέλου συμπεριφοράς για το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού σε μία ημερήσια χρονοσειρά έντασης φωτισμού για τους τρεις Χρήστες.

Ομοίως στο Σχήμα 4-9 παρουσιάζεται μία ημέρα της άνοιξης, καθώς και οι αντίστοιχες πιθανότητες κλεισίματος των περσίδων,  $p(BL=1|E)$ , για τους τρεις χρήστες. Επιλέχθηκε μία ημέρα όπου η ένταση φωτισμού λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές (ως 4000 Lux) ώστε να γίνει εμφανής η διαφορά της συμπεριφοράς των χρηστών όσον αφορά στην χρήση των περσίδων. Σε όλο το φάσμα των εντάσεων φωτισμού ο Χρήστης 2 εμφανίζει τη μεγαλύτερη πιθανότητα δράσης, ακολουθούμενος από τον Χρήστη 1. Για τον Χρήστη 3 οι πιθανότητες δράσης που υπολογίστηκαν είναι κάτω από το 0.5 καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 4-9 Εφαρμογή του μοντέλου συμπεριφοράς για το κλείσιμο των περσίδων σε μία ημερήσια χρονοσειρά έντασης φωτισμού για τους τρεις Χρήστες.

#### 4.3.2 Μοντελοποίηση της καθυστέρησης δράσης και της ανοχής των χρηστών

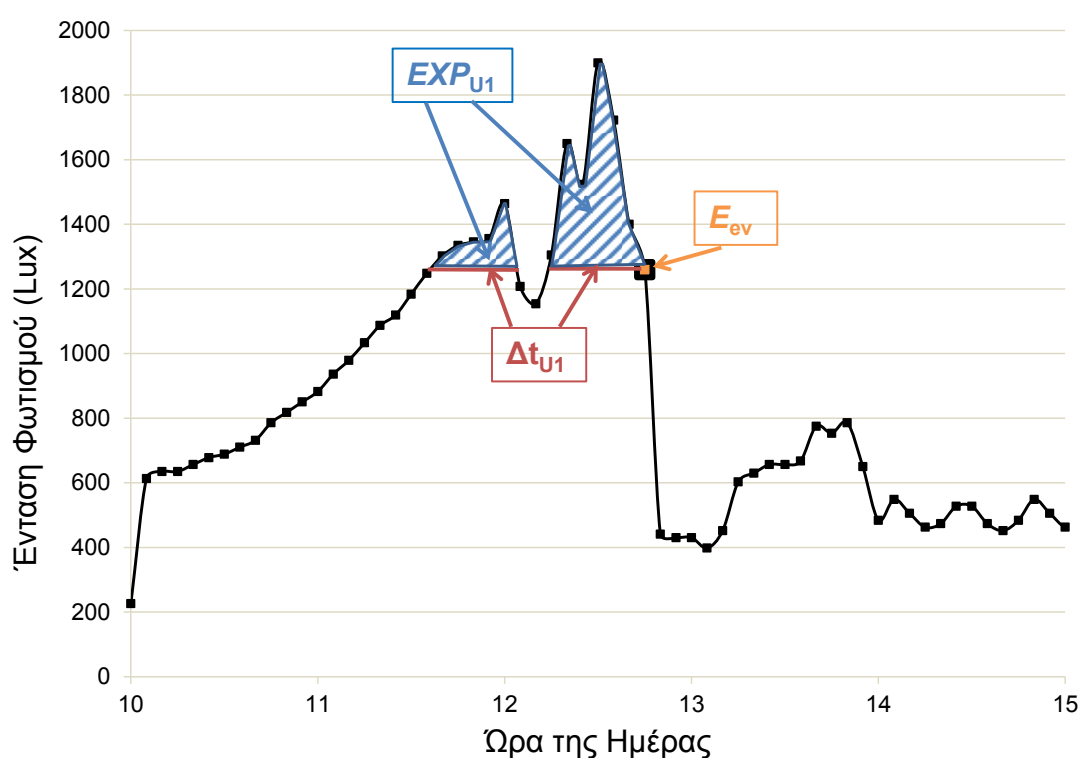
Η παραπάνω μοντελοποίηση βασίζεται στα δεδομένα των δράσεων των χρηστών και στην τιμή της έντασης φωτισμού για την οποία ο κάθε χρήστης, αισθανόμενος όχληση, έκλεισε τις περσίδες ή άνοιξε τον τεχνητό φωτισμό. Κατά την παρατήρηση όμως των χρονοσειρών έντασης φωτισμού και των αντίστοιχων δράσεων παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες ο χρήστης δεν έκανε την αναμενόμενη δράση, π.χ. να κλείσει τις περσίδες, σε μία υψηλή τιμή έντασης φωτισμού  $E_i$  αλλά έκανε την δράση αυτή λίγο αργότερα σε μία χαμηλότερη τιμή έντασης φωτισμού  $E_{ev}$ , μπορεί δηλαδή να θεωρηθεί ότι έδρασε με κάποια καθυστέρηση. Στην προσπάθεια περαιτέρω διερεύνησης της παρατήρησης αυτής δημιουργήθηκε ένας επιπλέον αλγόριθμος ο οποίος αντιστοιχεί σε κάθε δράση του χρήστη μία εκτιμώμενη τιμή για την καθυστέρηση δράσης (user delay) καθώς και μία τιμή για την σωρευτική έκθεση του χρήστη (user exposure) για το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις τιμές  $E_i$  και  $E_{ev}$ .

Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται δύο προσεγγίσεις εκτίμησης των μεγεθών της καθυστέρησης δράσης  $\Delta t_{U1}$  και της αντίστοιχης σωρευτικής έκθεσης του χρήστη  $EXP_{U1}$ :

(α) Στόχος της πρώτης προσέγγισης είναι η αντιστοίχιση μίας τιμής καθυστέρησης δράσης  $\Delta t_{U1}$  σε κάθε συμβάν δράσης ώστε να εξαχθούν πρόσθετες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του κάθε χρήστη. Έστω ότι ο χρήστης κατεβάζει τις περσίδες τη στιγμή  $t_{ev}$  για τιμή έντασης φωτισμού  $E_{ev}$ . Ο αλγόριθμος διατρέχει προς τα πίσω τη χρονοσειρά των



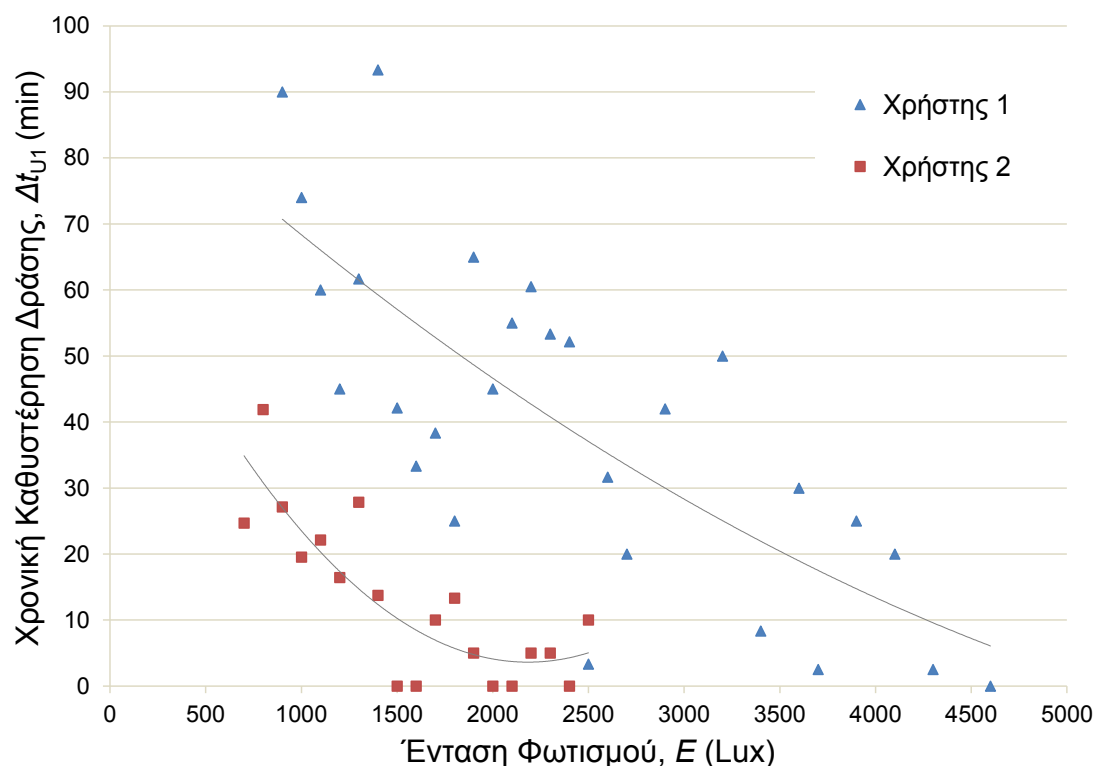
μετρήσεων έντασης φωτισμού (εφόσον υπάρχει παρουσία χρήστη στο γραφείο), εντοπίζει τις πιθανές τιμές  $E_i > E_{ev}$  και αθροίζει τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα  $\Delta t_i$  για τα οποία η προηγούμενη συνθήκη είναι αληθής, υπολογίζοντας τελικά την καθυστέρηση δράσης ( $\Delta t_{U1}$ ). Για κάθε μία από τις παραπάνω χρονικές στιγμές ορίζεται η διαφορά  $E_i - E_{ev}$  που είναι η στιγμιαία τιμή της έκθεσης του χρήστη σε ένταση φωτισμού μεγαλύτερη από αυτή στην οποία τελικά αυτός έδρασε (και έχει θεωρηθεί ότι του προκάλεσε όχληση). Το άθροισμα των τιμών αυτών για το σύνολο του διαστήματος κατά την διάρκεια μίας ημέρας για τις οποίες η τιμή της έκθεσης είναι μη μηδενική, συνιστά την σωρευτική τιμή της έκθεσης του χρήστη ( $EXP_{U1}$ ). Πρέπει να σημειωθεί ότι τα χρονικά βήματα αντιστοιχούν σε τιμές πενταλέπτου, αφού αυτό αποτελεί το βήμα δειγματοληψίας των μετρήσεων έντασης φωτισμού.



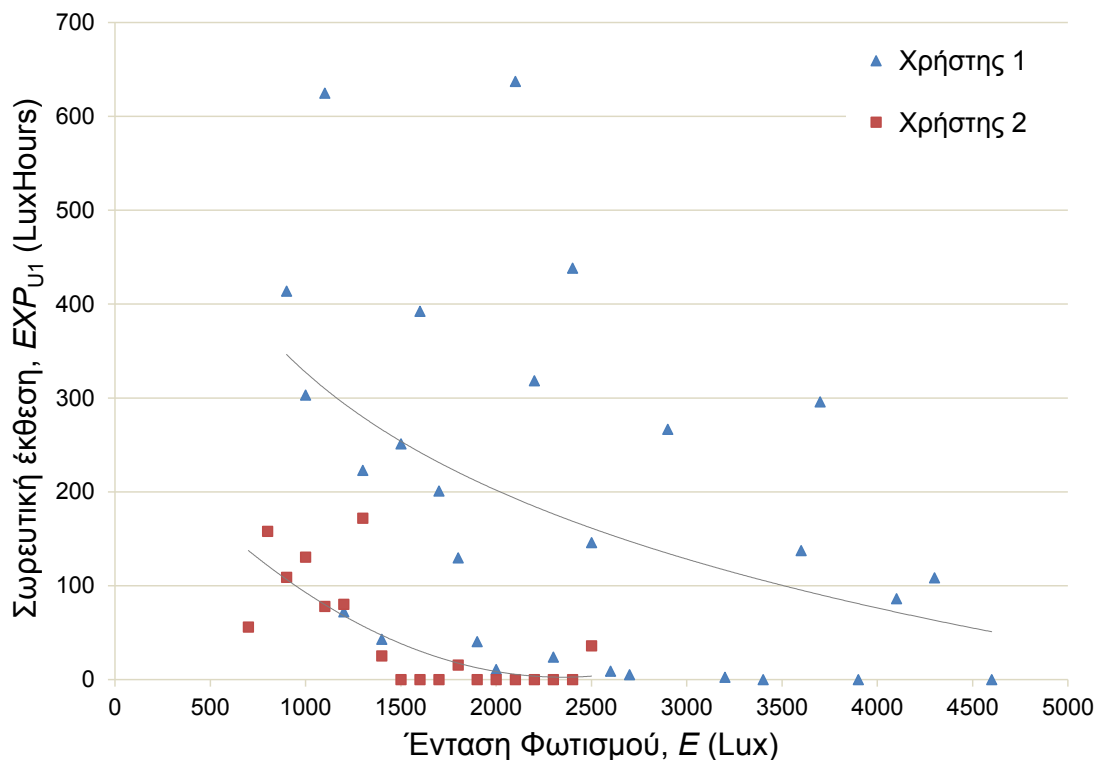
Σχήμα 4-10 Παράδειγμα εφαρμογής της πρώτης προσέγγισης για τον υπολογισμό της καθυστέρησης δράσης και της σωρευτικής έκθεσης του Χρήστη.

Ένα παράδειγμα των παραπάνω μεγεθών για τον Χρήστη 2 δίνεται στο Σχήμα 4-10. Σε αυτό παρουσιάζεται η χρονοσειρά έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας κατά τις ώρες παρουσίας του χρήστη (10:00 – 15:00). Στις 12:45 για τιμή  $E_{ev}=1260$  Lux, ο χρήστης κλείνει τις περσίδες. Ωστόσο, πριν από την χρονική αυτή στιγμή καταγράφηκαν διαστήματα όπου οι τιμές έντασης φωτισμού ήταν μεγαλύτερες από την τιμή αναφοράς ( $E_{ev}$ ). Για τις στιγμές αυτές υπολογίζεται η καθυστέρηση δράσης (που είναι 11 πεντάλεπτα) καθώς επίσης και η σωρευτική τιμή έκθεσης, που απεικονίζεται με τη μπλε διαγραμμισμένη επιφάνεια με τιμή 203.7 Λουξώρες (LuxHours).

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι χρήστες 1 και 2 προς σύγκριση καθώς βρίσκονται σε γραφεία με ίδιο προσανατολισμό και συνθήκες έντασης φωτισμού, ωστόσο οι πιθανοτικές καμπύλες συμπεριφοράς τους (που φαίνονται στο Σχήμα 4-7) παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Εξετάζοντας το σύνολο των συμβάντων του καθενός χρήστη και αντιστοιχώντας στην εκάστοτε ένταση φωτισμού την υπολογισθείσα χρονική καθυστέρηση  $\Delta t_{U1}$  και τη σωρευτική έκθεση  $EXP_{U1}$  προκύπτει η γενική εικόνα των Σχημάτων 4-11 και 4-12. Σε αυτά παρουσιάζεται η μέση τιμή της  $\Delta t_{U1}$  και της  $EXP_{U1}$  για κάθε επίπεδο έντασης φωτισμού με βήμα 100 Lux καθώς και οι αντίστοιχες γραμμές τάσης για κάθε χρήστη.



Σχήμα 4-11 Μέση τιμή της χρονικής καθυστέρησης δράσης,  $\Delta t_{U1}$ , για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - πρώτη προσέγγιση.



Σχήμα 4-12 Μέση τιμή της σωρευτικής έκθεσης,  $EXP_{U1}$ , για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - πρώτη προσέγγιση.

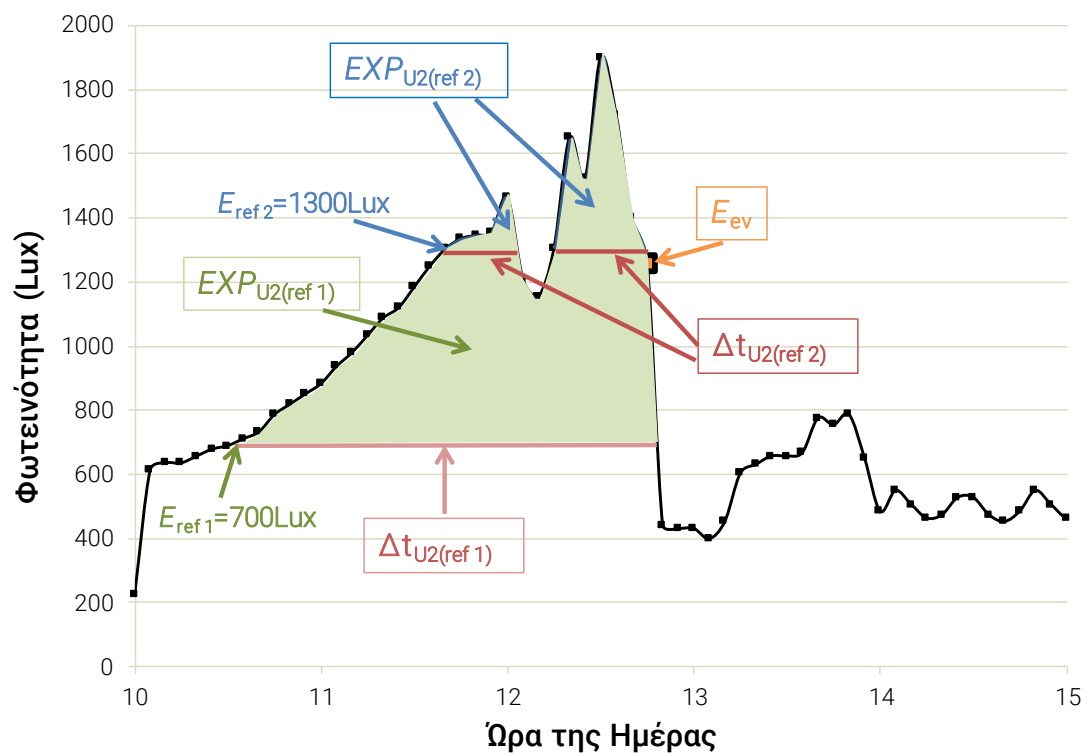
Όπως φαίνεται και για τους δύο χρήστες, τόσο η  $\Delta t_{U1}$  όσο και η  $EXP_{U1}$  μειώνονται συναρτήσει της έντασης φωτισμού. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι ο κάθε χρήστης έχει την τάση να δρα γρηγορότερα για υψηλά επίπεδα έντασης φωτισμού, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη  $EXP_{U1}$  να εμφανίζει μικρές τιμές. Αντίθετα, όταν η ένταση φωτισμού στον χώρο είναι χαμηλότερη, οι χρήστες εμφανίζουν μικρή πιθανότητα δράσης και επομένως μεγαλύτερη  $\Delta t_{U1}$ . Ωστόσο υπάρχουν έντονες διαφορές μεταξύ των δύο χρηστών που δεν περιορίζονται μόνο στο εύρος των εντάσεων φωτισμού δράσης. Ο Χρήστης 2 παρουσιάζει  $\Delta t_{U1}$  από 0 ως 45 min, ενώ για τον Χρήστη 1 η  $\Delta t_{U1}$  κυμαίνεται από 0 ως 90 min. Συνολικά ο Χρήστης 1 εμφανίζει μεγάλο εύρος εντάσεων φωτισμού στις οποίες δρα, μικρότερη κλίση στην καμπύλη συμπεριφοράς (Σχήμα 4-7) και μεγαλύτερη καθυστέρηση δράσης. Συγκρίνοντας τις καμπύλες τάσης της  $\Delta t_{U1}$  και της  $EXP_{U1}$  για τους δύο χρήστες προκύπτει ότι ο Χρήστης 2 είναι περισσότερο σταθερός στις δράσεις του, οι οποίες γίνονται κατά κανόνα καθώς η ένταση φωτισμού αυξάνει, με αποτέλεσμα οι τιμές καθυστέρησης να είναι μικρές ή μηδενικές και να μην προκύπτουν μεγάλες τιμές σωρευτικής έκθεσης.

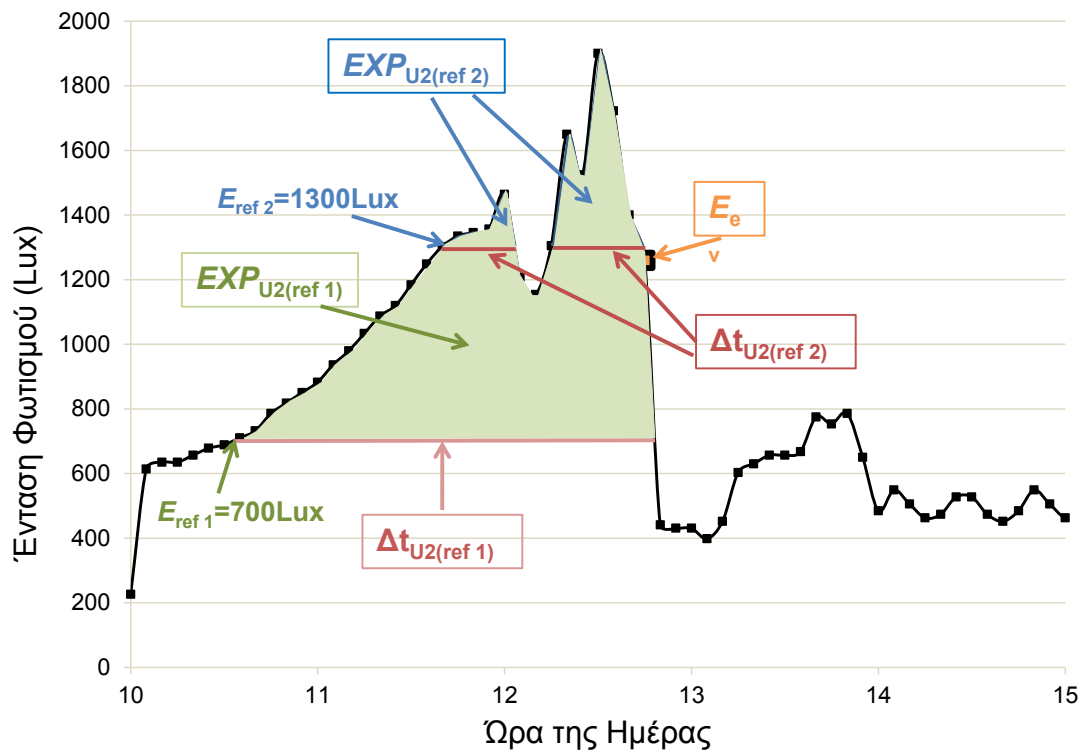
Συμπερασματικά, δεδομένου ότι η καμπύλη συμπεριφοράς του χρήστη ορίζει μία πιθανότητα δράσης ανάλογα με την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, εκτιμάται ότι οι αντίστοιχες καμπύλες για την μέση χρονική καθυστέρηση  $\Delta t_{U1}$  και την σωρευτική έκθεση  $EXP_{U1}$  παρέχουν πρόσθετη πληροφορία σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του χρήστη όσον αφορά στη συνέπεια των δράσεών του και την αντίστοιχη ανοχή του σε διαφορετικά επίπεδα έντασης φωτισμού. Για το λόγο αυτό, η παραπάνω προσέγγιση θα μπορούσε να

χρησιμοποιηθεί για μία περισσότερο στοχευμένη κατηγοριοποίηση των χρηστών και να αξιοποιηθεί σε σενάρια απόκρισης ζήτησης.

(β) Στόχος της δεύτερης προσέγγισης είναι ο υπολογισμός της καθυστέρησης δράσης  $\Delta t_{U2}$  μεταξύ του τρέχοντος επιπέδου έντασης φωτισμού  $E_{ref}$  και της αντίστοιχης τιμής έντασης φωτισμού στην οποία έλαβε χώρα τελικά ένα συμβάν ( $E_{ev}$ ). Αναλυτικότερα, διατρέχοντας την χρονοσειρά των μετρούμενων εντάσεων φωτισμού  $E_i$  υπολογίζεται η συνολική χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που εμφανίστηκε η τιμή  $E_{ref}$  μέχρι το συμβάν. Αν στο μεταξύ υπάρχουν τιμές  $E_i < E_{ref}$  τα αντίστοιχα διαστήματα δεν συνυπολογίζονται στην χρονική καθυστέρηση.

Για κάθε μία από τις παραπάνω χρονικές στιγμές ορίζεται και η διαφορά  $E_i - E_{ref}$  που είναι η στιγμιαία τιμή της έκθεσης του χρήστη σε ένταση φωτισμού μεγαλύτερη από την ένταση φωτισμού αναφοράς. Το άθροισμα των τιμών αυτών, για το σύνολο του διαστήματος μέχρι το συμβάν, συνιστά την σωρευτική τιμή της έκθεσης του χρήστη ( $EXP_{U2}$ ).

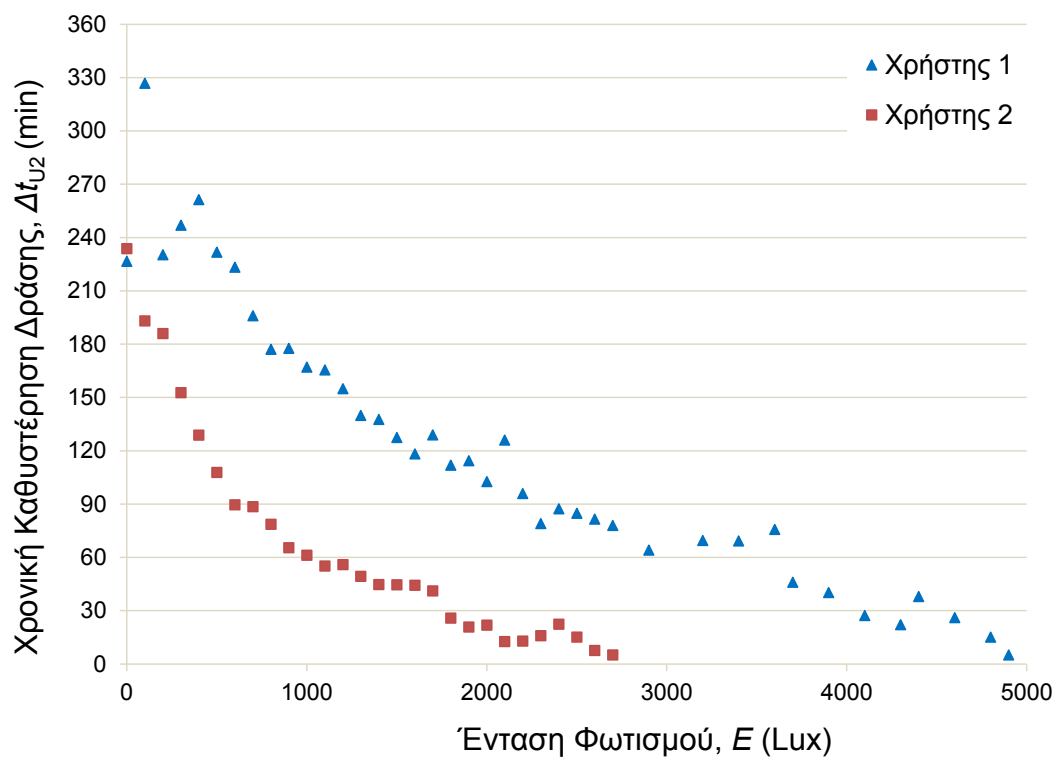




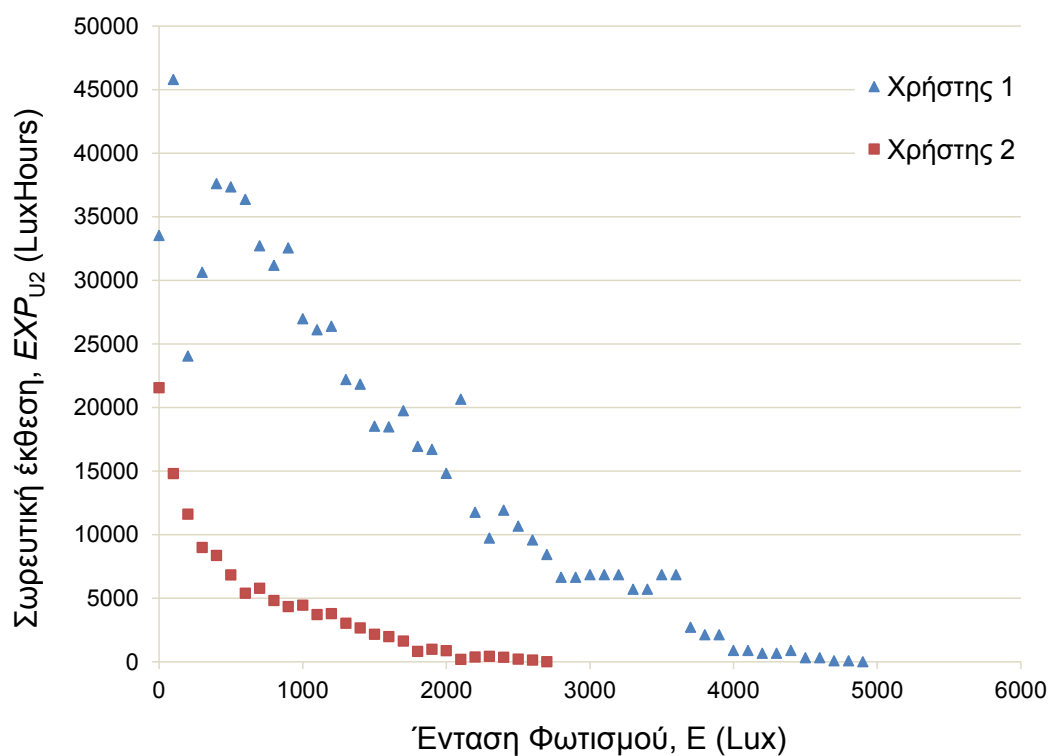
Σχήμα 4-13 Παράδειγμα εφαρμογής της δεύτερης προσέγγισης για τον υπολογισμό της καθυστέρησης δράσης και της σωρευτικής έκθεσης του Χρήστη.

Οι ορισμοί του  $\Delta t_{U2}$  και  $EXP_{U2}$  παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 4-13. Σε αυτό παρουσιάζεται η ίδια χρονοσειρά έντασης φωτισμού με το Σχήμα 4-10. Σε αντίθεση με την προσέγγιση (α) εδώ ορίζεται μία τιμή καθυστέρησης για κάθε σημείο  $E_{ref}$  της χρονοσειράς από την έλευση του χρήστη μέχρι το συμβάν. Για παράδειγμα, η τιμή  $E_{ref} = 700$  Lux στις 10:30 εμφανίζει συνολική χρονική καθυστέρηση 2 h και 10 min μέχρι το συμβάν και σωρευτική έκθεση 1093 Luxhours. Στην περίπτωση που ως  $E_{ref}$  ληφθεί το επίπεδο 1300 Lux στις 11:40, οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν είναι  $\Delta t_{U2} = 50$  min και  $EXP_{U2} = 164.8$  Λουξώρες (LuxHours)

Όπως προηγουμένως, συγκρίνονται οι χρήστες 1 και 2 για την προσέγγιση αυτή. Αυτή τη φορά υπολογίζεται μία τιμή χρονικής καθυστέρησης  $\Delta t_{U2}$  και μία τιμή σωρευτικής έκθεσης  $EXP_{U2}$  για κάθε μετρούμενη τιμή έντασης φωτισμού από την έλευση του χρήστη μέχρι το συμβάν. Το αποτέλεσμα είναι να συγκεντρώνεται ένα μεγάλο πλήθος δειγμάτων  $\{E_{ref}, \Delta t_{U2}, EXP_{U2}\}$  βάσει των οποίων προκύπτει η γενική εικόνα των Σχημάτων 4-14 και 4-15. Σε αυτά παρουσιάζεται η μέση τιμή της  $\Delta t_{U2}$  και της  $EXP_{U2}$  για κάθε επίπεδο έντασης φωτισμού με βήμα 100 Lux για τους δύο χρήστες.



Σχήμα 4-14 Μέση τιμή της χρονικής καθυστέρησης δράσης, για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - δεύτερη προσέγγιση.



Σχήμα 4-15 Μέση τιμή της σωρευτικής έκθεσης, για χρήση περσίδων, ανά επίπεδο έντασης φωτισμού για δύο Χρήστες - δεύτερη προσέγγιση.

Η γενική εικόνα της  $\Delta t_{u2}$  όσο και της  $EXP_{u2}$  είναι αντίστοιχη με αυτή των Σχημάτων 4-11 και 4-12. Ωστόσο στην περίπτωση αυτή οι καμπύλες προέρχονται από ένα μεγάλο πλήθος

δεδομένων και έχουν διαφορετική ερμηνεία, καθώς συνδέουν την τρέχουσα ένταση φωτισμού (σε ένα οποιοδήποτε χρονικό σημείο) με την προσεχή δράση του χρήστη εντός της ίδιας ημέρας. Η προσέγγιση αυτή θα αποδώσει την σταδιακή αύξηση της όχλησης του χρήστη μέσω της μείωσης του αντίστοιχου χρόνου καθυστέρησης.

Η ένταση φωτισμού αναφοράς τώρα καλύπτει όλο το εύρος τιμών που εμφανίζεται κατά την παρουσία του χρήστη. Μπορεί να θεωρηθεί ότι, καθώς παρακολουθείται καθημερινά η εξέλιξη της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, θα μπορούσε να αντιστοιχηθεί η τιμή της  $\Delta t_{U2}$  βάσει της καμπύλης του σχήματος που θα υποδεικνύει ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο είναι περισσότερο πιθανό να δράσει ο χρήστης.

Το ίδιο χρονικό διάστημα θα υποδεικνύει και η κυλιόμενη τιμή της  $EXP_{U2}$ , η μείωση της οποίας δηλώνει ότι η στιγμή της δράσης πλησιάζει, ενώ η αύξησή της σημαίνει ότι η στιγμή της δράσης απομακρύνεται χρονικά. Συμπερασματικά, αν υπάρχει μία δεδομένη χρονοσειρά εντάσεων φωτισμού (π.χ. κατόπιν πρόβλεψης) θα μπορούσε να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ο χρόνος δράσης του χρήστη.

## **Κεφάλαιο 5: Μοντέλα πρόβλεψης της εσωτερικής έντασης φωτισμού και των δράσεων κάθε χρήστη**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο ξεχωριστά μοντέλα, τα οποία με βάση το μαθηματικό μοντέλο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων – ΤΝΔ (Artificial Neural Networks - ANN) προβλέπουν την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας ενός γραφείου, αλλά και τις αντίστοιχες δράσεις που θα έκανε ένας συγκεκριμένος χρήστης στο χώρο αυτό. Τα μοντέλα σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν γενικευμένα, να μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν και να εκπαιδευτούν για πλήθος διαφορετικών περιπτώσεων και να αποτελέσουν με τον τρόπο αυτόν αξιόπιστα εργαλεία εκτίμησης της προσωποποιημένης χρήσης φωτισμού.

Τα μοντέλα των ΤΝΔ έχουν επιδείξει αξιοθαύμαστη αποδοτικότητα σε υπολογιστικά προβλήματα όπου πρέπει να ικανοποιούνται παράλληλα πολλές συνθήκες. Η δυνατότητα αυτή οφείλεται στη χρήση αναλογικών νευρώνων με μη γραμμική συμπεριφορά και οφείλεται στον υψηλό αριθμό διασυνδέσεων με συνδέσμους που έχουν μεταβαλλόμενο συντελεστή βάρους. Για τους παραπάνω λόγους τα ΤΝΔ έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ενεργειακές προσομοιώσεις και έχουν εφαρμοστεί σε αντικείμενα όπως η πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής, η απόκριση φορτίου, η διαχείριση ενέργειας σε κτίρια κλπ. Επιπλέον αποδίδουν ικανοποιητικά σε εφαρμογές όπου απαιτείται αναγνώριση προτύπων και αντίστοιχη κατηγοριοποίηση των δεδομένων. Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης, τα ΤΝΔ έχουν τη δυνατότητα να αυτοοργανώνονται, να προσαρμόζονται σε μεγάλο όγκο δεδομένων, να γενικεύουν, ακόμα και να ανακτούν πληροφορία από μερικώς ελλιπή ή λανθασμένα δεδομένα. Λόγω του μεγάλου αριθμού τοπικά διασυνδεδεμένων κόμβων επεξεργασίας το ΤΝΔ παρουσιάζει μεγάλη ευρωστία, δεν επηρεάζεται εύκολα από μεμονωμένους νευρώνες και συνδέσμους, ελαχιστοποιεί την επέκταση οποιουδήποτε σφάλματος και προσαρμόζεται ταχύτατα σε νέα δεδομένα.

Στην προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ένα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης (Feed-Forward ANN) το οποίο αποτελείται από νευρώνες δομημένους σε στρώματα και συγκεκριμένα από ένα στρώμα εισόδου (input layer), ένα στρώμα εξόδου (output layer) και μεταξύ αυτών ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα (κρυφά) στρώματα (hidden layers). Στα ΤΝΔ αυτού του τύπου το σήμα διαδίδεται μόνο προς μία κατεύθυνση, από την είσοδο προς την έξοδο τους. Επομένως, το σήμα δεν μπορεί να διαδοθεί από ένα νευρώνα σε έναν άλλο του ίδιου ή προηγούμενου στρώματος και η έξοδος κάθε νευρώνα επηρεάζει μόνο τα επόμενα στρώματα. Η διαμόρφωση της βέλτιστης αρχιτεκτονικής του ΤΝΔ, δηλαδή ο αριθμός των νευρώνων του κάθε στρώματος, η ύπαρξη ή όχι κρυφού στρώματος, η πιθανή προσθήκη και δεύτερου κρυφού στρώματος κλπ. προκύπτει



ύστερα από δοκιμές, όπως θα δειχθεί αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου.

Η τυπική λειτουργία ενός ΤΝΔ χωρίζεται σε τρία στάδια: α) στο στάδιο της εκπαίδευσης (training), β) στο στάδιο της επαλήθευσης (validation) και γ) στο στάδιο της ενθύμησης (testing).

Κατά την εκπαίδευση του ΤΝΔ δίνεται στο δίκτυο μία σειρά από πρότυπα - δηλ. διανυσματικά ζεύγη εισόδων και αντιστοίχων εξόδων - προερχόμενα από πραγματικά δεδομένα. Σε κάθε νευρώνα εισάγεται η τιμή εισόδου, σε αυτή προστίθεται μία σταθερή τιμή (όρος πόλωσης), που χαρακτηρίζει τη μνήμη του νευρωνίου και το αποτέλεσμα στη συνέχεια φιλτράρεται συνήθως μέσω μίας σιγμοειδούς συναρτήσεως παράγοντας έτσι την έξοδο του νευρώνα. Στον αλγόριθμο που δημιουργήθηκε χρησιμοποιήθηκε η σιγμοειδής συνάρτηση  $-1/1$  (tansig).

Σε ένα τυπικό, ολικά διασυνδεδεμένο ΤΝΔ, κάθε νευρώνας συνδέεται με όλους τους νευρώνες του προηγούμενου και του επόμενου στρώματος με συνδέσμους, κάθε ένας εκ των οποίων έχει το δικό του συντελεστή βάρους. Οι παράμετροι του ΤΝΔ (βάρη και όροι πόλωσης) αρχικά παίρνουν τυχαίες τιμές και στη συνέχεια βελτιστοποιούνται βάσει ενός αλγορίθμου που συνδυάζει τις μεθόδους της κλίσης και της προς τα πίσω διάδοσης (back propagation). Στον προτεινόμενο αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Levenberg-Marquardt, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη και αποδοτική ειδικά σε προβλήματα διαμόρφωσης περίπλοκων συναρτήσεων όπως αυτό με το οποίο ασχολείται η παρούσα διατριβή.

Τα διανυσματικά ζεύγη των εισόδων και των αντιστοίχων εξόδων (πρότυπα) που χρησιμοποιήθηκαν, διαχωρίστηκαν σε τρία επιμέρους σύνολα δεδομένων. Τα σύνολα αυτά περιλαμβάνουν τα πρότυπα εκπαίδευσης (training data), τα πρότυπα επαλήθευσης (validation data) και τα πρότυπα ενθύμησης (testing data). Τα πρώτα χρησιμοποιούνται μόνο κατά το στάδιο της εκπαίδευσης του ΤΝΔ, καθοδηγώντας ουσιαστικά την μεταβολή των βαρών του κάθε νευρώνα με στόχο την μείωση του σφάλματος. Τα πρότυπα επαλήθευσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του αντίστοιχου σφάλματος επαλήθευσης.

Το σφάλμα εκπαίδευσης μειώνεται συνεχώς κατά τις πρώτες επαναλήψεις της διαδικασίας εκπαίδευσης, ενώ στην συνέχεια σταθεροποιείται σταδιακά. Ταυτόχρονα παρακολουθείται το αντίστοιχο σφάλμα επαλήθευσης, το οποίο αρχικά συνήθως ακολουθεί το σφάλμα εκπαίδευσης. Υπάρχει η περίπτωση το σφάλμα επαλήθευσης να αρχίσει να αυξάνεται μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων, στοιχείο που αποτελεί ένδειξη υπερ-εκπαίδευσης (overtraining) του δικτύου. Το φαινόμενο της υπερ-εκπαίδευσης εμφανίζεται όταν ένα ΤΝΔ εκπαιδεύεται υπερβολικά με αποτέλεσμα να απομνημονεύει μεν τα δεδομένα εκπαίδευσης, αποτυγχάνοντας όμως να αποδώσει σωστά αποτελέσματα όταν αυτό

τροφοδοτείται με διαφορετικές εισόδους. Εάν εμφανιστεί το φαινόμενο αυτό, η εκπαίδευση σταματά και ως σωστές τιμές βαρών και τιμών πόλωσης κρατούνται οι τιμές που εμφανίστηκαν όταν το σφάλμα επαλήθευσης είχε λάβει τη μικρότερη τιμή του.

Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης ακολουθεί το στάδιο της ενθύμησης. Στο στάδιο αυτό δίνονται μόνο οι εισοδοί στο διαμορφωθέν ΤΝΔ και αυτό υπολογίζει την έξοδό του. Η αξιολόγηση της επίδοσης του ΤΝΔ γίνεται εκ των υστέρων βάσει των σφαλμάτων του σταδίου ενθύμησης. Πρέπει να τονιστεί ότι τα πρότυπα ενθύμησης χρησιμοποιούνται μόνο για τον έλεγχο της απόδοσης του ΤΝΔ, χωρίς αυτά να έχουν εμφανιστεί στο στάδιο της εκπαίδευσης. Πρόκειται δηλαδή για πρότυπα τελείως άγνωστα στο ΤΝΔ, στα οποία καλείται να εφαρμοστεί για να υπολογιστεί έτσι η απόδοσή του σε διαφορετικές συνθήκες.

Τα τρία σύνολα δεδομένων (εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ενθύμησης) σχηματίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι στατιστικά ομοιόμορφα. Δηλαδή, στο μέτρο του δυνατού, όλες οι στατιστικές ιδιότητες του συνόλου εκπαίδευσης πρέπει να εμφανίζουν παρόμοιες τιμές και στα άλλα δύο σύνολα. Δεδομένα από μετρήσεις ή προσομοιώσεις, από όλες τις εποχές του έτους, τους πιθανούς προσανατολισμούς, τις διαφορετικές αποστάσεις της θέσης εργασίας από το παράθυρο, τις εξωτερικές συνθήκες (καθαρός ουρανός, συννεφιά κλπ) πρέπει να περιλαμβάνονται με την ίδια αναλογία και στα τρία σύνολα. Από το σύνολο των προτύπων το 50% χρησιμοποιήθηκε για εκπαίδευση, το 17% για επαλήθευση και το 33% για ενθύμηση.

Έχοντας λοιπόν ως δεδομένα τα στοιχεία που αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 2-4, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα πρόβλεψης της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας και των δράσεων του χρήστη. Ειδικότερα, η ένταση φωτισμού αυτή προβλέπεται για κάθε ώρα της ημέρας και ημέρα του έτους ανάλογα με την κατάσταση του ουρανού, την τοποθεσία και τον προσανατολισμό του γραφείου. Συνυπολογίζονται επίσης η απόσταση της θέσης εργασίας από τα παράθυρα και η επίδραση των περσίδων. Στα παραπάνω υπεισέρχονται και οι καμπύλες συμπεριφοράς του χρήστη, όπως αυτές προέκυψαν από την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του, οδηγώντας σε μία πολυπαραγοντική πρόβλεψη των δράσεων του κάθε χρήστη. Στο πρώτο μοντέλο η έξοδος του ΤΝΔ είναι η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας και οι αντίστοιχες δράσεις των χρηστών υπολογίζονται στη συνέχεια επί αυτής, ενώ το δεύτερο μοντέλο έχει σαν έξοδο απευθείας την πιθανότητα δράσης του κάθε χρήστη για κάθε ώρα της ημέρας. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του κάθε μοντέλου, καθώς και η αποτίμηση της αξιοπιστίας του.

## 5.1 Πρώτο μοντέλο πρόβλεψης

Ο σκοπός του μοντέλου αυτού είναι να προβλέπει για κάθε ώρα της ημέρας δύο διαφορετικές τιμές έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας,  $E$  και  $E_{BL}$ . Η μία τιμή

αντιστοιχεί σε κατάσταση όπου οι περσίδες του χώρου είναι ανοικτές και η άλλη σε κατάσταση με κλειστές περσίδες. Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζονται οι αντίστοιχες πιθανότητες δράσης του κάθε χρήστη, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες συμπεριφοράς των Εξισώσεων 17-19 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Οι εισοδοί και οι έξοδοι του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1 και αναλύονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5-1 Είσοδοι και Έξοδοι του πρώτου μοντέλου πρόβλεψης.

Είσοδοι	Περιγραφή	Εύρος τιμών
1-2	Δείκτες της ημέρας του έτους, $\cos(2\pi n/365), \sin(2\pi n/365), n = 1, 2, \dots, 365$	$[-1, 1]$
3	Προσανατολισμός (rad) (0 για Νότιο, $\pi$ για Βόρειο)	$[0, 2\pi]$
4	Δείκτης καθαρότητας ουρανού $k_t$	$[0, 1]$
5	Απόσταση θέσης εργασίας από το παράθυρο	0.5 m, 1 m, 3.3 m, 5.5 m
6	Άμεση Ακτινοβολία $I_{dir} \cos\theta_i$	$[0, 613] \text{ W/m}^2$
7	Διάχυτη Ακτινοβολία $I_{dif} / 2$	$[0, 227] \text{ W/m}^2$
8	Ανακλώμενη Ακτινοβολία $I_{glo,hor} \rho_g / 2$	$[0, 294] \text{ W/m}^2$
9	Ολική (κάθετη στο παράθυρο) Ακτινοβολία $I_{glo,vert}$	$[0, 824] \text{ W/m}^2$
Έξοδοι	Περιγραφή	Εύρος τιμών
1	Ένταση φωτισμού, ( $E$ ) με ανοικτές περσίδες	$[0, 4.7] \log_{10}\text{lux}$
2	Ένταση φωτισμού, ( $E_{BL}$ ) με κλειστές περσίδες	$[0, 3.4] \log_{10}\text{lux}$

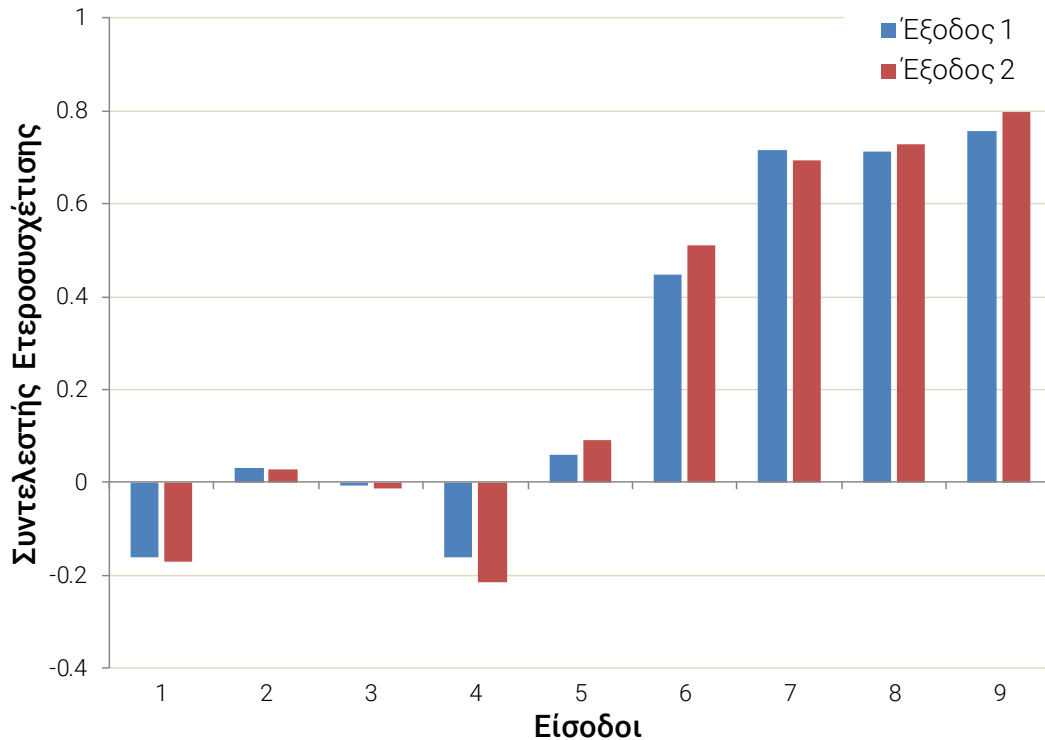
Για να περιγραφεί η ημέρα του έτους χρησιμοποιήθηκαν δύο ημιτονοειδείς μεταβλητές (είσοδοι 1 και 2). Η πρώτη,  $\cos(2\pi n/365)$ , μεγιστοποιείται το χειμώνα, ελαχιστοποιείται το καλοκαίρι και εμφανίζει παρόμοιες (ενδιάμεσες τιμές) το φθινόπωρο και την άνοιξη. Για να διαφοροποιούνται αυτές οι δύο εποχές προστίθεται η δεύτερη είσοδος,  $\sin(2\pi n/365)$ , έτσι ώστε στην κάθε ημέρα του έτους να αντιστοιχίζεται ένα μοναδικό ζεύγος τιμών από τις δύο αυτές εισόδους. Η επιλογή αυτή αποτελεί συνήθη πρακτική σε προβλήματα προσομοιώσεων που παρουσιάζουν εποχικές διαφοροποιήσεις, όπως π.χ. η πρόβλεψη φορτίου.

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, για κάθε ημέρα του έτους προκύπτει μία διαφορετική τιμή της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες και τον προσανατολισμό του γραφείου καθορίζεται μία μοναδική, θεωρητική ημερήσια καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας. Οι τιμές αυτής πρέπει να μειωθούν ανάλογα με την κατάσταση του ουρανού. Για τους παραπάνω λόγους στη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι ο προσανατολισμός (είσοδος 3) και ο δείκτης καθαρότητας ουρανού, όπως ορίστηκε στην Εξίσωση 3.3 (είσοδος 4). Η αύξηση των τιμών του δείκτη αυτού προκαλεί προφανώς αντίστοιχη αύξηση στην εσωτερική ένταση φωτισμού. Το αντίθετο ισχύει για την απόσταση της επιφάνειας εργασίας από το παράθυρο (είσοδος 5).

Οι είσοδοι 6-8 είναι οι τρεις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του παραθύρου, ο υπολογισμός των οποίων για κάθε ώρα της ημέρας παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η άμεση ακτινοβολία (είσοδος 6), η διάχυτη ακτινοβολία (είσοδος 7), η ανακλώμενη ακτινοβολία (είσοδος 8) καθώς και η ολική κάθετη ακτινοβολία (είσοδος 9) χρησιμοποιούνται όλες ως είσοδοι του μοντέλου. Η τιμή κάθε μίας από τις παραπάνω υπολογίστηκε με βάση την ώρα της ημέρας, την ημέρα του έτους, τον προσανατολισμό του γραφείου, την κατάσταση του ουρανού και την ανακλαστικότητα του περιβάλλοντος.

Όπως παρατηρείται, οι είσοδοι δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους καθώς οι τιμές των ακτινοβολιών επηρεάζονται σημαντικά από τις εισόδους 1-4. Επίσης, η άμεση στατιστική σχέση εισόδων-εξόδων στα πρότυπα εκπαίδευσης αποτυπώνεται από τους συντελεστές ετεροσυσχέτισης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-1. Προκύπτει ότι οι έξοδοι συνδέονται εντονότερα με τις συνιστώσες ακτινοβολίας (είσοδοι 6-9) και λιγότερο, όπως αναμενόταν, με τις εισόδους 1, 4 και 5. Πάντως κάθε είσοδος έχει την έμμεση χρησιμότητά της όπως αποδείχτηκε από σειρά δοκιμών, δηλαδή το παραπάνω σύνολο εισόδων βελτιστοποιεί την απόδοση του μοντέλου.

Όσον αφορά στις δύο εξόδους, διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της έντασης φωτισμού παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος τιμών (από 0 έως 50 kLux). Καθώς η απόδοση των ΤΝΔ θεωρείται ότι βελτιώνεται όταν οι είσοδοι-έξοδοι των προτύπων παρουσιάζουν κατανομή κοντά στην κανονική, θεωρήθηκε απαραίτητο να εφαρμοστεί λογαριθμικός μετασχηματισμός στις τιμές των εντάσεων φωτισμού.



Σχήμα 5-1 Συντελεστές ετεροσυσχέτισης εισόδων - εξόδων για το πρώτο μοντέλο πρόβλεψης.

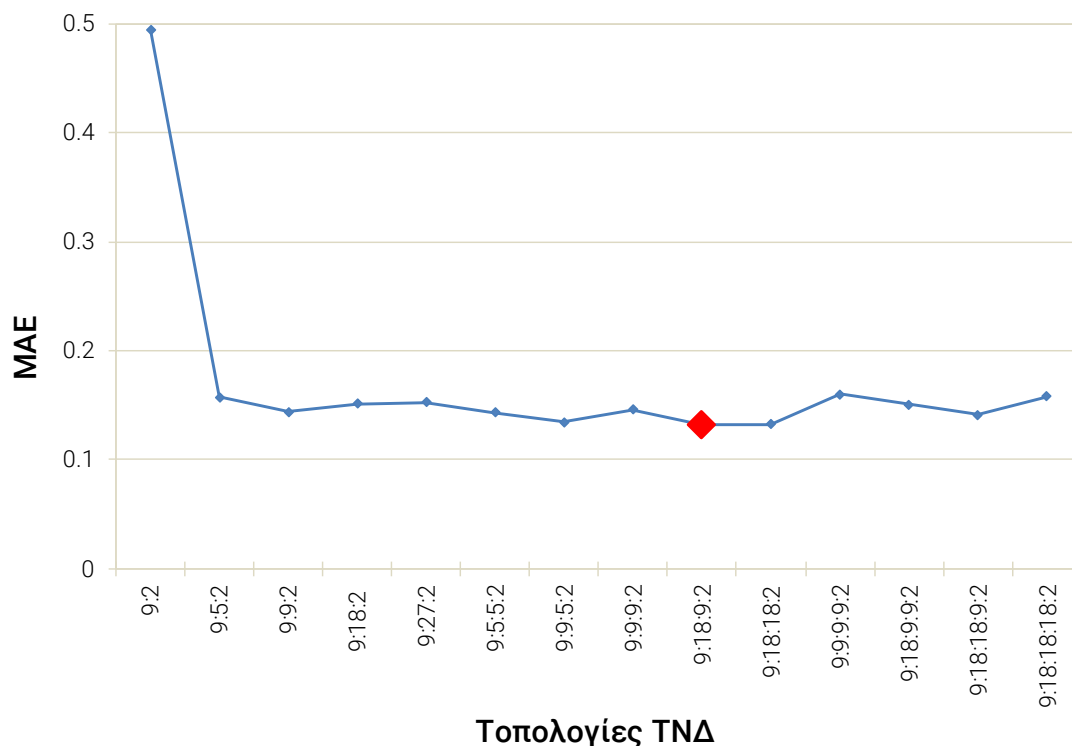
Η βέλτιστη αρχιτεκτονική του ΤΝΔ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: τον αριθμό και τον τύπο των μεταβλητών εισόδων και εξόδων, τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ τους, το μέγεθος του συνόλου των δεδομένων κλπ. Καθώς στο μοντέλο της παρούσας διατριβής ενσωματώθηκε μία μεγάλη ποικιλία μεγεθών στις εισόδους (δείκτες, αποστάσεις, ακτινοβολίες) και στις εξόδους (εντάσεις φωτισμού), δεν εμφανίζεται ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ τους και επομένως η ύπαρξη ενός τουλάχιστον κρυφού στρώματος αποδείχτηκε απαραίτητη (Σχήμα 5-2). Ως κριτήριο για την απόδοση του μοντέλου χρησιμοποιείται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα – MAE (Mean Absolute Error, MAE) το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$MAE = \frac{1}{N_{val}} \sum_{i=1}^{N_{val}} \frac{|E_{real} - E_{forec}| + |E_{BLreal} - E_{BLforec}|}{2} \quad (5.1)$$

όπου  $N_{val}$  είναι ο αριθμός των προτύπων του συνόλου επαλήθευσης (validation set). Υπενθυμίζεται ότι το μοντέλο έχει δύο εξόδους και το υπολογιζόμενο MAE αναφέρεται στο μέσο σφάλμα των δύο προβλέψεων ανά πρότυπο.

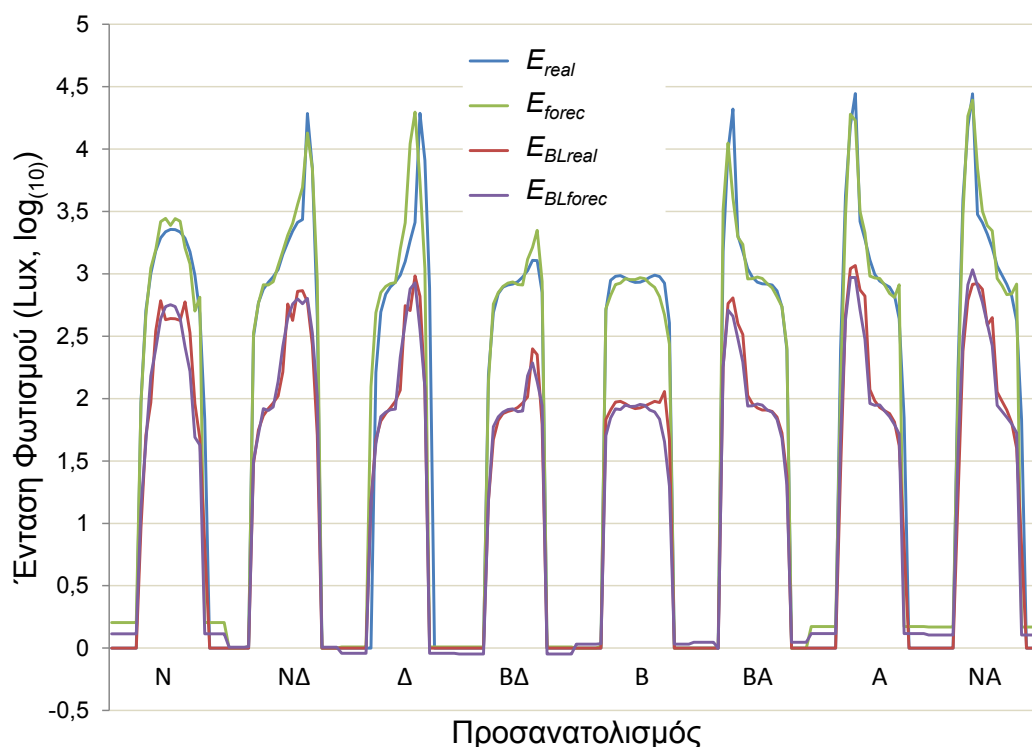
Σε γενικές γραμμές, το κρυφό στρώμα έχει τη δυνατότητα να φιλτράρει και να κατηγοριοποιεί τα σήματα εισόδου ενώ παράλληλα πολλαπλασιάζει την υπολογιστική δυνατότητα του δικτύου που μπορεί πλέον να προσομοιώνει επιτυχώς μεγάλο αριθμό προτύπων συμπεριλαμβανομένων σπάνιων και ακραίων περιπτώσεων. Ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων του κρυφού στρώματος καθώς και η πιθανή προσθήκη ενός δεύτερου ή

τρίτου κρυφού στρώματος προσδιορίστηκε μέσω δοκιμών. Όπως προέκυψε, η προσθήκη ενός δεύτερου κρυφού στρώματος επέφερε μία αισθητή βελτίωση του σφάλματος πρόβλεψης (8%). Ωστόσο, όταν προστέθηκε και ένα τρίτο κρυφό στρώμα δεν υπήρξε περαιτέρω βελτίωση. Η βέλτιστη λοιπόν τοπολογία του ΤΝΔ για το Μοντέλο 1 βρέθηκε ότι είναι η 9:18:9:2, δηλαδή 9 είσοδοι, 18 νευρώνες στο πρώτο κρυφό στρώμα, 9 νευρώνες στο δεύτερο κρυφό στρώμα και 2 νευρώνες στο στρώμα εξόδου.



Σχήμα 5-2 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (για λογαριθμικές τιμές έντασης φωτισμού) για διαφορετικές τοπολογίες του ΤΝΔ - πρώτο Μοντέλο.

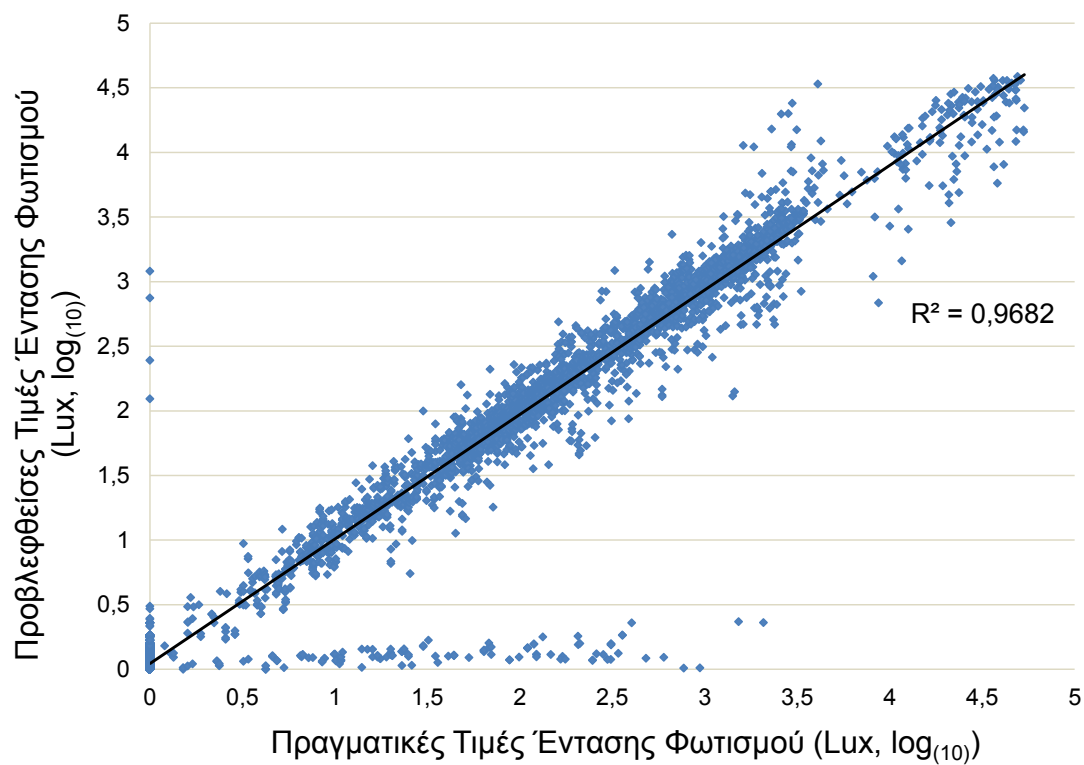
Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα πρόβλεψης του Μοντέλου 1 για μία ποικιλία διαφορετικών συνθηκών. Περιλαμβάνονται οκτώ πραγματικές ημερήσιες καμπύλες έντασης φωτισμού με ανοιχτές ή κλειστές περσίδες (προσομοιώσεις ή πραγματικές μετρήσεις) και οι αντίστοιχες προβλέψεις τους. Τα δεδομένα αφορούν στην ίδια ημέρα, με συνθήκες καθαρού ουρανού, απόσταση 1 m από το παράθυρο και οκτώ διαφορετικούς προσανατολισμούς γραφείου. Παρατηρούνται οι διαφοροποιήσεις του ημερήσιου προφίλ ανάλογα με τον προσανατολισμό, καθώς και το γεγονός πως το μοντέλο παράγει μία ικανοποιητική πρόβλεψη σε κάθε περίπτωση.



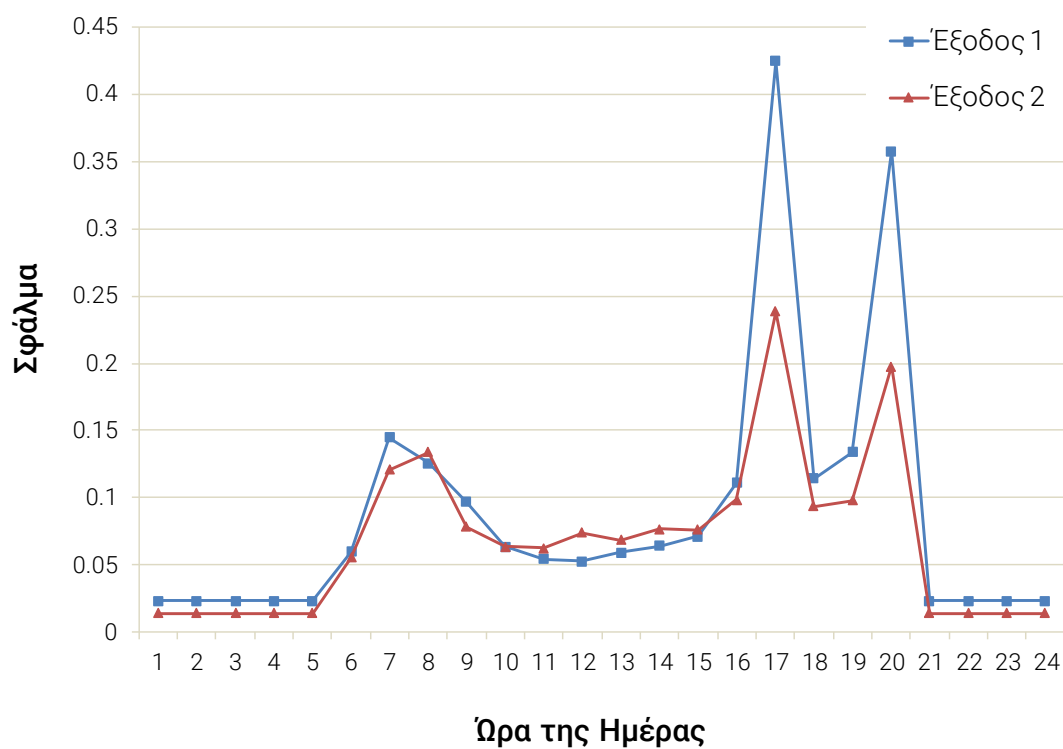
Σχήμα 5-3 Ημερήσιες πραγματικές και προβλεφθείσες τιμές έντασης φωτισμού με ανοικτές περιόδους ( $E$ ), και με κλειστές περιόδους ( $E_{BL}$ ), για 8 προσανατολισμούς.

Η συνολική δυνατότητα του Μοντέλου 1 να ενσωματώνει μία μεγάλη ποικιλία περιπτώσεων αποτυπώνεται στο διάγραμμα διασποράς του Σχήματος 5-4. Σε αυτό παρουσιάζονται όλες οι προβλέψεις της εξόδου 1 (4096 ωριαίες τιμές), έναντι των πραγματικών τιμών. Σημειώνεται επίσης ο Δείκτης Συσχέτισης (R-squared coefficient –  $R^2$ ) μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών.

Στο Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται το ημερήσιο προφίλ του σφάλματος για τις δύο εξόδους του μοντέλου ( $E$  και  $E_{BL}$ ), δηλαδή το μέσο σφάλμα πρόβλεψης για κάθε ώρα της ημέρας. Πρέπει να επισημανθεί ότι η καμπύλη αυτή προκύπτει από το σύνολο των προτύπων, περιλαμβάνει δηλαδή δείγματα από όλους προσανατολισμούς, τις εποχές του έτους, τις αποστάσεις από τα παράθυρα κλπ. Στο γράφημα αυτό μας ενδιαφέρει κυρίως η μορφή των καμπυλών και όχι οι ακριβείς τιμές, καθώς αυτές αφορούν στο μέσο απόλυτο σφάλμα της  $E$  και  $E_{BL}$  σε λογαριθμικές τιμές, και δεν μπορούν εύκολα να αντιστοιχηθούν σε πραγματικό σφάλμα σε Lux. Όπως φαίνεται, τα μεγαλύτερα σφάλματα εμφανίζονται κατά τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου, πιθανότατα λόγω του ωριαίου βήματος της πρόβλεψης και των γρήγορων μεταβολών και ακραίων τιμών της έντασης φωτισμού.



Σχήμα 5-4 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των προβλέψεων έντασης φωτισμού του πρώτου μοντέλου και των αντίστοιχων πραγματικών τιμών.

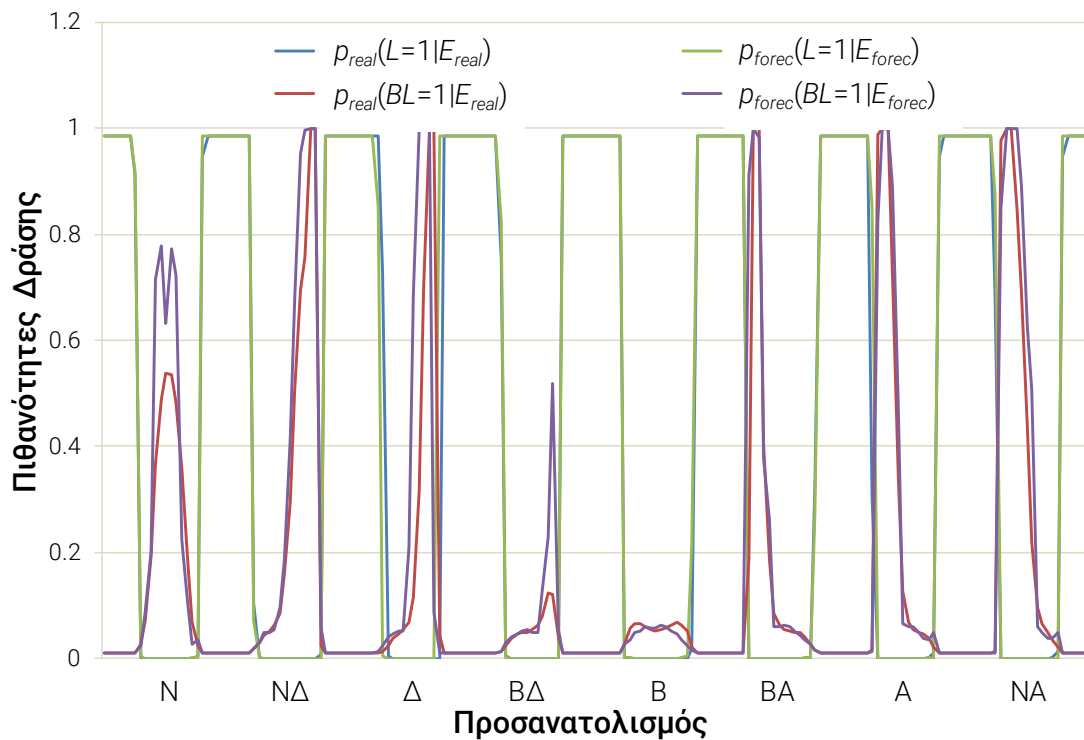


Σχήμα 5-5 Μέσο Ημερήσιο προφίλ σφάλματος για τις δύο εξόδους ( $E$  και  $E_{BL}$ ) του πρώτου μοντέλου πρόβλεψης.

Οι παραπάνω τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού (πραγματικές ή προβλέψεις) μπορούν να μετασχηματιστούν σε πιθανές δράσεις των χρηστών μέσω των Εξισώσεων 4.1-4.3, που

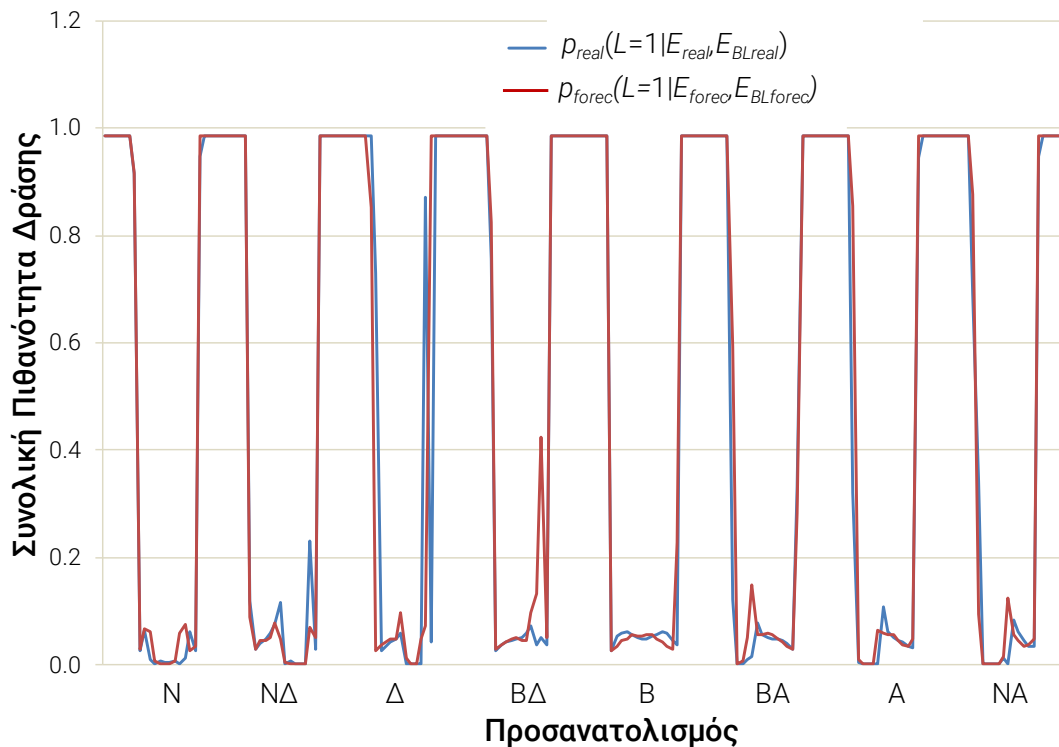


υπολογίζουν την πιθανότητα που έχει ο κάθε χρήστης να ανοίξει τον τεχνητό φωτισμό ή να κλείσει τις περσίδες. Αναλυτικότερα μέσω της πραγματικής τιμής  $E_{real}$  και της αντίστοιχης πρόβλεψης  $E_{forec}$  υπολογίζονται οι  $p_{real}(L=1|E_{real})$ ,  $p_{real}(BL=1|E_{real})$ ,  $p_{forec}(L=1|E_{forec})$ ,  $p_{forec}(BL=1|E_{forec})$  και τα δύο αντίστοιχα σφάλματα πρόβλεψης, ενώ μέσω της πραγματικής τιμής της  $E_{BLreal}$  και της αντίστοιχης πρόβλεψης  $E_{BLforec}$  υπολογίζονται οι πιθανότητες  $p_{real}(L=1|E_{BLreal})$  και  $p_{forec}(L=1|E_{BLforec})$ . Ένα παράδειγμα τέτοιων υπολογισμών φαίνεται στο Σχήμα 5-6. Σε αυτό παρουσιάζονται η  $p_{real}(L=1|E_{real})$  και η  $p_{forec}(L=1|E_{forec})$ , καθώς και οι  $p_{real}(BL=1|E_{real})$  και  $p_{forec}(BL=1|E_{forec})$  για τις εντάσεις φωτισμού που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 5-3 για διάφορους προσανατολισμούς. Παρατηρείται ότι τις περισσότερες ώρες το σφάλμα είναι μηδενικό. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα μεγάλο μέρος των εντάσεων φωτισμού που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 5-3 βρίσκεται εκτός της ζώνης κατωφλίου της καμπύλης συμπεριφοράς του χρήστη, δηλαδή η πιθανότητα δράσης είναι 0 ή 1. Έτσι η όποια απόκλιση στην πρόβλεψη εντάσεων φωτισμού δεν μεταφράζεται σε διαφορετικό αποτέλεσμα όσον αφορά στο χειρισμό του τεχνητού φωτισμού ή των περσίδων.



Σχήμα 5-6 Παράδειγμα μετασχηματισμού των πραγματικών και των προβλεφθεισών τιμών έντασης φωτισμού του Σχήματος 5-3 σε πιθανότητες δράσης.

Με βάση την Εξίσωση 4.4 υπολογίζεται τελικά και η συνολική πιθανότητα ανοίγματος του τεχνητού φωτισμού (με ή χωρίς περσίδες). Η πιθανότητα αυτή εμπεριέχει και τις τρεις επιμέρους πιθανότητες δράσεων που αναφέρθηκαν προηγούμενα και συνδέεται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στην παράγραφο 5.3. Στο Σχήμα 5-7 δίνονται οι αντίστοιχες  $p_{real}(L=1|E_{real}, E_{BLreal})$  και  $p_{forec}(L=1|E_{forec}, E_{BLforec})$  για την πραγματική και την προβλεφθείσα ένταση φωτισμού του Σχήματος 5-3.



Σχήμα 5-7 Παράδειγμα μετασχηματισμού των πραγματικών και των προβλεφθεισών τιμών έντασης φωτισμού του Σχήματος 5-3 στη συνολική πιθανότητα χρήσης του τεχνητού φωτισμού (με ανοικτές ή κλειστές περιόδους).

Στον Πίνακα 5-2 δίνεται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα μεταξύ των πραγματικών πιθανοτήτων δράσεων του κάθε χρήστη και των αντίστοιχων προβλέψεων.

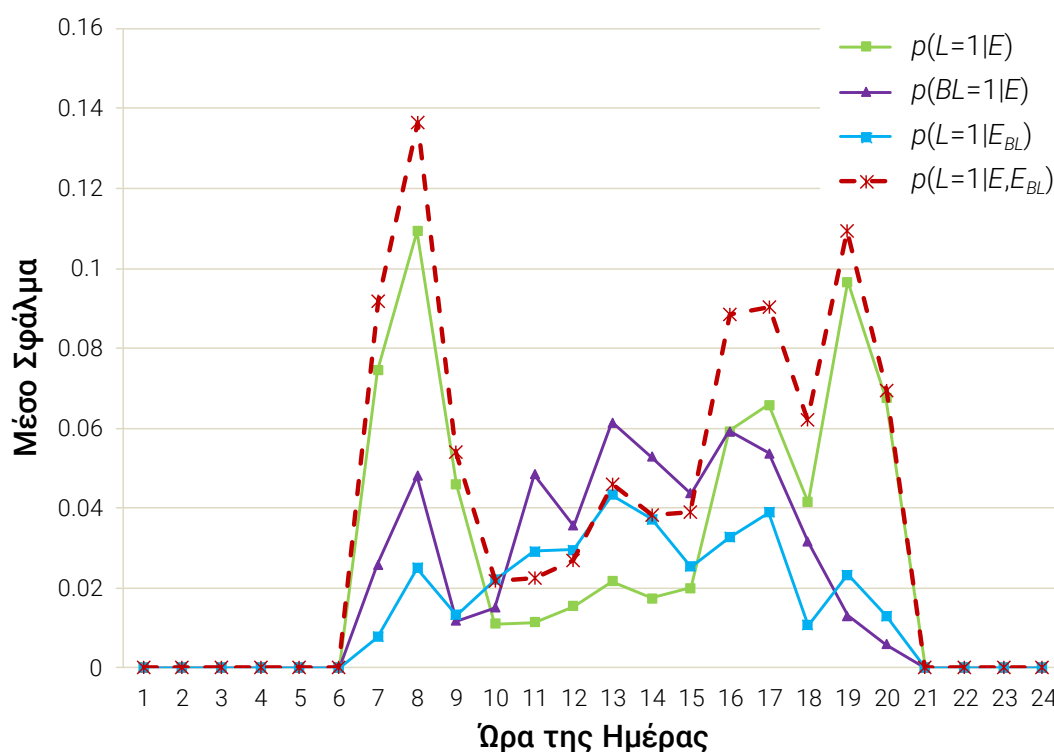
Πίνακας 5-2 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα του πρώτου μοντέλου στην πρόβλεψη των πιθανοτήτων δράσεων των τριών Χρηστών.

Πιθανότητα Δράσης	Μέσο Απόλυτο Σφάλμα του Μοντέλου 1		
	Χρήστης 1	Χρήστης 2	Χρήστης 3
$p(L=1 E)$	0.0273	0.0279	0.0263
$p(BL=1 E)$	0.0210	0.0235	0.0150
$p(L=1 E_{BL})$	0.0146	0.0182	0.0082
$p(L=1 E, E_{BL})$	0.0373	0.0423	0.0326

Το προτεινόμενο μοντέλο πρέπει να αξιολογηθεί με βάση τα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα, εφόσον στοχεύει στην πρόβλεψη των δράσεων του κάθε χρήστη. Όπως φαίνεται, το μοντέλο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για όλες τις μελετώμενες περιπτώσεις, με το σφάλμα στην συνολική πιθανότητα ανοίγματος του τεχνητού φωτισμού  $p(L=1|E, E_{BL})$ , να κυμαίνεται από 3.2 έως 4.2% για τους τρεις χρήστες. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό υπολογίζεται συνολικά για όλα τα ωριαία πρότυπα του συνόλου δεδομένων που περιλαμβάνει όλους τους

προσανατολισμούς, διαφορετικές αποστάσεις της θέσης εργασίας από τα παράθυρα, καλύπτει όλες τις εποχές και τις πιθανές καταστάσεις ουρανού και είναι ανεξάρτητο από τις πραγματικές ώρες παρουσίας των χρηστών στο χώρο.

Ενδεικτικά, το ημερήσιο προφίλ του σφάλματος για τον Χρήστη 1 παρουσιάζεται για κάθε μία από τις τέσσερις πιθανότητες του Πίνακα 5-2 στο Σχήμα 5-8. Σε αυτό, όπως και στο Σχήμα 5-5, φαίνεται ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα πρόβλεψης του  $p(L=1|E)$  εμφανίζονται κατά τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου, ενώ αντίστοιχα τα σφάλματα των  $p(BL=1|E)$  και  $p(L=1|E_{BL})$  που συνδέονται με το κλείσιμο των περσίδων μεγιστοποιούνται το μεσημέρι.



Σχήμα 5-8 Μέσο ημερήσιο προφίλ σφάλματος για τις πιθανότητες δράσεων του Χρήστη 1 – πρώτο μοντέλο.

Πρέπει να επισημανθεί ότι το σφάλμα της  $p(L=1|E, E_{BL})$  που συνδέεται με την πρόβλεψη κατανάλωσης φωτισμού ανά ώρα είναι άλλοτε θετικό (υπερεκτίμηση) κι άλλοτε αρνητικό (υποεκτίμηση). Ωστόσο, η συνολική ημερήσια ή ετήσια κατανάλωση (σε kWh) εκτιμάται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για παράδειγμα, αν εξάγουμε τη συνολική κατανάλωση με βάση τις πραγματικές πιθανότητες από όλα τα πρότυπα του συνόλου επαλήθευσης και αυτήν που προκύπτει από τις προβλέψεις, η απόκλιση μεταξύ τους είναι σχεδόν μηδενική (0.07%).

## 5.2 Δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης

Στο δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης θεωρείται ότι οι τρεις πιθανότητες δράσης  $p(L=1|E)$ ,  $p(BL=1|E)$  και  $p(L=1|E_{BL})$  θα μπορούσαν να εκτιμηθούν απευθείας από ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο που θα εκπαιδευτεί με τα κατάλληλα δεδομένα. Το μοντέλο αυτό έχει παρόμοια δομή

με το Μοντέλο 1, επομένως χρησιμοποιεί τις ίδιες 9 εισόδους όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-3. Ωστόσο έχει διαφορετικές εξόδους, οι οποίες τώρα είναι τρεις και αντιστοιχούν στις τρεις προαναφερθείσες πιθανότητες ανά χρήστη.

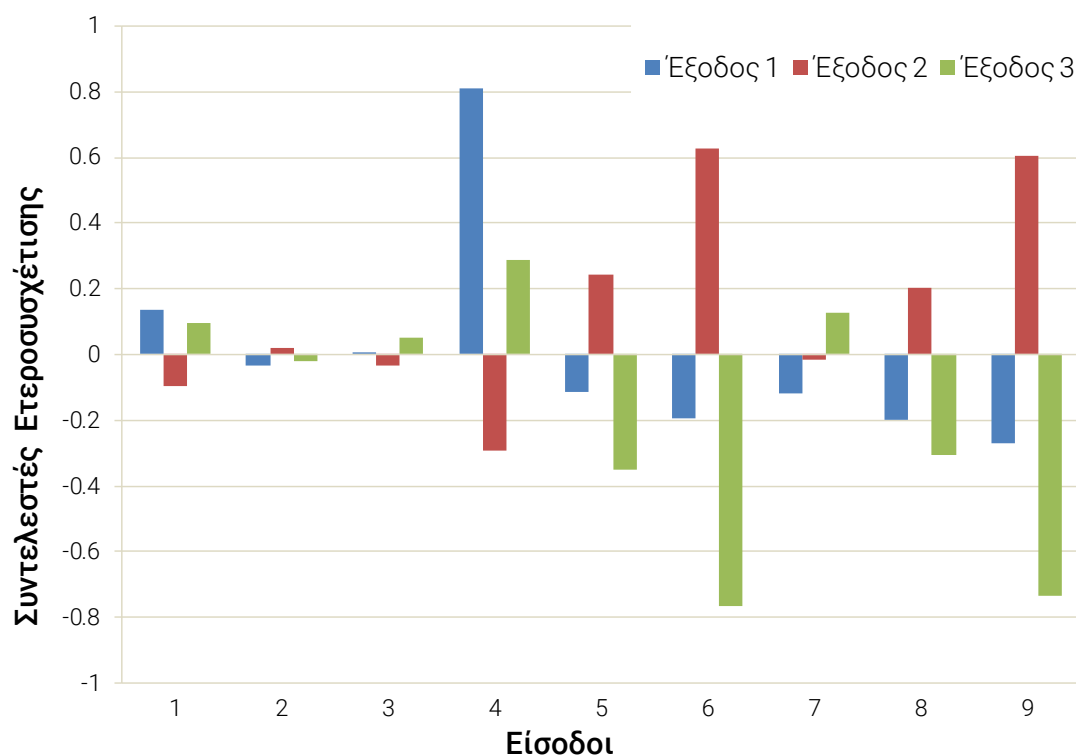
Συγκεκριμένα, ακολουθείται τρεις φορές η ίδια διαδικασία. Διαμορφώνονται πρότυπα και πραγματοποιείται εκπαίδευση-επαλήθευση και ενθύμηση χωριστά για κάθε χρήστη. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα πρότυπα κάθε συνόλου σε αυτές τις τρεις διαδικασίες να είναι αντίστοιχα μεταξύ τους καθώς και με αυτά του πρώτου μοντέλου, δηλαδή να έχουν ακριβώς τα ίδια διανύσματα εισόδων αλλά διαφορετικές εξόδους ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων.

Πίνακας 5-3 Είσοδοι και Έξοδοι του δεύτερου μοντέλου πρόβλεψης.

Είσοδοι	Περιγραφή	Εύρος τιμών
1-2	Δείκτες της ημέρας του έτους, $\cos(2\pi n/365)$ , $\sin(2\pi n/365)$ , $n = 1, 2, \dots, 365$	$[-1, 1]$
3	Προσανατολισμός (rad) (0 για Νότιο, $\pi$ για Βόρειο)	$[0, 2\pi)$
4	Δείκτης καθαρότητας ουρανού $k_t$	$[0, 1]$
5	Απόσταση θέσης εργασίας από το παράθυρο	0.5 m, 1 m, 3.3 m, 5.5 m
6	Άμεση Ακτινοβολία $I_{dir} \cos\theta_i$	$[0, 613] \text{ W/m}^2$
7	Διάχυτη Ακτινοβολία $I_{dif} / 2$	$[0, 227] \text{ W/m}^2$
8	Ανακλώμενη Ακτινοβολία $I_{glo,hor} \rho_g / 2$	$[0, 294] \text{ W/m}^2$
9	Ολική (κάθετη στο παράθυρο) Ακτινοβολία $I_{glo,vert}$	$[0, 824] \text{ W/m}^2$
Έξοδοι	Περιγραφή	Εύρος τιμών
1	Πιθανότητα ενεργοποίησης του τεχνητού φωτισμού (με ανοικτές περσίδες) $p(L=1 E)$	$[0, 1]$
2	Πιθανότητα κλεισίματος των περσίδων $p(BL=1 E)$	$[0, 1]$
3	Πιθανότητα ενεργοποίησης του τεχνητού φωτισμού (με κλειστές περσίδες) $p(L=1 E_{BL})$	$[0, 1]$

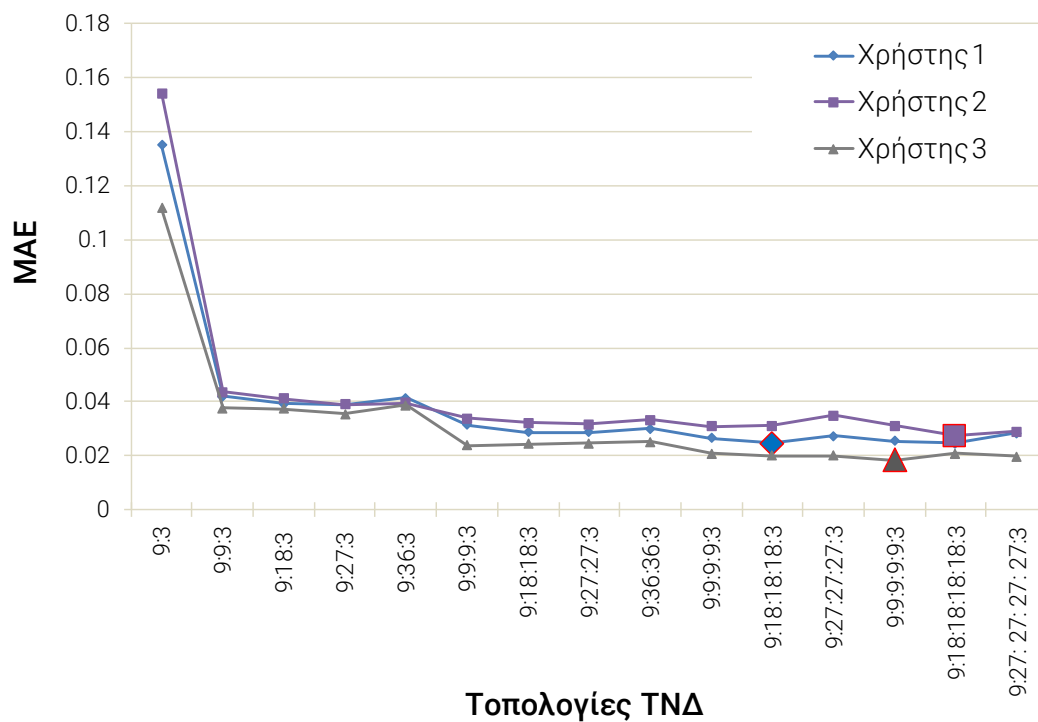
Η άμεση στατιστική σχέση εισόδων-εξόδων στα πρότυπα εκπαίδευσης μελετήθηκε και πάλι μέσω των συντελεστών ετεροσυσχέτισης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-9. Φαίνεται ότι η  $p(BL=1|E)$ , δηλαδή η πιθανότητα να κλείσουν οι περσίδες, συνδέεται κυρίως με την άμεση και την ολική ακτινοβολία και δευτερευόντως με την ανακλώμενη ακτινοβολία και την απόσταση από τα παράθυρα. Αντίθετα η  $p(L=1|E)$ , δηλαδή η πιθανότητα να ενεργοποιηθεί ο

τεχνητός φωτισμός, συνδέεται κυρίως με την απόσταση από τα παράθυρα και λιγότερο με τις συνιστώσες της ακτινοβολίας. Τέλος, στην  $p(L=1|E_{BL})$ , δηλαδή την πιθανότητα να ενεργοποιηθεί ο τεχνητός φωτισμός με κλειστές περσίδες ισχύει το αντίθετο. Υπάρχει δηλαδή στην περίπτωση αυτή μεγαλύτερη συσχέτιση με τις συνιστώσες ακτινοβολίας παρά με την απόσταση από τα παράθυρα.



Σχήμα 5-9 Συντελεστές ετεροσυσχέτισης εισόδων - εξόδων για το δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης.

Όπως έγινε στο πρώτο μοντέλο ΤΝΔ, αναζητήθηκε και στο δεύτερο μοντέλο η βέλτιστη δομή του για την εφαρμογή της πρόβλεψης σε κάθε χρήστη. Στο Σχήμα 5-10 παρουσιάζεται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα για κάθε τοπολογία ΤΝΔ ξεχωριστά για κάθε χρήστη. Όπως προέκυψε, υπάρχουν κάποιες διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των τριών χρηστών, αλλά σε γενικές γραμμές την καλύτερη απόδοση εμφανίζουν τα ΤΝΔ με τρία ή τέσσερα κρυφά στρώματα. Ωστόσο, ορισμένες φορές μία μικρή βελτίωση στην πρόβλεψη επιτυγχάνεται με μία δυσανάλογη αύξηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου και του υπολογιστικού χρόνου.



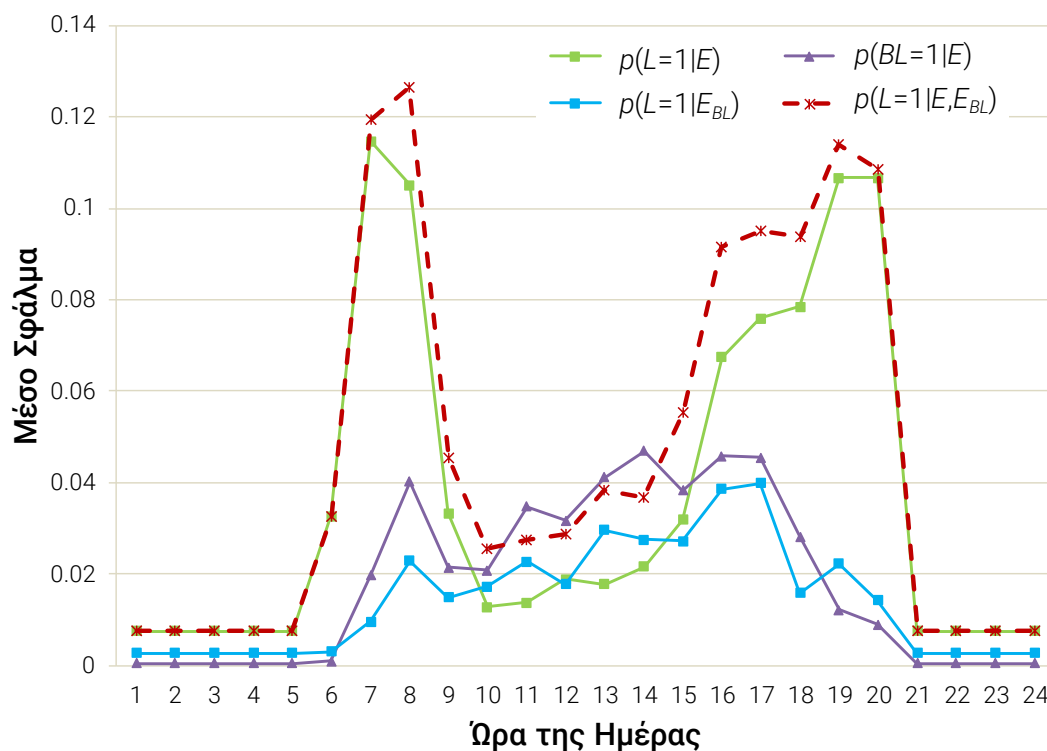
Σχήμα 5-10 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα για διαφορετικές τοπολογίες ΤΝΔ για κάθε Χρήστη - δεύτερο Μοντέλο.

Στον Πίνακα 5-4 δίνεται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα μεταξύ των πραγματικών πιθανοτήτων δράσεων του κάθε χρήστη και των αντίστοιχων προβλέψεων. Το Μοντέλο είναι αξιόπιστο με σφάλματα της τάξης του 0.8-3.8%. Είναι σαφές ότι η πρόβλεψη είναι πιο επιτυχημένη για τις Εξόδους 2 & 3 καθώς, όπως έδειξαν και οι συντελεστές ετεροσυσχέτισης του Σχήματος 5-9, σε αυτές υπάρχει σαφέστερη σχέση με τις εισόδους του ΤΝΔ. Όσον αφορά στις Εξόδους αυτές, το Μοντέλο 2 είναι πιο ακριβές από το Μοντέλο 1 (βλ. Πίνακα 5-2). Ωστόσο, το Μοντέλο 1 υπερέρχει γενικώς τόσο στην πρόβλεψη της Εξόδου 1 όσο και στην συνολική πιθανότητα  $p(L=1|E, E_{BL})$ , πετυχαίνοντας μικρότερο σφάλμα κατά ποσοστό 25-30% και για τους τρεις Χρήστες. Αυτό αποδεικνύει ότι το ΤΝΔ αντιλαμβάνεται και αξιοποιεί καλύτερα την άμεση σχέση ακτινοβολίας-έντασης φωτισμού και έτσι η πρόβλεψη της έντασης φωτισμού ως ενδιάμεσο βήμα αποτελεί την πλέον αποδοτική προσέγγιση.

Πίνακας 5-4 Μέσο Απόλυτο Σφάλμα του δεύτερου μοντέλου στην πρόβλεψη των πιθανοτήτων δράσεων των τριών Χρηστών.

Πιθανότητα Δράσης	Μέσο Απόλυτο Σφάλμα του Μοντέλου 2		
	Χρήστης 1	Χρήστης 2	Χρήστης 3
$p(L=1 E)$	0.0376	0.0394	0.0344
$p(BL=1 E)$	0.0183	0.0227	0.0101
$p(L=1 E_{BL})$	0.0144	0.0172	0.0080
$p(L=1 E, E_{BL})$	0.0461	0.0514	0.0411

Ενδεικτικά, το ημερήσιο προφίλ του σφάλματος για τον Χρήστη 1, για κάθε μία από τις τέσσερις πιθανότητες του Πίνακα 5-4 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11. Σε αυτό, όπως και στο Σχήμα 5-5, φαίνεται ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα πρόβλεψης του  $p(L=1|E)$  εμφανίζονται τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου ενώ αντίστοιχα τα σφάλματα των  $p(BL=1|E)$  και  $p(L=1|E_{BL})$  που συνδέονται με το κλείσιμο των περσίδων μεγιστοποιούνται το μεσημέρι.



Σχήμα 5-11 Μέσο ημερήσιο προφίλ σφάλματος για τις πιθανότητες δράσεων του Χρήστη 1 - δεύτερο μοντέλο.

### 5.3 Εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης για εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης. Το πρώτο μοντέλο μπορεί να προβλέψει τη ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, ενώ το δεύτερο μπορεί να εκτιμήσει απευθείας την πιθανότητα δράσης του χρήστη. Όπως αποδείχτηκε, το Μοντέλο 1 υπερτερεί καθώς:

α) υπολογίζει τις ωριαίες τιμές της εσωτερικής έντασης φωτισμού, οι οποίες μπορεί να χρησιμεύσουν και σε άλλες εφαρμογές του σχεδιασμού και της διαχείρισης φωτισμού,

β) προβλέπει τις πιθανότητες δράσης του χρήστη με μεγαλύτερη ακρίβεια από το Μοντέλο 2, και

γ) μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια την συνολική κατανάλωση φωτισμού για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (π.χ. μήνα ή έτους),

Με βάση τα παραπάνω, το εκπαιδευμένο Μοντέλο 1 θα χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετα για να διερευνηθεί πώς συνδέεται η καμπύλη συμπεριφοράς κάθε χρήστη με την συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια για φωτισμό ενός γραφείου. Συγκεκριμένα, θα εκτελέσει μία ετήσια προσομοίωση με ωριαίο βήμα για τους τρεις χρήστες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, οι καμπύλες συμπεριφοράς των οποίων φαίνονται στα Σχήματα 4-6 και 4-7.

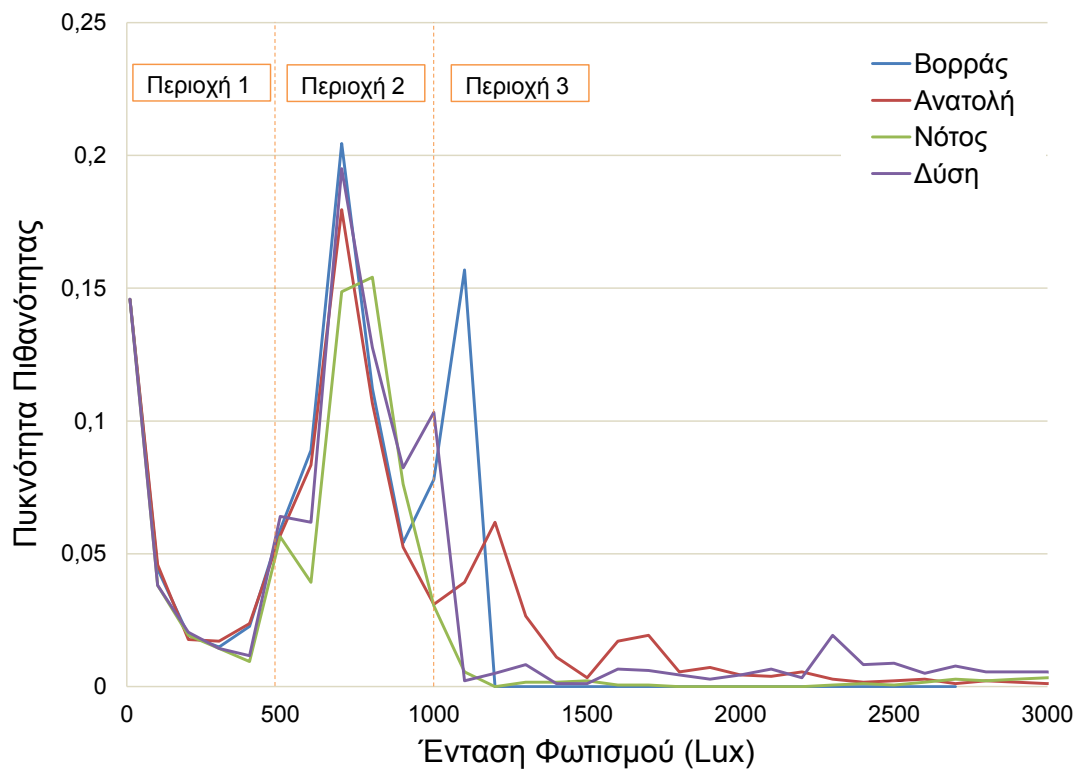
Για την προσομοίωση αυτή αξιοποιήθηκε η βάση δεδομένων EnergyPlus [134] που περιέχει μετεωρολογικά δεδομένα για τυπικά έτη για διάφορες πόλεις του κόσμου. Χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές για την πόλη της Θεσσαλονίκης και εξήχθησαν 8760 τιμές για την κατάσταση του ουρανού (είσοδος 4). Οι τιμές των εισόδων 6-9 (συνιστώσες ακτινοβολίας) υπολογίστηκαν όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 ανάλογα με τον προσανατολισμό και η είσοδος 5 (απόσταση θέσης εργασίας από το παράθυρο) λήφθηκε ίση με 1m.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν τα διανύσματα εισόδου για τα πρότυπα ενθύμησης (testing data) για ένα πλήρες έτος. Στη συνέχεια, το εκπαιδευμένο Μοντέλο 1 προέβλεψε για κάθε πρότυπο τις αντίστοιχες εξόδους ( $E, E_{BL}$ ) και στην συνέχεια υπολογίστηκε η συνολική πιθανότητα ενεργοποίησης του τεχνητού φωτισμού  $p(L=1|E, E_{BL})$  για κάθε χρήστη. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις ετήσιες προσομοιώσεις, μία για κάθε προσανατολισμό γραφείου (Βόρειο, Ανατολικό, Νότιο, Δυτικό).

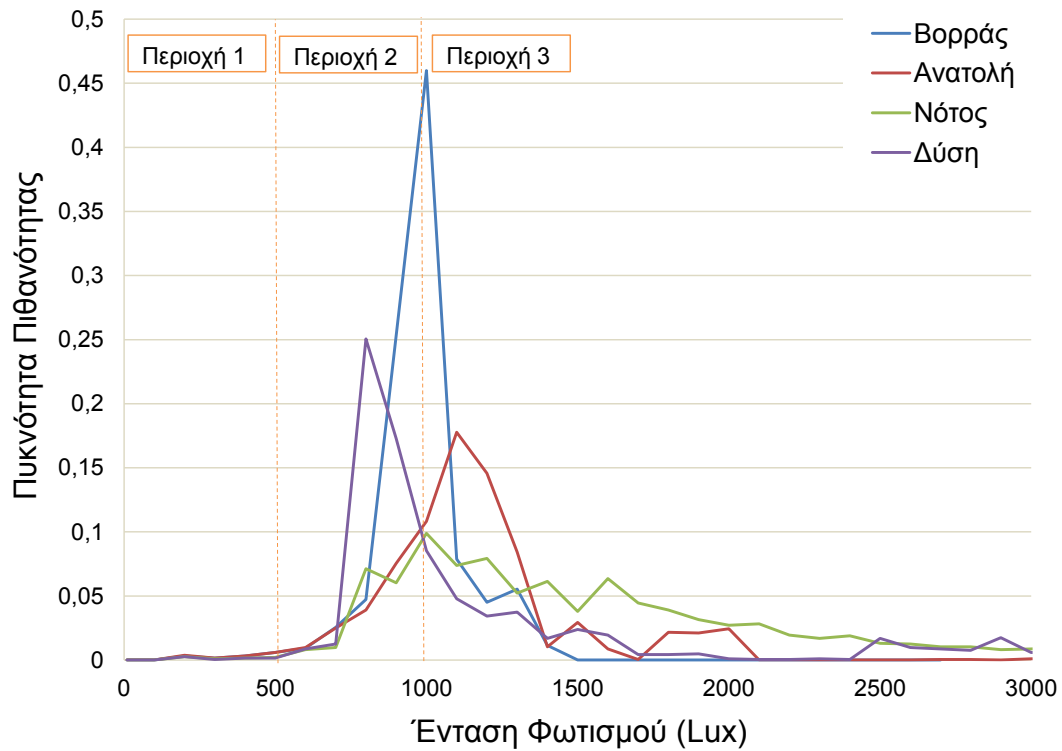
Η κατανομή των τιμών έντασης φωτισμού  $E$  που παρήχθησαν από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στα Σχήματα 5-12 και 5-13. Το έτος χωρίστηκε σε δύο εξάμηνα, «Χειμώνας» (Οκτώβριος-Μάρτιος) και «Καλοκαίρι» (Απρίλιος-Σεπτέμβριος), ώστε να φανεί καλύτερα η επίδραση του φυσικού φωτός. Επίσης υιοθετήθηκε ένα ρεαλιστικό ωράριο



πενθήμερης εργασίας από τις 8:00 ως τις 18:00. Στα Σχήματα αυτά οι κάθετες διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν τρεις ξεχωριστές περιοχές τιμών έντασης φωτισμού. Στην Περιοχή 1 (0-500 Lux) ο χρήστης πιθανότατα θα χρησιμοποιήσει τον τεχνητό φωτισμό. Η Περιοχή 2 (500-1000 Lux) αντιπροσωπεύει την ζώνη άνεσης του χρήστη ενώ η Περιοχή 3 (πάνω από 1000 Lux) είναι αυτή όπου ο χρήστης είναι πιθανό να κλείσει τις περσίδες και λόγω της μείωσης της έντασης φωτισμού ενδεχομένως να χρειαστεί φωτισμό.



Σχήμα 5-12 Κατανομή τιμών έντασης φωτισμού για το Χειμερινό Εξάμηνο ανά προσανατολισμό γραφείου. Επισημαίνεται ότι το 24% των τιμών για το Νότιο προσανατολισμό βρίσκεται πάνω από τα 3000 Lux.



Σχήμα 5-13 Κατανομή τιμών έντασης φωτισμού για το Καλοκαιρινό Εξάμηνο ανά προσανατολισμό γραφείου. Επισημαίνεται ότι το 20% των τιμών για τον Ανατολικό, το 20% για το Δυτικό και το 9% για τον Νότιο προσανατολισμό βρίσκονται πάνω από τα 3000 Lux.

Για κάθε πρότυπο υπολογίστηκε η συνολική πιθανότητα ενεργοποίησης του τεχνητού φωτισμού  $p(L=1|E, E_{BL})$  για κάθε χρήστη, με βάση τις προβλεφθείσες τιμές  $E$  και  $E_{BL}$ . Αν θεωρηθεί ότι η εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού του γραφείου είναι  $P_{inst,j}$  (W), η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια  $E_{ij}$  μπορεί να υπολογιστεί μέσω της Εξίσωσης 5.2.

$$E_{ij} = P_{inst,j} \cdot \sum_{k=1}^M p_{Lon,tot,j,k} \quad (5.2)$$

όπου:  $i$  είναι ο χρήστης,  $j$  είναι ο προσανατολισμός του γραφείου,  $k$  είναι το ωριαίο βήμα και  $M$  είναι ο συνολικός αριθμός των ωρών εργασίας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση υιοθετήθηκε για όλους τους χρήστες το ίδιο ρεαλιστικό ωράριο πενήνήμερης εργασίας από τις 8:00 ως τις 18:00. Επίσης, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτιστικών σωμάτων θεωρήθηκε 1ru για κάθε χρήστη για λόγους σύγκρισης. Για κάθε έναν από τους τρεις χρήστες υπολογίστηκε η συνολική ετήσια κατανάλωση σε ru-hours ανάλογα με τον προσανατολισμό του γραφείου (Βόρειο, Ανατολικό, Νότιο, Δυτικό). Στον Πίνακα 5-5 η κατανάλωση αυτή παρουσιάζεται ανά εξάμηνο (Χειμώνας, Καλοκαίρι) για να αναδειχθεί η επίδραση του εποχικού στοιχείου.

Πίνακας 5-5 Εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό ανά εποχή και προσανατολισμό για τους τρεις Χρήστες.

Προσανατολισμός Γραφείου	Κατανάλωση Ενέργειας για Φωτισμό (pu-hours/εξάμηνο)					
	Χρήστης 1		Χρήστης 2		Χρήστης 3	
	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Χειμώνας	Καλοκαίρι
Βόρειος	268.3	26.4	270.7	58.4	310.4	9.9
Ανατολικός	284.9	47.2	296.7	92.3	319.6	45.7
Νότιος	268.5	78.6	254.3	117.4	321.0	23.1
Δυτικός	270.3	27.9	265.8	42.4	297.9	17.3

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5-5 μπορούν να ερμηνευθούν με τη βοήθεια των Σχημάτων 5-12 και 5-13. Όπως φαίνεται, η κατανάλωση κατά το θερινό εξάμηνο είναι πάντα μικρότερη σε σχέση με το χειμερινό (από 2 έως 30 φορές ανάλογα με την περίπτωση). Ο Χρήστης 3 είναι αυτός που εμφανίζει την υψηλότερη κατανάλωση κατά το Χειμερινό εξάμηνο, αφού χρησιμοποιεί περισσότερο τον τεχνητό φωτισμό (Σχήμα 4-6). Ο Χρήστης 2 εμφανίζει την μεγαλύτερη κατανάλωση κατά το θερινό εξάμηνο, αφού είναι ο πρώτος που κλείνει τις περσίδες και στη συνέχεια πιθανώς ανοίγει τα φώτα. (Σχήμα 4-6 και Σχήμα 4-7).

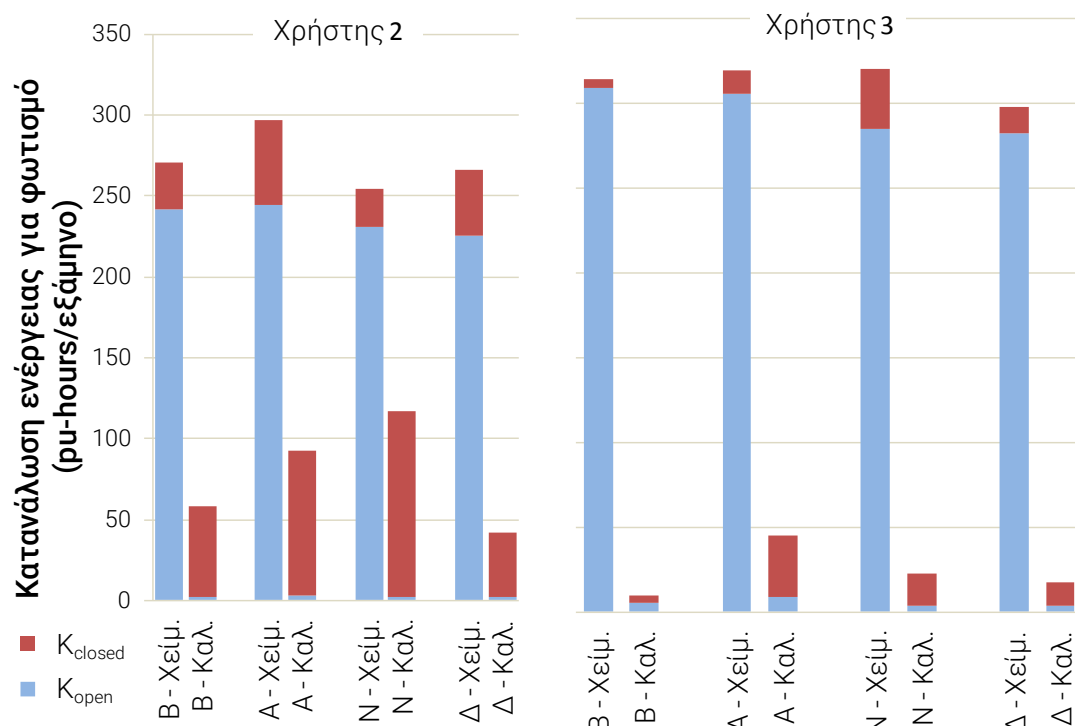
Όσον αφορά στην επίδραση του προσανατολισμού, παρατηρήθηκε ότι κατά το χειμερινό εξάμηνο ο Ανατολικός προσανατολισμός είναι αυτός που παρουσιάζει την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας για τους Χρήστες 1 και 2. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-12, όλοι οι προσανατολισμοί παρουσιάζουν περίπου την ίδια κατανομή στην Περιοχή 1, ωστόσο ο Ανατολικός Προσανατολισμός εμφανίζει αρκετές τιμές στην Περιοχή 3. Κατά το θερινό Εξάμηνο, τα γραφεία με Δυτικό και Βόρειο Προσανατολισμό παρουσιάζουν την μικρότερη κατανάλωση, καθώς οι περισσότερες τιμές της έντασης φωτισμού βρίσκονται στη «ζώνη άνεσης» του χρήστη (Περιοχή 2).

Πέραν αυτού, οι τιμές του Πίνακα 5-5 επιμερίστηκαν (α) σε κατανάλωση  $K_{open}$  που οφείλεται σε μικρές τιμές έντασης φωτισμού  $E$  στην επιφάνεια εργασίας (με ανοικτές περσίδες), που οδηγούν τον χρήστη να ανοίξει τον τεχνητό φωτισμό και (β) σε κατανάλωση  $K_{closed}$  που οφείλεται σε πολύ υψηλές τιμές έντασης φωτισμού  $E$  στην επιφάνεια εργασίας, που οδηγούν τον χρήστη να κλείσει τις περσίδες και στη συνέχεια λόγω της μείωσης της έντασης φωτισμού σε  $E_{B4}$  να ανοίξει τον τεχνητό φωτισμό. Οι αντίστοιχες τιμές των δύο επιμέρους καταναλώσεων δίνονται στον Πίνακα 5-6.

Πίνακας 5-6 Εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό με ανοικτές ( $K_{open}$ ) ή κλειστές περσίδες ( $K_{closed}$ ) ανά εποχή και προσανατολισμό για τους τρεις Χρήστες.

Προσανατολισμός Γραφείου	Εξάμηνο	Κατανάλωση Ενέργειας για Φωτισμό (pu-hours/εξάμηνο)					
		Χρήστης 1		Χρήστης 2		Χρήστης 3	
		$K_{open}$	$K_{closed}$	$K_{open}$	$K_{closed}$	$K_{open}$	$K_{closed}$
Βόρειος	Χειμώνας	227.9	40.1	241.6	29.1	309.6	4.8
	Καλοκαίρι	1.4	24.6	2.4	56.0	5.6	4.3
Ανατολικός	Χειμώνας	233.4	51.6	244.4	52.3	306.0	13.6
	Καλοκαίρι	2.4	44.6	2.9	89.4	8.8	36.9
Νότιος	Χειμώνας	225.1	42.9	230.8	23.5	285.3	35.7
	Καλοκαίρι	2.2	76.8	2.1	115.3	3.8	19.3
Δυτικός	Χειμώνας	217.4	52.6	225.2	40.6	283.0	14.9
	Καλοκαίρι	1.3	26.7	1.8	40.6	3.8	13.5

Όπως προκύπτει, κατά το χειμερινό εξάμηνο η κατανάλωση οφείλεται κατά 80-98% σε χρήση φωτισμού με ανοικτές περσίδες. Αντίθετα σχεδόν όλη η κατανάλωση του θερινού εξαμήνου οφείλεται σε χρήση του φωτισμού με κλειστές περσίδες. Ενδεικτικά για τους Χρήστες 2 και 3 οι τιμές του Πίνακα 5-6 απεικονίζονται και στο Σχήμα 5-14. Είναι φανερό ότι ο Χρήστης 2 καταναλώνει το 1/3 της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω χρήσης του φωτός με κλειστές περσίδες (εφόσον οχλείται εύκολα από την έντονη εξωτερική ακτινοβολία και κλείνει τις περσίδες) ενώ αντίθετα το σύνολο σχεδόν της κατανάλωσης του Χρήστη 3 (90%) οφείλεται σε χρήση του φωτισμού, ενώ οι περσίδες είναι ανοικτές.



Σχήμα 5-14 Εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό με ανοικτές ( $K_{open}$ ) ή κλειστές περιόδους ( $K_{closed}$ ) ανά εποχή και προσανατολισμό για τους Χρήστες 2 και 3.

Η ανάλυση που προηγήθηκε ανέδειξε τον μοναδικό τρόπο με τον οποίον οι προτιμήσεις του κάθε χρήστη συνδέονται με την τελική κατανάλωση ενέργειας φωτισμού. Επίσης, επιβεβαίωσε τον καθοριστικό ρόλο που έχουν ο προσανατολισμός του γραφείου και η εποχή του έτους. Όλες αυτές οι παράμετροι, αλλά και άλλες όπως είναι η απόσταση της επιφάνειας εργασίας από τα παράθυρα, είναι σημαντικές για την ανάπτυξη ενός ενεργειακά αποδοτικού γενικευμένου μοντέλου πρόβλεψης.

## Κεφάλαιο 6: Μοντέλο προσδιορισμού της επιθυμητής εσωτερικής έντασης φωτισμού με βάση την ασαφή λογική

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα, βασισμένα στην μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, τα οποία προβλέπουν την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας ενός γραφείου αλλά και τις αντίστοιχες δράσεις στις οποίες θα προέβαινε ένας συγκεκριμένος χρήστης στο χώρο αυτό. Βασικό στοιχείο στη φιλοσοφία και την ανάπτυξη αυτών των μοντέλων ήταν ο διαχωρισμός των συνθηκών που μετρήθηκαν στο γραφείο σε δύο διακριτές κατηγορίες: με ανοικτές και κλειστές περσίδες αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο το Μοντέλο 1 του Κεφαλαίου 5 προέβλεπε για οποιεσδήποτε εξωτερικές συνθήκες δύο διαφορετικές τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού,  $E$  (με ανοικτές) και  $E_{BL}$  (με κλειστές περσίδες) αντίστοιχα και στη συνέχεια με τη βοήθεια των καμπυλών συμπεριφοράς του χρήστη εκτιμούσε την πιθανότητα δράσης του αναφορικά με τη χρήση φωτισμού ή περσίδων.

Στο παρόν κεφάλαιο θα ακολουθηθεί μία νέα προσέγγιση: θα δημιουργηθεί ένα μοντέλο που θα βασίζεται στο σύνολο των δεδομένων έντασης φωτισμού που καταγράφηκαν κατά την παρουσία του χρήστη, ανεξάρτητα δηλαδή από την κατάσταση των περσίδων και του φωτισμού. Ένας χρήστης ρυθμίζει τις περσίδες και τον φωτισμό με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτύχει κάθε στιγμή συνθήκες οπτικής άνεσης στο χώρο του. Κάθε παρέμβαση του χρήστη (event) σημαίνει ότι η τιμή της έντασης φωτισμού  $E_{ev}$  τού προκάλεσε όχληση και έδρασε για να αποκαταστήσει τις συνθήκες άνεσης στο χώρο. Επομένως όλες οι μετρούμενες τιμές έντασης φωτισμού, εξαιρουμένων εκείνων ακριβώς πριν από τις παρεμβάσεις του χρήστη, αντιστοιχούν σε συνθήκες άνεσης.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, η συμπεριφορά του κάθε χρήστη εμφανίζει στοιχεία στοχαστικότητας και για τον λόγο αυτόν μοντελοποιήθηκε με πιθανοτικές καμπύλες. Επομένως, οι έννοιες της άνεσης και της όχλησης του κάθε χρήστη δεν είναι σαφώς διαχωρισμένες. Ο χρήστης παρουσιάζει μία προσαρμοστικότητα σε διάφορες εσωτερικές συνθήκες με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μία «ζώνη» άνεσης, να ανέχεται δηλαδή ένα εύρος εντάσεων φωτισμού, χωρίς να δυσανασχετεί. Επομένως, ένα σύστημα διαχείρισης φωτισμού και περσίδων που θα επιτυγχάνει κάθε στιγμή τιμές έντασης φωτισμού μέσα στο εύρος αυτό θα κάλυπτε τις βασικές ανάγκες του χρήστη. Ένα απλό σύστημα διαχείρισης θα φρόντιζε να διατηρεί μία σταθερή τιμή έντασης φωτισμού (πχ 500 Lux) στην επιφάνεια εργασίας, ρυθμίζοντας ταυτόχρονα την ένταση των φωτιστικών σωμάτων και την θέση των περσίδων. Ωστόσο, όπως αναλύθηκε και στην Παράγραφο 1.1, η εφαρμογή σταθερών επιπέδων έντασης φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές του κιρκάδιου ρυθμού, της

διάθεσης και της συμπεριφοράς του χρήστη, καθώς έχει αποδειχτεί ότι στην πραγματικότητα ο άνθρωπος χρειάζεται φωτισμό όσο το δυνατόν συντονισμένο στον φυσικό ημερήσιο κύκλο (natural daily cycle) [18][19][20][21][135]. Για αυτούς τους λόγους είναι σκόπιμη η δημιουργία ενός μοντέλου που να παράγει μία ημερήσια χρονοσειρά τιμών επιθυμητής έντασης φωτισμού  $E_{conf}$  που να βρίσκονται εντός της ζώνης άνεσης του χρήστη και ταυτόχρονα να μεταβάλλονται ακολουθώντας τη φυσική μεταβολή του φωτός.

Οι καταγραφές της εσωτερικής έντασης φωτισμού (με τις οποίες θα τροφοδοτηθεί το μοντέλο) εξαρτώνται από τις αντίστοιχες συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος (ηλιακή ακτινοβολία, κατάσταση ουρανού, εποχή του έτους κλπ) αλλά η σχέση τους δεν είναι πάντα σταθερή, αφού οι καταγραφές αυτές έχουν επηρεαστεί και από τις δράσεις του χρήστη (ρύθμιση φωτισμού και περσίδων).

Επομένως μπορεί να υπάρχει πλήθος περιπτώσεων για κάθε μία εκ των οποίων ισχύει μία διαφορετική συνάρτηση εισόδων-εξόδων. Το μοντέλο που θα αναπτυχθεί θα πρέπει να είναι σε θέση να προσδιορίζει τον αριθμό και τα όρια αυτών των περιπτώσεων, καθώς και να συνθέτει τη βέλτιστη συνάρτηση που αντιστοιχεί σε κάθε μία από αυτές.

Με βάση τα παραπάνω θα γίνει χρήση ενός συστήματος ασαφούς λογικής (fuzzy logic) για την πρόβλεψη των τιμών της επιθυμητής έντασης φωτισμού, εφόσον ένα τέτοιο σύστημα είναι ικανό να συσχετίζει πληθώρα διαφορετικών εισόδων με την αντίστοιχη έξοδο βρίσκοντας συνδέσεις που δεν είναι προφανείς και να συνδυάζει σταδιακά τις επιμέρους συναρτήσεις ανάλογα με την μεταβολή κάποιων κρίσιμων μεταβλητών.

## 6.1 Βασικές αρχές και στόχοι του προτεινόμενου μοντέλου ασαφούς λογικής

Το μοντέλο που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια θα πρέπει να έχει τις εξής δυνατότητες και χαρακτηριστικά:

- Να παράγει την βέλτιστη ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού ανά χρήστη, δηλαδή να τυγχάνει της αποδοχής του χρήστη και επομένως να οδηγεί σε ελαχιστοποίηση και ιδανικά σε μηδενισμό των δράσεων/παρεμβάσεων του χρήστη.
- Η καμπύλη αυτή να είναι κυμαινόμενη και όχι σταθερή, ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την εποχή και τη μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών.
- Η καμπύλη να είναι προσωποποιημένη και όχι γενικευμένη, δηλαδή να βασίζεται αποκλειστικά στις μετρήσεις έντασης φωτισμού από το γραφείο του χρήστη και να μην απαιτούνται δεδομένα προσομοιώσεων ανάλογα με αυτά που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.
- Η έξοδος του μοντέλου (τιμή βέλτιστης έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας) να τροφοδοτείται σε ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης το οποίο θα προσπαθεί να την επιτύχει με κατάλληλη ρύθμιση του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων.

Η στατιστική ανάλυση του Κεφαλαίου 2 που αφορούσε στις μετρήσεις έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας τριών διαφορετικών χρηστών ανέδειξε για κάθε έναν από αυτούς την ποικιλομορφία των καμπυλών έντασης φωτισμού ανάλογα με διάφορους παράγοντες όπως η ώρα της ημέρας, η εποχή, οι εξωτερικές συνθήκες κλπ. Για παράδειγμα, στα Σχήματα 2-16, 2-17 και 2-18 φαίνεται πόσο διαφέρει η μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού ανάλογα με τον μήνα του έτους για κάθε χρήστη. Στα Σχήματα 2-19 και 2-20 παρουσιάζονται για τον ίδιο μήνα αντίστοιχα οι έντονες διαφορές μεταξύ των μέσων ημερησίων καμπυλών των τριών χρηστών που προφανώς οφείλονται στις διαφορετικές προτιμήσεις του κάθε χρήστη αλλά και στον προσανατολισμό του κάθε γραφείου.

Επίσης, οι καθημερινές καταγραφές έντασης φωτισμού επηρεάζονται καθοριστικά από την χρήση του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων (Σχήμα 2-7, Σχήμα 2-8) η οποία είναι έντονα στοχαστική. Παρουσιάζονται διαφορές όχι μόνο μεταξύ των χρηστών (Σχήμα 2-12, Σχήμα 2-13) αλλά και στον τρόπο με τον οποίον έδρασε ο ίδιος χρήστης σε διαφορετικές ημέρες με παρόμοιες εξωτερικές συνθήκες (Σχήμα 2-11).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για κάθε χρήστη χωριστά καταγράφεται κατά τις ώρες παρουσίας του ένα μεγάλο εύρος τιμών έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (βλέπε κατανομή τιμών στο Σχήμα 2-24). Τίθεται το ερώτημα ποια από αυτά τα δεδομένα έντασης φωτισμού αντιστοιχούν σε συνθήκες άνεσης του χρήστη. Υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία για το ζήτημα αυτό [136][137][138][139][140], στην οποία αναζητούνται κριτήρια για τον χαρακτηρισμό ή διαχωρισμό των συνθηκών άνεσης/όχλησης του χρήστη (οπτικής, θερμικής κλπ), άλλοτε με χρήση ερωτηματολογίων κι άλλοτε με βάση τις καταγραφές δεδομένων. Ωστόσο δεν έχει προκύψει ένας κοινά αποδεκτός ορισμός της έννοιας της άνεσης λόγω της πολυπλοκότητας της ανθρώπινης συμπεριφοράς και της ιδιαίτερης αλληλεπίδρασής του χρήστη με το περιβάλλον. Στη συνήθη μεθοδολογία υιοθετούνται μία ή περισσότερες κρίσιμες μεταβλητές που ωθούν τον χρήστη να δράσει (στην περίπτωση μας είναι η ένταση φωτισμού) και αναζητείται η σύνδεση των μεταβλητών αυτών με τις δράσεις του χρήστη.

Με βάση την προσέγγιση του Lindelhoff [96] θεωρήθηκε ότι οι καταγραφές έντασης φωτισμού  $E_{ev}$  αμέσως πριν τη δράση του χρήστη (άνοιγμα τεχνητού φωτισμού ή κλείσιμο περσίδων) αντιστοιχούν με βεβαιότητα σε συνθήκες όχλησης. Λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη την ανάλυση που έγινε στην Παράγραφο 4.3.2 σχετικά με την καθυστέρηση δράσης και την ανοχή των χρηστών αποφασίστηκε η διεύρυνση της παραπάνω προσέγγισης. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι κατά περίπτωση η όχληση του χρήστη πριν τη δράση δεν είναι στιγμιαία αλλά μπορεί να προϋπήρχε δυσφορία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και αντίστοιχη καθυστέρηση δράσης.

Συγκεκριμένα, για κάθε ημέρα όπου είχε καταγραφεί κλείσιμο περσίδας σε τιμή έντασης φωτισμού  $E_{ev}$  εξετάστηκε το προηγούμενο διάστημα (μέχρι την αρχή της συγκεκριμένης



ημέρας), ενώ εντοπίστηκαν και εξαιρέθηκαν τα διαστήματα με  $E > E_{ev}$ . Στις περιπτώσεις επίσης που υπήρχε ενεργοποίηση τεχνητού φωτισμού για ένταση φωτισμού  $E_{ev}$  εξαιρέθηκαν αντίστοιχα προγενέστερα διαστήματα με  $E < E_{ev}$ . Με τον τρόπο αυτόν, από το σύνολο των καταγραφών στο διάστημα παρουσίας του χρήστη εξαιρέθηκε μέρος των δεδομένων (5-7% του συνόλου ανάλογα με τον χρήστη) το οποίο θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες όχλησης. Τα υπόλοιπα δεδομένα περιγράφουν το ευρύ φάσμα των τιμών έντασης φωτισμού για τις οποίες θεωρήθηκε ότι ο χρήστης αισθανόταν άνετα στο περιβάλλον του. Με αυτά τα δεδομένα θα εκπαιδευτεί το μοντέλο ασαφούς λογικής ώστε να παράγει την επιθυμητή έξοδο.

## 6.2 Σύντομη περιγραφή ενός συστήματος ασαφούς λογικής

Η μαθηματική θεμελίωση της ασαφούς λογικής βασίζεται στην θεωρία των ασαφών συνόλων, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν μία γενίκευση της κλασικής θεωρίας συνόλων. Η έννοια της ασάφειας συνδέεται με την αοριστία και τη σχετικότητα που εμφανίζεται σε πολλούς από τους παράγοντες που διερευνώνται στην παρούσα διατριβή (προτιμήσεις χρήστη, καιρικές συνθήκες, εποχική επίδραση κλπ). Στην κλασική θεωρία συνόλων υπάρχει μία μάλλον αυστηρή έννοια της συμμετοχής ενός αντικειμένου σε ένα σύνολο, δηλαδή ένα στοιχείο ή θα ανήκει ή δεν θα ανήκει σε ένα σύνολο. Στα ασαφή σύνολα αντιθέτως είναι δυνατή μία πιο ευέλικτη έννοια της συμμετοχής. Ο βαθμός συμμετοχής ενός στοιχείου σε ένα ασαφές σύνολο περιγράφεται με έναν αριθμό στο διάστημα  $[0, 1]$ .

Ένα τυπικό σύστημα ασαφούς λογικής αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη: μία σειρά από κανόνες της μορφής IF-THEN, έναν μηχανισμό «λήψης αποφάσεων», δηλ. εξαγωγής συμπεράσματος με βάση τους κανόνες, μία διαδικασία ασαφούς διαμόρφωσης (fuzzification) που μετατρέπει κλασσικά σύνολα σε ασαφή και τέλος, την αντίστροφη διαδικασία αποσαφήνισης (defuzzification), που μετατρέπει το ασαφές συμπέρασμα σε σαφές (καθορισμένο) μέγεθος.

Στην παρούσα διατριβή θα χρησιμοποιηθεί μία εκδοχή του ασαφούς νευρωνικού δικτύου που προτάθηκε αρχικά από τους Takagi, Sugeno και Kang (μοντέλο TSK) [141][142]. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ασαφείς υποθετικές προτάσεις της παρακάτω μορφής:

$$\begin{aligned} R^{(j)} \rightarrow & \text{IF} (x_{p,1} \text{ is } A_1^j) \text{ AND } \dots \quad x_{p,NPI} \text{ is } A_{NPI}^j \\ & \text{THEN } y_j = F_j(x_{c,1}, x_{c,2}, \dots) \end{aligned} \quad (6.1)$$

όπου NR (Number of Rules) είναι ο αριθμός των κανόνων.

Το πρώτο σκέλος της πρότασης ορίζεται ως τμήμα υπόθεσης (premise part) ενώ το δεύτερο ως τμήμα συμπεράσματος (consequent part) του ασαφούς μοντέλου.

$\bar{X}_p = [x_{p,1}, \dots]^\top$  είναι το διάνυσμα εισόδου στο τμήμα υπόθεσης, όπου NPI (Number of Premise Inputs) είναι ο αριθμός των εισόδων υπόθεσης.

$A_i^j$  δηλώνει μία ιδιότητα (πχ. «μικρός», «μεσαίος», «μεγάλος») που γλωσσικά περιγράφει την τιμή εισόδου  $x_{p,i}$ ,  $i = 1, \dots, \text{NPI}$

$\bar{X}_c = [x_{c,1}, \dots]^\top$  είναι το διάνυσμα εισόδου του τμήματος συμπεράσματος R(j) που περιλαμβάνει NCI μεταβλητές, όπου NCI (Number of Consequent Inputs) είναι ο αριθμός των εισόδων συμπεράσματος.

Η σχέση  $y_j = F(\bar{X}_c)$  αναπαριστά τον j-οστό κανόνα, δηλ. μία συγκεκριμένη συνάρτηση με είσοδο τις τιμές  $x_{c,i}$ ,  $i = 1, \dots, \text{NCI}$ .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου η παραπάνω συνάρτηση είναι γραμμικός συνδυασμός των εισόδων συμπεράσματος.

$$y_j = F(\bar{X}_c) = \lambda_0^j + \sum_{i=1}^{\text{NCI}} \lambda_i^j x_{c,i} \quad (6.2)$$

όπου  $\lambda_i^j$  είναι τα βάρη,  $\lambda_0^j$  ένας σταθερός όρος και τέλος το σύνολο των βαρών  $\lambda_i^j$ ,  $i = 1, \dots, \text{NCI}$ ,  $j = 1, \dots, \text{NR}$  αποτελούν τις λεγόμενες παραμέτρους συμπεράσματος.

Κάθε μία από τις ιδιότητες  $A_i^j$  που αναφέρθηκαν παραπάνω συνδέεται με μία συνάρτηση συμμετοχής  $\mu_i^j(x_{p,i})$ . Συνήθως πρόκειται για συναρτήσεις με ένα μέγιστο (τριγωνικές, γκαουσιανές, τραπεζοειδείς) που παίρνουν τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$ . Στη εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα γκαουσιανές συναρτήσεις της μορφής

$$\mu_i^j(x_{p,i}) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(x_{p,i} - m_i^j)^2}{(\sigma_i^j)^2} \right] \quad (6.3)$$

όπου  $m_i^j$  και  $\sigma_i^j$  είναι το κέντρο (σημείο μεγιστοποίησης) και το εύρος της συνάρτησης συμμετοχής αντίστοιχα.

Οι παράμετροι αυτές  $m_i^j, \sigma_i^j$ , με  $i = 1, \dots, \text{NPI}$  και  $j = 1, \dots, \text{NR}$  ονομάζονται παράμετροι υπόθεσης.

Ο βαθμός συμμετοχής στον κανόνα R(j), δηλ. ο βαθμός κατά τον οποίο ο κανόνας R(j) ενεργοποιείται από ένα συγκεκριμένο διάνυσμα υπόθεσης  $\bar{X}_p$ , ορίζεται από τη σχέση

$$\mu_j(\bar{X}_c) = \prod_{i=1}^{NPI} \mu_i^j(x_{p,i}). \quad (6.4)$$

Τα παραπάνω ασαφή σύνολα που υπάγονται στον κανόνα  $R(j)$  ορίζουν μία ασαφή υποπεριοχή εντός του συνολικού διαστήματος υπόθεσης:

$$A^{(j)} = A_1^j \times A_2^j \times \dots \times A_{NPI}^j, \quad (6.5)$$

δηλαδή ο  $A^{(j)}$  αναπαριστά ένα πολυδιάστατο ασαφές σύνολο με συνάρτηση συμμετοχής αυτήν που περιγράφεται στην Εξίσωση 6.3.

Με βάση την παραπάνω σημειογραφία, ένας κανόνας διατυπώνεται με την εξής συνοπτική μορφή:

$$R^{(j)} : \text{ IF } \bar{X}_p \text{ is } A^{(j)} \text{ THEN } y_j = F_j(\bar{X}_c) \quad (6.6)$$

Με δεδομένα τα διανύσματα εισόδου  $\bar{X}_p$  και  $\bar{X}_c$ , η τελική έξοδος του ασαφούς μοντέλου προκύπτει μέσω στάθμισης με τη μέθοδο αποσαφήνισης που ονομάζεται «κέντρο της περιοχής»

$$y = \frac{\sum_{j=1}^{NR} \mu_j(\bar{X}_p) \cdot F_j(\bar{X}_c)}{\sum_{j=1}^{NR} \mu_j(\bar{X}_p)} \quad (6.7)$$

Η βασική δηλαδή φιλοσοφία ενός τέτοιου μοντέλου συνίσταται στον ασαφή διαχωρισμό του χώρου υπόθεσης σε υποπεριοχές  $A^{(j)}$  και στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του συστήματος σε κάθε υποπεριοχή με ένα απλό υπομοντέλο  $F(\bar{X}_c)$ . Το συνολικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως μία σύνθεση των παραπάνω απλούστερων υπομοντέλων.

### 6.3 Ανάλυση των εισόδων του μοντέλου ασαφούς λογικής

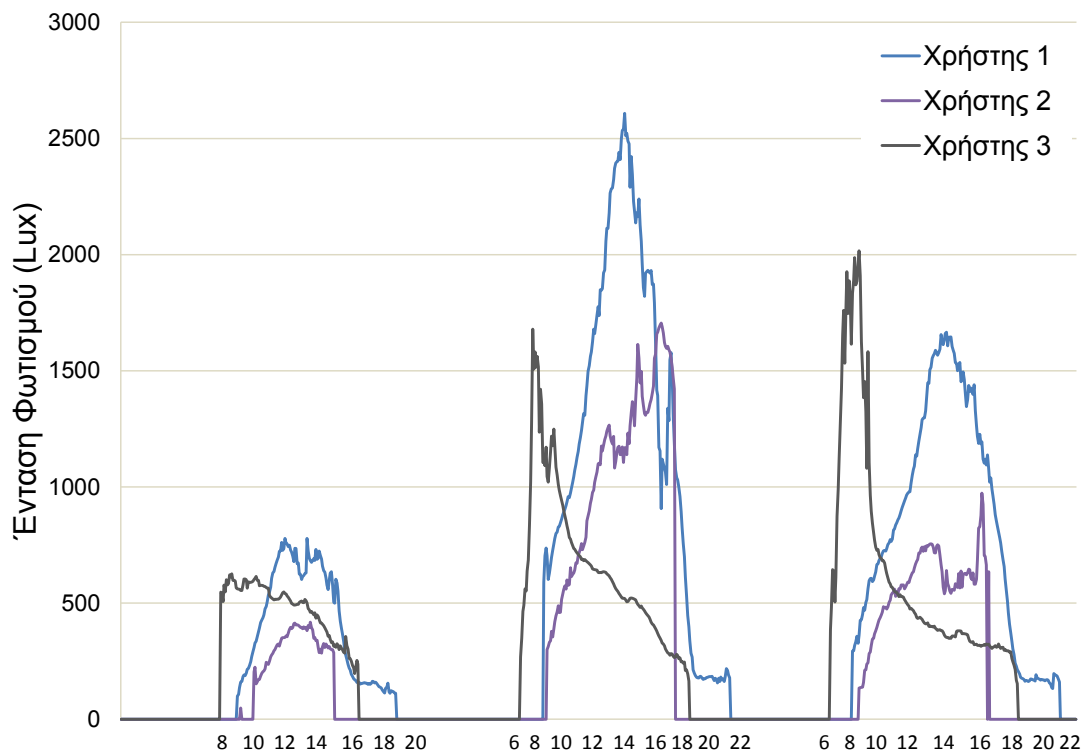
Τα βασικά μεγέθη και δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν ως είσοδοι του Μοντέλου Ασαφούς Λογικής έχουν σε κάποιο βαθμό περιγραφεί ήδη στο Κεφάλαιο 5. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν:

Η ώρα της ημέρας και η ημέρα του έτους: Είναι προφανές ότι η εσωτερική ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας εξαρτάται από τις δύο παραπάνω μεταβλητές λόγω της ημερήσιας κίνησης του ηλίου και της διαφορετικής τροχιάς του ανάλογα με την εποχή. Η εξάρτηση είναι σημαντική, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό του γραφείου. Για την

διακριτοποίηση των δεδομένων θεωρήθηκε ότι η καλύτερη επιλογή αποτελεί το πεντάλεπτο βήμα ( $i=1,...,288$ ), έτσι ώστε να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου και επιπρόσθετα η παραγόμενη έξοδος (βέλτιστη ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας) να μπορεί να προσαρμόζεται γρήγορα στις συνεχείς εξωτερικές μεταβολές αλλά ταυτόχρονα να μην εμφανίζει απότομες αυξομειώσεις που θα ενοχλούσαν τον χρήστη. Για την είσοδο που αφορά στην ημέρα του έτους ( $n=1,...,365$ ) θεωρήθηκε ότι οι τιμές της δεν είναι συμβατές με την περιοδικότητα του ηλιακού έτους και των αντίστοιχων φαινομένων και έτσι υιοθετήθηκε ένας μετασχηματισμός ώστε η είσοδος αυτή να μεγιστοποιείται κατά τη θερινή ισημερία ( $n=173$ ) και να ελαχιστοποιείται κατά τη χειμερινή ισημερία ( $n=355$ ). Με τον τρόπο, αυτό η είσοδος εμφανίζει τη μέγιστη ετεροσυσχέτιση με τα μεγέθη της ηλιακής ακτινοβολίας και της έντασης φωτισμού.

Για να επιβεβαιωθεί η επίδραση των παραπάνω εισόδων παρουσιάζεται το μέσο ημερήσιο προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού για κάθε ένα από τους τρεις χρήστες επιμερισμένο σε τρία χρονικά διαστήματα ως εξής: «χειμερινή περίοδος» (Νοέμβριος-Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος), «ενδιάμεση περίοδος» (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος και Μάρτιος-Απρίλιος) και «θερινή περίοδος» (Μάιος-Ιούνιος-Ιούλιος-Αύγουστος).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-1, τα μέσα ημερήσια προφίλ έντασης φωτισμού για τους τρεις χρήστες εμφανίζουν έντονες διαφορές ανάλογα με τα εξεταζόμενα χρονικά διαστήματα. Κατά τη χειμερινή περίοδο και οι τρεις χρήστες παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές εσωτερικής έντασης φωτισμού, ενώ κατά την ενδιάμεση περίοδο οι χρήστες 1 και 2 παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές σε αντίθεση με τον χρήστη 3 ο οποίος παρουσιάζει το υψηλότερο μέσο προφίλ κατά τη θερινή περίοδο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται τόσο στον διαφορετικό προσανατολισμό των γραφείων 1 και 2 σε σχέση με το γραφείο 3 αλλά και στις διαφορετικές δράσεις που εκτελούν οι χρήστες μέσα στο χώρο τους. Επισημαίνεται ότι τα δεδομένα έντασης φωτισμού που παρουσιάζονται έχουν φιλτραριστεί όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 6.1, έχουν αποκοπεί δηλαδή κάποια χρονικά διαστήματα με ακραίες τιμές έντασης φωτισμού πριν από τις δράσεις του χρήστη (άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού ή κλείσιμο των περσίδων). Με βάση τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η είσοδος της ώρας της ημέρας και της ημέρας του έτους (όπως αυτή μετασχηματίστηκε) έχουν πραγματικά έντονη συσχέτιση με την έξοδο του μοντέλου και επομένως η χρήση τους σε αυτό είναι αναγκαία. Ωστόσο υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική ένταση φωτισμού με πιο χαρακτηριστικό τις καιρικές συνθήκες και για το λόγο αυτό εξετάστηκε η χρήση και άλλων εισόδων όπως αναλύεται στη συνέχεια.

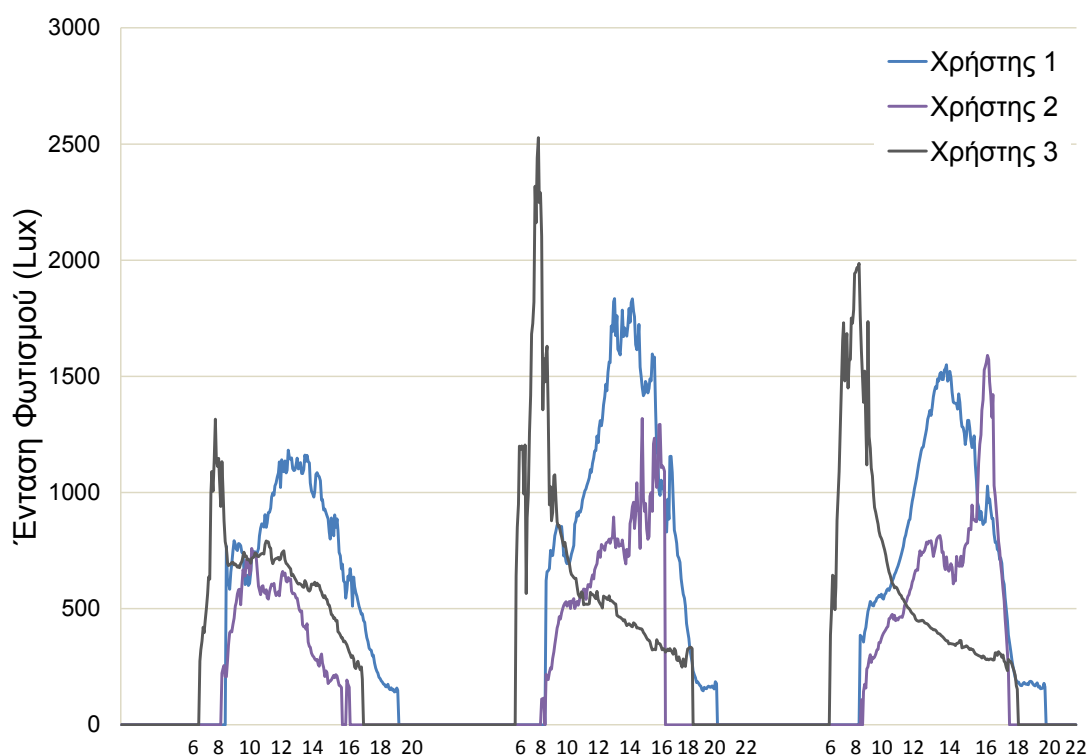


Σχήμα 6-1 Μέσο ημερήσιο προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο σύνολο των δεδομένων, για τους τρεις χρήστες για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και την θερινή (δεξιά) περίοδο.

Η κατάσταση του ουρανού (καιρικές συνθήκες που επικρατούν): Όταν δεν υπάρχει παρουσία χρήστη στο χώρο, η κατάσταση του ουρανού (καθαρός, μερικώς νεφελώδης, νεφосκεπής) επηρεάζει με άμεσο και προφανή τρόπο την εσωτερική ένταση φωτισμού. Ωστόσο σε περιπτώσεις όπως αυτή που εξετάζεται, όπου ο χρήστης ρυθμίζει την κατάσταση του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων ώστε να εργάζεται σε συνθήκες άνεσης, η παραπάνω σχέση μπορεί να αλλάξει. Για παράδειγμα, ο χρήστης σε μία ημέρα με έντονα νεφосκεπή ουρανό μπορεί να κάνει καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας του, χρήση του τεχνητού φωτισμού (με αποτέλεσμα η μετρούμενη εσωτερική ένταση φωτισμού να είναι αυξημένη) ή να κάνει χρήση των περσίδων σε μία ημέρα με έντονη ηλιοφάνεια ώστε να περιορίσει την ακτινοβολία που εισέρχεται στο χώρο. Οι δράσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα να καταγράφονται χαμηλά επίπεδα εσωτερικής έντασης φωτισμού ενώ η είσοδος της κατάστασης του ουρανού έχει υψηλές τιμές ή το αντίστροφο. Την αντίφαση αυτή καλείται να διαχειριστεί το σύστημα ασαφούς λογικής και να παράγει τιμές έντασης φωτισμού αποδεκτές από τον χρήστη κάτω από συνεχώς εναλλασσόμενες εξωτερικές συνθήκες. Στο Σχήμα 6-2 παρουσιάζονται κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 6-1 τα μέσα ημερήσια προφίλ έντασης φωτισμού για τους τρεις χρήστες χωρισμένα βάσει της κατάστασης του ουρανού που είχε καταγραφεί για τις ημέρες των αντίστοιχων μετρήσεων. Είναι εμφανείς οι διαφορές ανάμεσα στη μορφή των καμπυλών για τους τρεις χρήστες που οφείλονται τόσο

στον διαφορετικό προσανατολισμό των γραφείων όσο και στις διαφορετικές τους δράσεις ανάλογα με την επιθυμητή ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η μέση ημερήσια καμπύλη έντασης φωτισμού, ιδιαίτερα για τους χρήστες 1 και 3, είναι μειωμένη τις ημέρες με καθαρό ουρανό σε σχέση με τις μερικώς νεφελώδεις ημέρες. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού πρέπει να αναζητηθεί στο ότι κάθε καμπύλη προέρχεται από ένα διαφορετικό μίγμα εποχών αλλά και στη συχνότερη χρήση των περσίδων σε συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας.

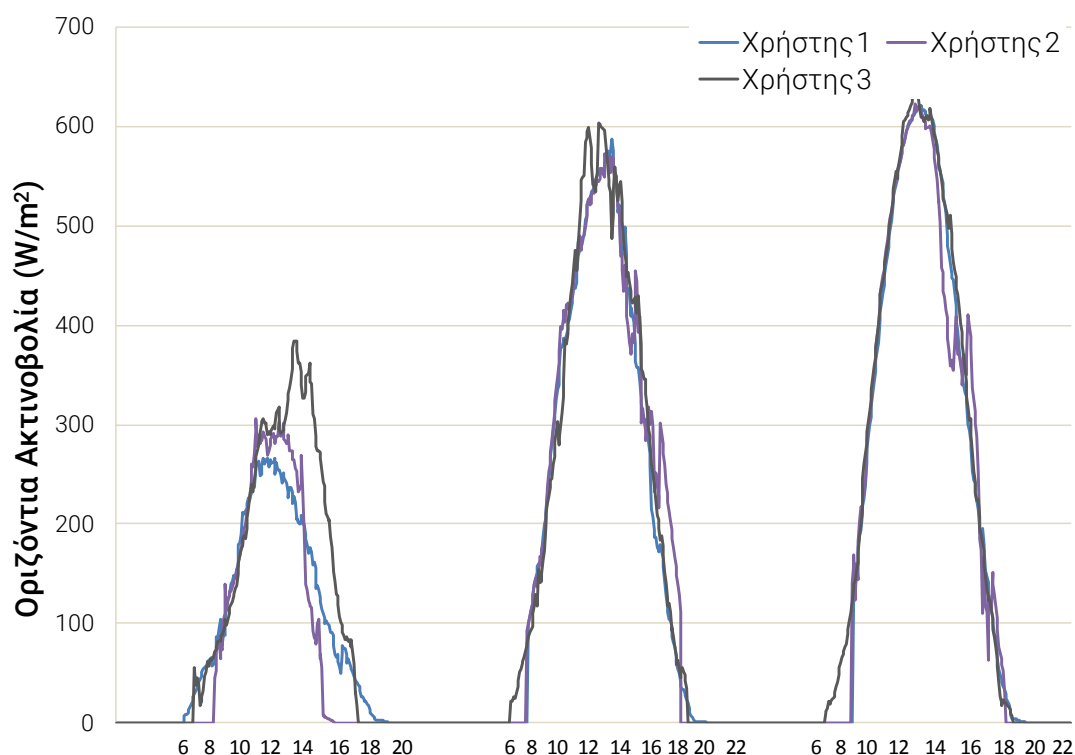
Τα παραπάνω αναδεικνύουν για μία ακόμη φορά την πολυπλοκότητα του προβλήματος και την ανάγκη για την δημιουργία ενός εργαλείου ασαφούς λογικής που θα μπορεί να κατηγοριοποιεί κάθε πρότυπο βάσει δύο ή περισσότερων μεταβλητών, με στόχο την αναγνώριση όλων των παραπάνω καταστάσεων.



Σχήμα 6-2 Μέσο ημερήσιο προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο σύνολο των δεδομένων, για τους τρεις χρήστες για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά).

Η οριζόντια ακτινοβολία και οι κάθετες συνιστώσες της: Η χρήση της κατάστασης του ουρανού ως εισόδου για το σχεδιαζόμενο σύστημα ασαφούς λογικής φάνηκε από την παραπάνω ανάλυση ότι είναι χρήσιμη αφού υπάρχει έντονη συσχέτιση της εσωτερικής έντασης φωτισμού με αυτή. Η κατάσταση του ουρανού είναι εύκολο να βρεθεί από την πρόγνωση του καιρού και να εισαχθεί σε ένα εκπαιδευμένο μοντέλο ώστε αυτό να παράγει την αντίστοιχη πρόβλεψη. Υπάρχει ωστόσο ένα ζήτημα που αφορά στην αριθμητική έκφραση της εισόδου αυτής. Για παράδειγμα, είναι δύσκολο να εισαχθούν σαφή όρια μεταξύ της κατάστασης του ουρανού που χαρακτηρίζουμε νεφосκεπή και αυτής που χαρακτηρίζουμε ως

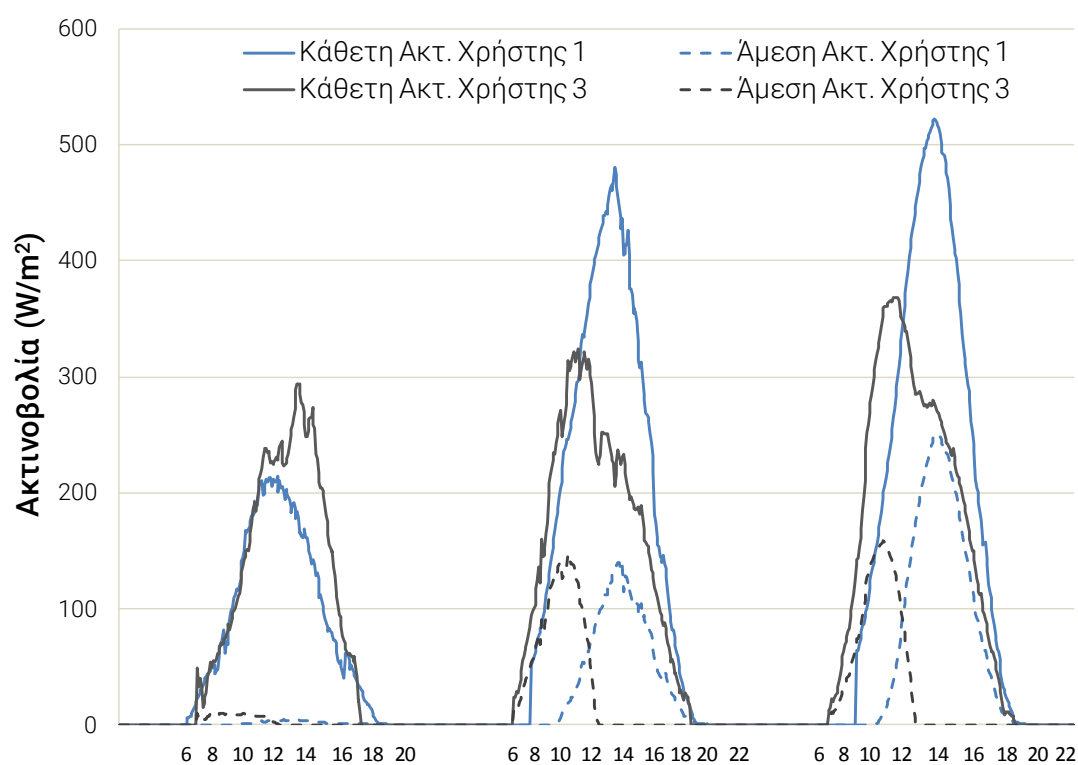
μερικώς νεφελώδη. Υπάρχουν επίσης αποκλίσεις στην τυποποίηση των συνθηκών αυτών όπως τις παρέχουν οι διάφορες μετεωρολογικές υπηρεσίες πρόγνωσης. Για το λόγο αυτό θα εξεταστεί ως είσοδος του μοντέλου και η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία, μέγεθος με σαφείς αριθμητικές τιμές, η πρόβλεψη της οποίας είναι επίσης ευρέως διαθέσιμη. Είναι προφανές ότι η συσχέτισή της με την κατάσταση του ουρανού είναι υψηλή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-3 όπου παρουσιάζεται το μέσο ημερήσιο προφίλ της οριζόντιας ακτινοβολίας για διαστήματα νεφοσκεπούς, μερικώς νεφελώδους και καθαρού ουρανού.



Σχήμα 6-3 Μέσο ημερήσιο προφίλ της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας στο σύνολο των δεδομένων, για τους τρεις χρήστες για νεφοσκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά).

Το μέγεθος της οριζόντιας ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητο του προσανατολισμού κάθε γραφείου και έτσι δεν ταυτίζεται πάντα με την διείσδυση του άμεσου φυσικού φωτός στον κάθε χώρο, που όμως είναι αυτό που προκαλεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων την όχληση των χρηστών. Τα μεγέθη που μπορούν να δώσουν τέτοιες πληροφορίες και συσχετίσεις είναι η συνολική κάθετη ακτινοβολία στο παράθυρο του κάθε γραφείου, καθώς και η άμεση συνιστώσα αυτής. Το μέγεθος της κάθετης ακτινοβολίας εμπεριέχει το στοιχείο του προσανατολισμού, εμφανίζει έντονες εποχικές διαφορές ανάλογα με το ύψος του ηλίου και προφανώς αλλάζει με την κατάσταση του ουρανού. Τα ίδια πλεονεκτήματα εμφανίζει και το μέγεθος της άμεσης ακτινοβολίας, το οποίο επιπλέον σχετίζεται έντονα με την οπτική όχληση των χρηστών. Το μειονέκτημα των μεγεθών αυτών είναι ότι η χρήση τους προϋποθέτει μία σειρά υπολογισμών όπως αυτοί περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3, ώστε να εξαχθούν από τις τιμές της οριζόντιας ακτινοβολίας.

Στο Σχήμα 6-4 παρουσιάζονται για τους Χρήστες 1 και 3 (γραφεία με ΝΔ και ΒΑ προσανατολισμό αντίστοιχα) οι μέσες ημερήσιες καμπύλες της συνολικής κάθετης και της άμεσης ακτινοβολίας για διαστήματα με νεφροσκεπή, μερικώς νεφελώδη και καθαρό ουρανό.



Σχήμα 6-4 Μέσο ημερήσιο προφίλ της συνολικής κάθετης και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, στο σύνολο των δεδομένων, για τους χρήστες 1 και 3 για νεφροσκεπή, μερικώς νεφελώδη και καθαρό ουρανό.

Όλες οι παραπάνω είσοδοι θα χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές ασαφών συστημάτων και συγκεκριμένα θα εξεταστεί:

- ποιες από αυτές θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι υπόθεσης ή συμπεράσματος ή και τα δύο,
- πόσες θα είναι οι αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε είσοδο υπόθεσης, η μορφή, το κέντρο και το εύρος τους,
- ποιο είναι το μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου ως προς την πρόβλεψη της βέλτιστης εσωτερικής έντασης φωτισμού ανά πεντάλεπτο, και
- ποια είναι η μορφή και τα χαρακτηριστικά της παραγόμενης εσωτερικής έντασης φωτισμού και αν αυτά συνάδουν με τις βασικές αρχές του σχεδιασμού που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 6.1.

Με βάση τα παραπάνω θα επιλεγεί το αποδοτικότερο μοντέλο ασαφούς λογικής. Το μέσο σφάλμα δεν μπορεί να εξεταστεί ως απόλυτο μέγεθος, καθώς αυτό δεν μπορεί στην πραγματικότητα να αποδώσει την επάρκεια ή μη των εξεταζόμενων μοντέλων. Συγκεκριμένα, όπως θα αναλυθεί στην επόμενη Παράγραφο, μία τέτοια αποτίμηση θα ήταν



απλοϊκή και θα οδηγούσε πιθανώς σε λανθασμένα συμπεράσματα. Προς το στόχο αυτό, είναι αναγκαία η δημιουργία κατάλληλων μετρικών και σύνθετων κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγησή του μοντέλου.

#### **6.4 Καθορισμός του τρόπου αποτίμησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου ασαφούς λογικής**

Ένα μοντέλο πρόβλεψης ασαφούς λογικής διαμορφώνεται με βάση κάποια πρότυπα εκπαίδευσης και αποτιμάται από την απόδοσή του σε κάποια άλλα πρότυπα ενθύμησης. Κατά κανόνα, βέλτιστο θεωρείται ένα μοντέλο που παρουσιάζει το ελάχιστο σφάλμα στα πρότυπα ενθύμησης, είτε αναφερόμαστε στο μέσο απόλυτο σφάλμα, είτε στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα, είτε σε κάποιο ποσοστιαίο σφάλμα κλπ.

Έχει ιδιαίτερη σημασία το μοντέλο να είναι όσο το δυνατόν απλούστερο και με μικρό αριθμό παραμέτρων, έτσι ώστε να αποφεύγεται το ενδεχόμενο της υπερεκπαίδευσης και να εξασφαλίζεται η ικανότητα γενίκευσης του μοντέλου. Ειδικά στην περίπτωση του προτεινόμενου μοντέλου υπάρχει το τμήμα υπόθεσης όπου ο αριθμός των εισόδων NPI, ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής ανά είσοδο NMF και ο αριθμός των αρχικών κανόνων NR θα καθορίσουν το διαχωρισμό των προτύπων σε ασαφείς υποπεριοχές εντός του συνολικού διαστήματος υπόθεσης. Επίσης μπορεί να υπάρχει η δυνατότητα κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης να αφαιρούνται ή να προστίθενται νέοι κανόνες.

Πέρα από το τμήμα υπόθεσης πρέπει να επιλεγεί ο αριθμός των εισόδων NCI του τμήματος συμπεράσματος. Κάθε ένας από τους κανόνες NR θα εμπεριέχει διαφορετικά βάρη  $\lambda_{ij}$  για την συνάρτηση του τμήματος συμπεράσματος, το οποίο σημαίνει ότι στην εκάστοτε υποπεριοχή υπάρχει ένα διαφορετικό υπομοντέλο μεταξύ της εξόδου  $Y_j$  και του διανύσματος εισόδου  $\bar{x}_c$ .

Στα πλαίσια της διατριβής δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί για τις εισόδους του τμήματος υπόθεσης και συμπεράσματος καθώς και για τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου. Τα μοντέλα που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις θα παρουσιαστούν στην Παράγραφο 6.5. Ωστόσο, το είδος του προβλήματος που μελετάται απαιτεί τον περαιτέρω έλεγχο των αποτελεσμάτων αυτών με τη χρήση επιπρόσθετων κριτηρίων.

Ένα από αυτά τα κριτήρια αφορά στην μορφή του ημερήσιου προφίλ βέλτιστης έντασης φωτισμού που θα παράγει το μοντέλο ασαφούς λογικής. Η μορφή αυτή, όπως έχει καθοριστεί στους αρχικούς στόχους του σχεδιασμού, δεν πρέπει να έχει μία σταθερή τιμή αλλά να ακολουθεί όσο το δυνατόν την πραγματική μορφή της φυσικής έντασης φωτισμού που θα εισέρχονταν στον κάθε χώρο ανάλογα με τον προσανατολισμό του, δημιουργώντας συνθήκες που θα μιμούνται το φυσικό φως και θα εναρμονίζονται με τον κιρκάδιο ρυθμό των χρηστών. Για να αποτιμηθεί η επάρκεια των εξεταζόμενων μοντέλων θα συγκριθεί η μέση ημερήσια

καμπύλη των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών ανά εποχή ή ανάλογα με την κατάσταση του ουρανού και θα εξαχθεί το αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε υποπερίπτωση. Με αυτό τον τρόπο θα δίνεται η πλήρης εικόνα της απόδοσης του μοντέλου τόσο στις συνηθέστερες περιπτώσεις όσο και στις πιο σπάνιες (πχ. σε ώρες όπου οι χρήστες βρίσκονται σπανιότερα στο γραφείο).

Πίνακας 6-1 Εύρος εντάσεων φωτισμού και ποσοστά τιμών ανά Ζώνη Άνεσης για τους τρεις χρήστες.

	ZA-1	Ποσοστό τιμών στη ZA 1	ZA-2	Ποσοστό τιμών στη ZA-2	ZA-3	Ποσοστό τιμών στη ZA-3
Χρήστης 1	450 – 900 Lux	34.7%	290 – 1700 Lux	64.9%	210 – 2100 Lux	75.8%
Χρήστης 2	390 – 800 Lux	58.6%	220 – 1200 Lux	77.8%	170 – 1500 Lux	89.6%
Χρήστης 3	500 – 1000 Lux	34.2%	430 – 3100 Lux	61.4%	380 – 4000 Lux	72.7%

Ο επόμενος έλεγχος αποτελεί ίσως το βασικότερο κριτήριο επιλογής του βέλτιστου μοντέλου ανά χρήστη και αφορά στις τιμές της έντασης φωτισμού που αποδίδει το μοντέλο και στο κατά πόσο αυτές βρίσκονται εντός της ζώνης άνεσης του κάθε χρήστη. Αναλυτικότερα, έχοντας ως στόχο τη δημιουργία ενός προσωποποιημένου μοντέλου που θα παράγει τιμές έντασης φωτισμού, είναι απαραίτητο οι τιμές αυτές να τυγχάνουν της αποδοχής του κάθε χρήστη. Με το σκεπτικό αυτό θεωρείται ότι εάν οι τιμές που παράγει το μοντέλο βρίσκονται σε ένα εύρος τιμών μέσα στο οποίο δεν έχουν καταγραφεί ποτέ ή έχουν σπάνια καταγραφεί δράσεις ανοίγματος του τεχνητού φωτισμού ή κλεισίματος των περσίδων, υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες ο χρήστης να είναι ικανοποιημένος με τις τιμές αυτές. Επομένως, κάνοντας χρήση των πιθανοτικών καμπυλών συμπεριφοράς όπως αυτές δίνονται στα Σχήματα 4-6 και 4-7, προσδιορίζονται για τον κάθε χρήστη ξεχωριστά τρεις ζώνες άνεσης, η κάθε μία από τις οποίες αποτελεί επέκταση της προηγούμενης. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται η Ζώνη Άνεσης 1 (ZA-1), η οποία περιλαμβάνει το εύρος εντάσεων φωτισμού για το οποίο δεν καταγράφηκε ποτέ κάποια δράση από τον χρήστη, η Ζώνη Άνεσης 2 (ZA-2), η οποία επεκτείνει το εύρος της ZA-1 μέχρι τις τιμές έντασης φωτισμού όπου έχει καταγραφεί μόνο το 20% των δράσεων και τέλος η πιο διευρυμένη Ζώνη Άνεσης 3 (ZA-3), η οποία ως κάτω όριο έχει τις τιμές έντασης φωτισμού από το σημείο που καταγράφηκε το 50% και κάτω των δράσεων ανοίγματος φωτισμού και ως άνω όριο τις τιμές έντασης φωτισμού όπου καταγράφηκε το 50% των δράσεων κλεισίματος των περσίδων. Το εύρος των Ζωνών αυτών ανά χρήστη δίνεται στον Πίνακα 6-1 μαζί με το αντίστοιχο ποσοστό των

τιμών έντασης φωτισμού που ανήκουν στην κάθε κατηγορία. Οι τιμές αυτές αφορούν στα πραγματικά δεδομένα του συνόλου ενθύμησης, ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες εξόδους του ασαφούς μοντέλου πρόβλεψης.

Βάσει της παραπάνω ανάλυσης, τόσο στα πραγματικά δεδομένα έντασης φωτισμού όσο και στις αντίστοιχες εξόδους του μοντέλου, θα υπολογίζονται και θα παρουσιάζονται εκτός των άλλων και τα ποσοστά τιμών που συνδέονται με τις τρεις Ζώνες Άνεσης του κάθε χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πρόβλεψη του μοντέλου θα αντιστοιχίζεται σε μία από τις παρακάτω τέσσερις περιπτώσεις του Πίνακα 6-2 και οι τιμές που θα έχει το κάθε εξεταζόμενο μοντέλο στην κάθε κατηγορία θα συνεκτιμώνται για την αποτίμηση της επάρκειάς του. Όπως θα φανεί στην επόμενη παράγραφο, μοντέλα με παρόμοιο μέσο σφάλμα μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με βάση τα νέα κριτήρια που υιοθετήθηκαν. Παρατηρήθηκαν επίσης περιπτώσεις όπου μοντέλα με μεγαλύτερο μέσο σφάλμα από άλλα αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την βελτίωση της άνεσης και της δημιουργίας ενός αποδεκτού από τον χρήστη φωτισμού.

Πίνακας 6-2 Περιπτώσεις συνδυασμών πραγματικών τιμών και αντίστοιχων προβλέψεων.

Περίπτωση	Πραγματική Τιμή	Πρόβλεψη Μοντέλου	Χαρακτηρισμός
(I)	Εντός Ζώνης Άνεσης	Εντός Ζώνης Άνεσης	True Positive
(II)	Εκτός Ζώνης Άνεσης	Εντός Ζώνης Άνεσης	False Positive
(III)	Εντός Ζώνης Άνεσης	Εκτός Ζώνης Άνεσης	False Negative
(IV)	Εκτός Ζώνης Άνεσης	Εκτός Ζώνης Άνεσης	True Negative

Τα ποσοστά των τιμών έντασης φωτισμού των πραγματικών δεδομένων (στο σύνολο ενθύμησης) που βρίσκονται εντός της κάθε Ζώνης Άνεσης για τον κάθε χρήστη παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 6-1. Όσο αφορά στις υπόλοιπες τιμές (που βρίσκονται εκτός των Ζωνών αυτών), πρέπει να αποτυπωθεί η απόστασή τους από τα άνω ( $E_{\max}$ ) ή κάτω ( $E_{\min}$ ) όρια της κάθε Ζώνης. Για το σκοπό αυτό εισάγεται ένα τελευταίο κριτήριο το οποίο υπολογίζει την παραπάνω απόσταση ( $d_i$ ) για κάθε τιμή έντασης φωτισμού  $E_i$  από την Ζώνη Άνεσης ως εξής:

$$\begin{aligned}
 d_i &= E_{\min} - E_i, & \text{για } E_i < E_{\min} \\
 d_i &= E_i - E_{\max}, & \text{για } E_i > E_{\max} \\
 d_i &= 0 & , \text{ για } E_{\min} \leq E_i \leq E_{\max}
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

Για το σύνολο των τιμών έντασης φωτισμού των δεδομένων ενθύμησης υπολογίστηκε η Μέση Απόσταση από την κάθε Ζώνη Άνεσης, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-3. Ομοίως, οι αντίστοιχες Μέσες Αποστάσεις θα υπολογίζονται και για τις τιμές έντασης φωτισμού που

παράγει κάθε μοντέλο πρόβλεψης. Στην αποτίμηση του κάθε μοντέλου θα λαμβάνεται λοιπόν υπόψη θετικά η δυνατότητά του να παράγει προβλέψεις με μικρότερη Μέση Απόσταση από αυτή των πραγματικών τιμών.

Πίνακας 6-3 Μέση απόσταση των τιμών έντασης φωτισμού από την κάθε Ζώνη Άνεσης, ανά χρήστη.

	ZA-1	Μέση Απόσταση από τη ZA 1	ZA-2	Μέση Απόσταση από τη ZA 2	ZA-3	Μέση Απόσταση από τη ZA 3
Χρήστης 1	450 – 900 Lux	360 Lux	290 – 1700 Lux	129 Lux	210 – 2100 Lux	80.2 Lux
Χρήστης 2	390 – 800 Lux	92.2 Lux	220 – 1200 Lux	44.8 Lux	170 – 1500 Lux	9.9 Lux
Χρήστης 3	500 – 1000 Lux	198 Lux	430 – 3100 Lux	59.1 Lux	380 – 4000 Lux	30.9 Lux

## 6.5 Σύγκριση και αποτίμηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών του μοντέλου ασαφούς λογικής

Για κάθε έναν από τους τρεις χρήστες δοκιμάστηκαν διάφορα μοντέλα πρόβλεψης όπου κάθε φορά χρησιμοποιούνταν ορισμένες από τις βασικές μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 6.3 ως είσοδοι υπόθεσης ή συμπεράσματος. Επίσης διερευνήθηκε η σημασία του αρχικού αριθμού συναρτήσεων συμμετοχής ανά είσοδο υπόθεσης. Μεταξύ των πολλών δοκιμών που έγιναν, θα παρουσιαστούν ανά χρήστη οι περιπτώσεις εκείνες στις οποίες εμφανίστηκε το χαμηλότερο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα πρόβλεψης (στο σύνολο ενθύμησης) ενώ επιπρόσθετα θα εφαρμοστούν τα κριτήρια αποτίμησης που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 6.4.

Στους Πίνακες 6-4, 6-5 και 6-6 οι βασικές μεταβλητές υπόθεσης ή συμπεράσματος παρουσιάζονται με τα ακόλουθα σύμβολα: Ημέρα Έτους (*N*), Χρονική στιγμή της ημέρας σε πεντάλεπτο βήμα (*I*), Κατάσταση Ουρανού (*S*), Οριζόντια Ακτινοβολία (*G*), Συνολική Κάθετη (στο παράθυρο) Ακτινοβολία (*V*) και Άμεση Συνιστώσα της Κάθετης Ακτινοβολίας (*D*).

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των Πινάκων η Ημέρα του Έτους (*N*) και η χρονική στιγμή της ημέρας (*I*) πρέπει να χρησιμοποιούνται ως είσοδοι υπόθεσης, δηλαδή με βάση αυτές να γίνεται η υποδιαίρεση των προτύπων σε κατηγορίες (κανόνες), επειδή μέσω αυτών των μεταβλητών το μοντέλο αντιλαμβάνεται καλύτερα το ημερήσιο προφίλ της έντασης φωτισμού καθώς και τις εποχικές διαφοροποιήσεις του. Σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία ως τρίτη είσοδος υπόθεσης η οριζόντια ακτινοβολία η οποία σχετίζεται με τις επικρατούσες εξωτερικές συνθήκες αλλά και τις μεταβολές στην ώρα ανατολής και δύσης του ηλίου.

Ο αριθμός των εισόδων υπόθεσης αυξάνει εκθετικά την πολυπλοκότητα του μοντέλου για αυτό και συνήθως περιορίζεται στις δύο ή τρεις μεταβλητές. Αντίθετα, όσον αφορά στις εισόδους συμπεράσματος, δεν υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί για τον αριθμό τους. Έτσι δοκιμάστηκαν με διάφορους συνδυασμούς όλες οι μεταβλητές ακτινοβολίας ( $G$ ,  $V$ ,  $D$ ) οι οποίες έχουν γραμμική σχέση με την ένταση φωτισμού (διαφορετική εντός κάθε κανόνα) αλλά και οι υπόλοιπες μεταβλητές ( $N$ ,  $I$ ,  $S$ ).

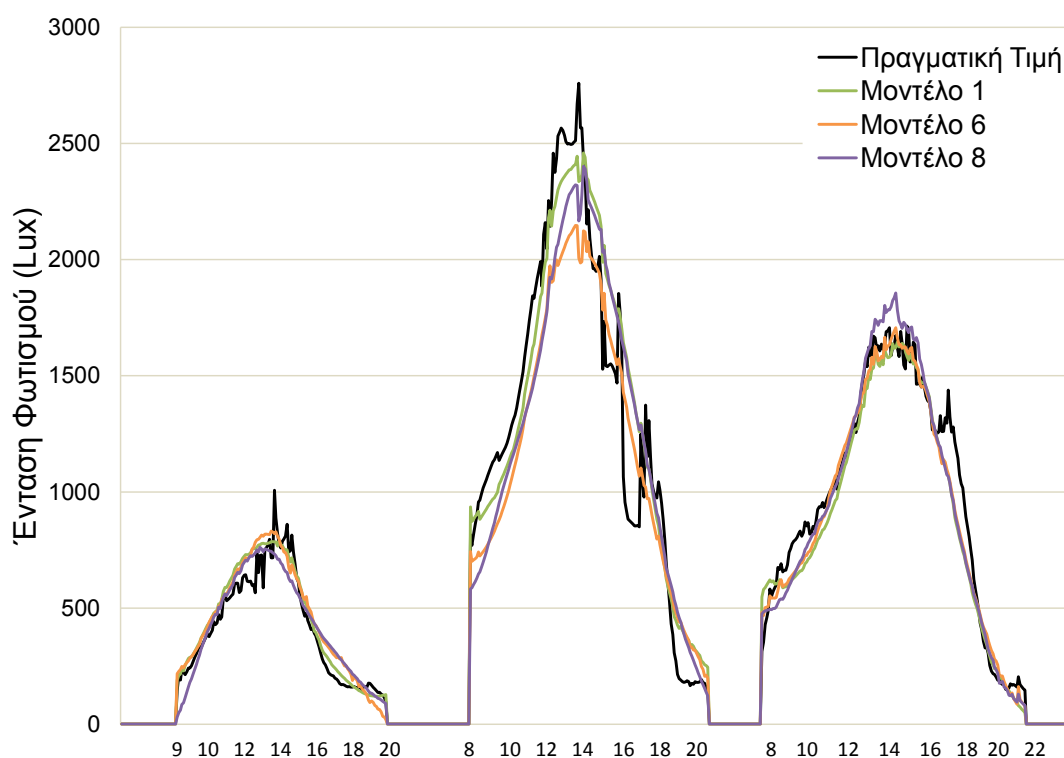
### 6.5.1 Αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης για τον Χρήστη 1

Στον Πίνακα 6-4 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα για 8 διαφορετικές εκδοχές του ασαφούς μοντέλου πρόβλεψης που παρουσίασαν τις μικρότερες τιμές στο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα Πρόβλεψης. Στις στήλες 2 και 3 φαίνονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο Τμήμα Υπόθεσης και στο Τμήμα Συμπεράσματος. Ακολουθούν το Μέσο Σφάλμα Πρόβλεψης του κάθε μοντέλου, το ποσοστό προβλεφθεισών τιμών έντασης φωτισμού που βρίσκονται εντός κάθε Ζώνης Άνεσης και οι Μέσες Αποστάσεις από τα όρια της κάθε ζώνης. Στην τελευταία γραμμή του Πίνακα σημειώνονται οι αντίστοιχες τιμές για τα πραγματικά δεδομένα του συνόλου ενθύμησης. Σε κάθε στήλη τα αποτελέσματα των μοντέλων επισημαίνονται με αυτόματη χρωματική κλίμακα από το περισσότερο επιτυχημένο (πράσινο) έως το λιγότερο επιτυχημένο (κόκκινο), ώστε να παρέχεται η δυνατότητα μίας άμεσης εποπτικής συναξιολόγησης των μοντέλων. Τα πραγματικά δεδομένα (στην τελευταία γραμμή του Πίνακα) εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα, καθώς όλα τα μοντέλα πρόβλεψης που παρουσιάζονται στον Πίνακα επιφέρουν σημαντική βελτίωση όσον αφορά τόσο στο ποσοστό τιμών εντός των Ζωνών Άνεσης όσο και στις μέσες αποστάσεις.

Πίνακας 6-4 Είσοδοι και αποτελέσματα των πιο επιτυχημένων εκδοχών του ασαφούς μοντέλου για τον Χρήστη 1.

α/α	Είσοδοι		Μέσο Σφάλμα (Lux)	Ζώνη Άνεσης 1		Ζώνη Άνεσης 2		Ζώνη Άνεσης 3	
	Υπόθεσης	Συμπεράσματος		Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση
1	$N,I,G$	$G,V,D$	353	45.4	240	78.4	56.4	86.9	25.8
2	$N,I,G$	$G,V,D,N,I$	356	40.0	265	75.4	69.9	84.4	35.0
3	$N,I,G$	$G,N,I$	361	43.3	261	77.8	71.3	87.5	40.6
4	$N,I$	$G,D$	362	40.9	256	75.9	59.4	84.9	25.7
5	$N,I$	$G,V,D$	363	38.0	273	73.8	65.2	84.6	32.0
6	$N,I,S$	$G,V,D$	373	44.3	223	80.8	45.3	88.7	18.0
7	$N,I,G$	$G$	376	35.1	246	75.8	37.0	92.5	9.9
8	$N,I$	$G$	383	45.1	246	79.2	57.7	86.3	26.5
Πραγματικά Δεδομένα				34.7	360	64.9	129	75.8	80.2

Για να παραχθεί κάθε πρόβλεψη ενός μοντέλου, υπολογίζεται με βάση τις τιμές των εισόδων υπόθεσης του προτύπου ο βαθμός συμμετοχής του σε έναν ή περισσότερους κανόνες. Στη συνέχεια αυτοί οι κανόνες συντίθενται και με βάση τις συναρτήσεις συμπεράσματος παράγουν μία τελική πρόβλεψη. Τα μοντέλα λοιπόν του Πίνακα παρουσιάζουν έντονη πολυπλοκότητα (κάθε μοντέλο έχει 11-23 κανόνες) και έτσι υπάρχει το ενδεχόμενο, παρά το χαμηλό μέσο σφάλμα, το μοντέλο να αστοχεί συστηματικά σε ορισμένες - όχι τόσο συνήθεις - περιπτώσεις. Για αυτόν τον λόγο εκτός από τα κριτήρια που φαίνονται στον Πίνακα θα εξεταστεί και η επάρκεια των μοντέλων όσον αφορά στη μορφή της ημερήσιας έντασης φωτισμού που αυτά παράγουν και κατά πόσο αυτή ακολουθεί την πραγματική ημερήσια καμπύλη και τις εποχικές διαφοροποιήσεις της. Στο Σχήμα 6-5 δίνεται το μέσο ημερήσιο προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού για τα πρότυπα του συνόλου ενθύμησης για τον Χρήστη 1, καθώς και οι αντίστοιχες προβλέψεις των μοντέλων 1, 6 και 8 του Πίνακα 6-4, επιμερισμένα στα τρία χρονικά διαστήματα: «χειμερινή περίοδος», «ενδιάμεση περίοδος» και «θερινή περίοδος» αντίστοιχα.

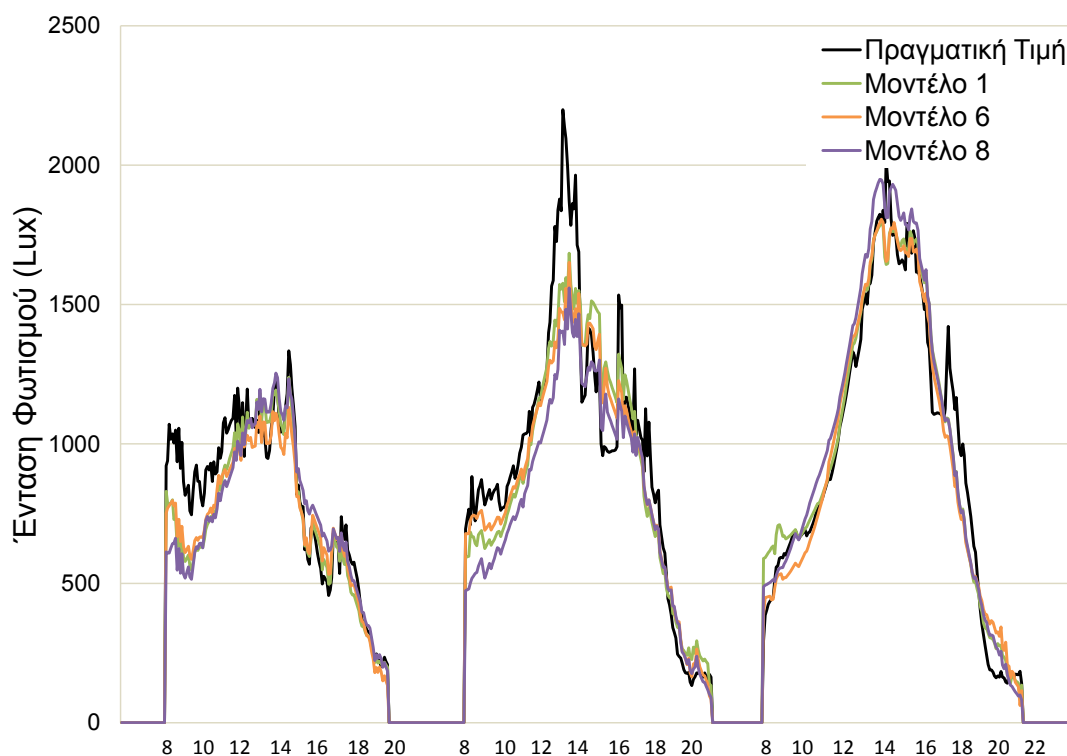


Σχήμα 6-5 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 6 και 8, για τον Χρήστη 1, για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και τη θερινή περίοδο (δεξιά).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-5, οι προβλέψεις των τριών μοντέλων συγκλίνουν μεταξύ τους και προσεγγίζουν την πραγματική καμπύλη για κάθε ώρα της ημέρας και εποχή του έτους. Μικρά προβλήματα εμφανίζονται στα μοντέλα 6 και 8 στο αριστερό και στο δεξί άκρο κάθε καμπύλης, όπου ουσιαστικά βρίσκονται οι μη συνήθεις ώρες άφιξης ή αναχώρησης των

χρηστών, για τις οποίες υπάρχουν λίγα δεδομένα στα σύνολα εκπαίδευσης και ενθύμησης. Ωστόσο το μοντέλο 1 δεν εμφανίζει συστηματικά τέτοιες αστοχίες.

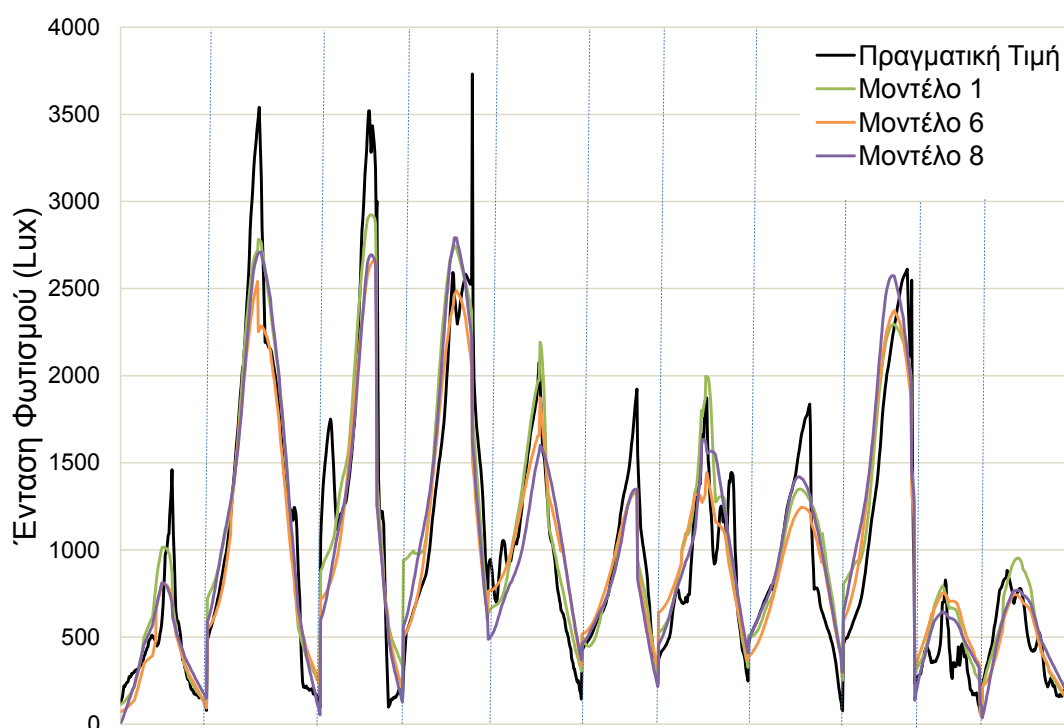
Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από το Σχήμα 6-6 όπου παρουσιάζονται τα μέσα ημερήσια προφίλ έντασης φωτισμού για τα πρότυπα του συνόλου ενθύμησης για τον Χρήστη 1 καθώς και οι αντίστοιχες προβλέψεις των μοντέλων 1, 6 και 8 του Πίνακα 6-4, χωρισμένα βάσει της κατάστασης του ουρανού που είχε καταγραφεί για τις ημέρες των αντίστοιχων μετρήσεων.



Σχήμα 6-6 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 6 και 8, για τον Χρήστη 1, για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά).

Οι καμπύλες των Σχημάτων 6-5 και 6-6, αφορούν μέσες μορφές είτε ανά εποχή είτε ανά κατάσταση ουρανού. Ωστόσο οι πραγματικές καμπύλες της έντασης φωτισμού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ διαδοχικών ημερών, όχι μόνο λόγω των εξωτερικών συνθηκών αλλά και λόγω των δράσεων του χρήστη. Η ποικιλία των μορφών των καμπυλών έντασης φωτισμού (η οποία έχει αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 2), φαίνεται ενδεικτικά και στο Σχήμα 6-7 όπου συγκρίνονται οι πραγματικές καμπύλες έντασης φωτισμού με τις αντίστοιχες προβλέψεις των τριών μοντέλων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών (μόνο για ώρες παρουσίας του χρήστη), που περιέχει ημέρες από διαφορετικές εποχές, καταστάσεις ουρανού κλπ. Στο Σχήμα αυτό διακρίνεται η δυνατότητα των μοντέλων να παράγουν προβλέψεις οι οποίες παρουσιάζουν ποικιλία μορφών ανάλογα με τις αντίστοιχες εισόδους, προσεγγίζουν τις πραγματικές καμπύλες, η δε μορφή τους έχει το πλεονέκτημα ότι είναι συνήθως ομαλή, χωρίς έντονες και απότομες μεταβολές. Ημέρες κατά τις οποίες υπήρχε για

μικρό χρονικό διάστημα πολύ έντονη ένταση φωτισμού στο χώρο (ίσως μέχρι να την περιορίσει ο χρήστης κλείνοντας τις περσίδες) αντιμετωπίζονται με επιτυχία από το μοντέλο το οποίο αυξάνει την ένταση φωτισμού χωρίς ωστόσο να εμφανίζει τις ίδιες αιχμές που θα είχαν σαν αποτέλεσμα την όχληση του χρήστη. Σημαντικό είναι να γίνει κατανοητό ότι εάν ο προτεινόμενος αλγόριθμος ενσωματωθεί σε ένα σύστημα διαχείρισης φωτισμού είναι απαραίτητο αυτός να ρυθμίζει τα επίπεδα έντασης φωτισμού βασιζόμενος στις επιθυμίες του κάθε χρήστη, χωρίς ωστόσο να εμφανίζει έντονες αστάθειες οι οποίες σίγουρα θα προκαλούσαν την όχλησή του.

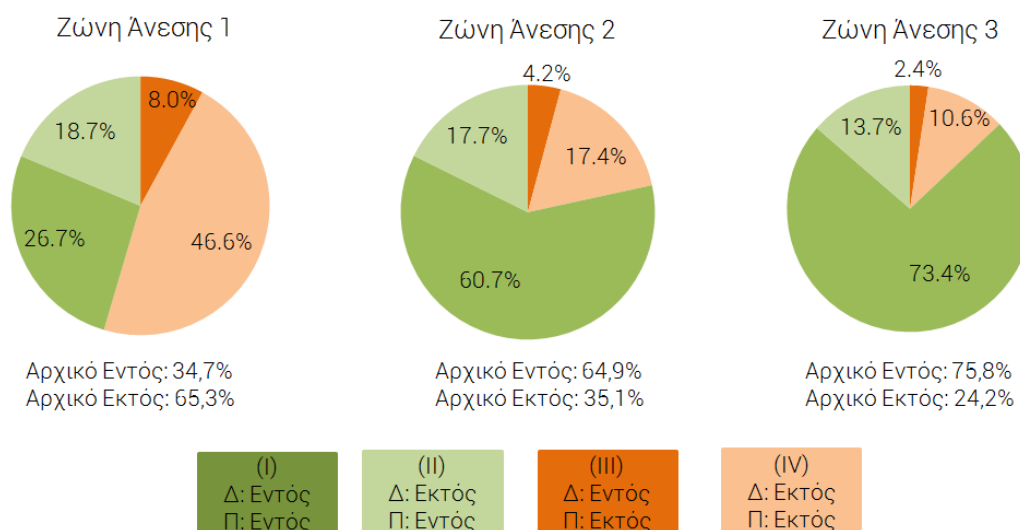


Σχήμα 6-7 Σύγκριση δεδομένων έντασης φωτισμού και αντίστοιχων προβλέψεων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, για τρεις εκδοχές του μοντέλου ασαφούς λογικής για τον Χρήστη 1.

Όσον αφορά στα επιμέρους αποτελέσματα σχετικά με τις περιπτώσεις του Πίνακα 6-2, αυτά παρουσιάζονται για το μοντέλο 1 ανά ζώνη άνεσης στα παρακάτω κυκλικά διαγράμματα (pie charts). Κάτω από κάθε διάγραμμα σημειώνονται τα ποσοστά στα πραγματικά δεδομένα ενθύμησης που βρίσκονταν εκτός και εκτός της κάθε Ζώνης Άνεσης. Μέσα στο κάθε κυκλικό διάγραμμα εμφανίζονται οι περιπτώσεις όπου τα δεδομένα (Δ) ήταν εντός της ΖΑ και η πρόβλεψη (Π) του μοντέλου ήταν επιτυχημένη (παρέμειναν δηλαδή εντός, True Positive), οι περιπτώσεις για τις οποίες τα δεδομένα ήταν εκτός της ΖΑ και η πρόβλεψη του μοντέλου ήταν επίσης εκτός (True Negative), καθώς και οι δύο επιμέρους κατηγορίες όπου το μοντέλο κατάφερε να προβλέψει τιμές εντός της ΖΑ αν και τα πραγματικά δεδομένα ήταν εκτός (False



Positive), μαζί με τις περιπτώσεις σφάλματος του μοντέλου για τις οποίες αν και οι τιμές των δεδομένων ήταν εντός της ΖΑ η πρόβλεψη αστόχησε, βγάζοντάς τες εκτός (False Negative).



Σχήμα 6-8 Επιμέρους αποτελέσματα ανά Ζώνη Άνεσης για το μοντέλο 1 του Χρήστη 1.

Τα ποσοστά των προβλέψεων που ανήκουν στην κατηγορία (II), False Positive, εκπροσωπούν περιπτώσεις όπου η αστοχία του μοντέλου πρόβλεψης έχει θετικό πρόσημο, δηλ. αποδίδει τιμές που ικανοποιούν την αίσθηση άνεσης του χρήστη. Αντίθετα, στην κατηγορία (III), False Negative, η πρόβλεψη όχι μόνο αποκλίνει από την πραγματικά τιμή αλλά επιπλέον ανάλογα με την απόστασή της  $d_i$  από τα όρια της ΖΑ, αυξάνει την πιθανότητα όχλησης του χρήστη. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-8 τα ποσοστά της κατηγορίας (III) είναι πάντα πολύ μικρά, η δε διαφορά μεταξύ της κατηγορίας (II) και της κατηγορίας (III) είναι πάντα θετική, γεγονός που δείχνει συνολικά το μοντέλο καταφέρνει να αυξήσει τις τιμές που βρίσκονται εντός της κάθε ΖΑ.

### 6.5.2 Αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης για τον Χρήστη 2

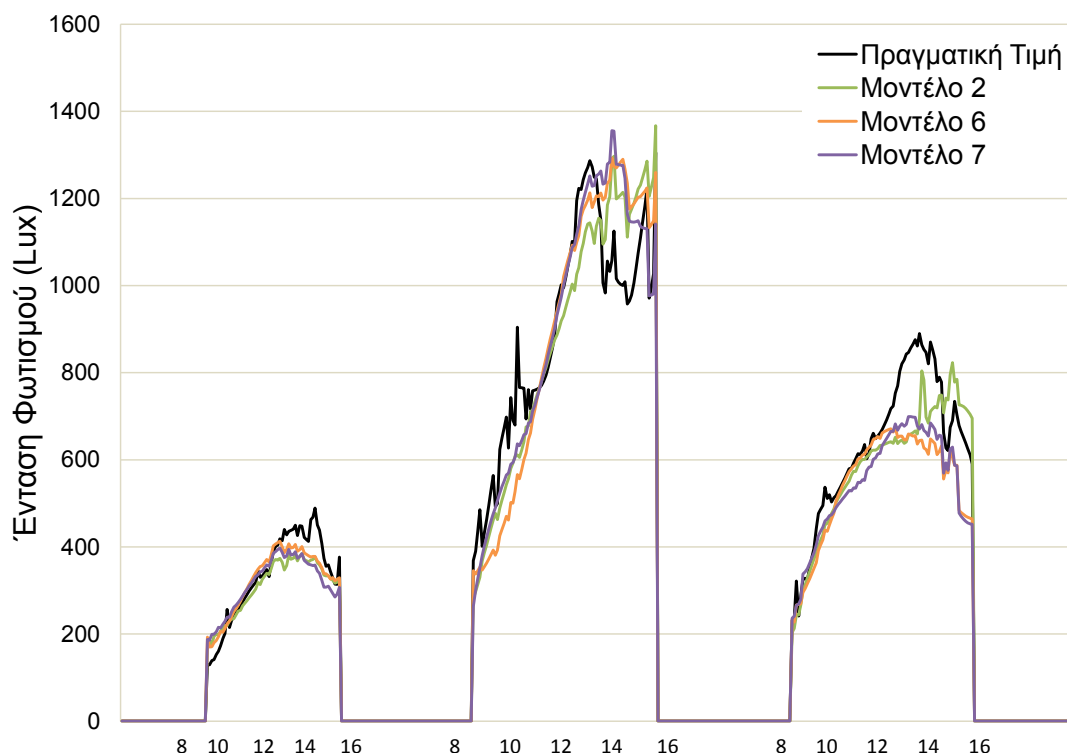
Αντίστοιχα με τον Χρήστη 1, στον Πίνακα 6-5 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα για τον Χρήστη 2 τα αποτελέσματα για 8 διαφορετικές εκδοχές του ασαφούς μοντέλου πρόβλεψης, συγκεκριμένα οι περιπτώσεις που παρουσίασαν τις μικρότερες τιμές στο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα. Παρατίθενται επίσης τα αποτελέσματα από τα υπόλοιπα κριτήρια ελέγχου που εφαρμόστηκαν σε αυτές. Τα πραγματικά δεδομένα (στην τελευταία γραμμή του Πίνακα) εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση με κόκκινο χρώμα καθώς όλα τα μοντέλα πρόβλεψης που παρουσιάζονται στον Πίνακα επιφέρουν σημαντική βελτίωση όσον αφορά τόσο στο ποσοστό τιμών εντός των Ζωνών Άνεσης όσο και στις μέσες αποστάσεις. Παρατηρείται επίσης ότι τα μοντέλα 1 και 2 εμφάνισαν ακριβώς το ίδιο μέσο σφάλμα, εντούτοις εμφανίζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με την απόδοσή τους στα επιπρόσθετα

κριτήρια. Το μοντέλο 2 εμφανίζεται πιο επιτυχημένο σε όλες αυτές τις κατηγορίες σε σχέση με το μοντέλο 1. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει την αναγκαιότητα χρήσης των επιπλέον κριτηρίων στην αποτίμηση των μοντέλων αυτών. Μία άλλη παρατήρηση αφορά στο πολύ μεγάλο ποσοστό τιμών που επιτυγχάνονται εντός της ΖΑ3 για τον χρήστη 2, μαζί με την πολύ μικρή τιμή των αντίστοιχων μέσων αποστάσεων (0.9 έως 6.8 Lux). Φυσικά είναι μεγάλο και το ποσοστό τιμών εντός της συγκεκριμένης Ζώνης στα πραγματικά δεδομένα (89.5%, με μέση απόσταση 9.9 Lux), ωστόσο το μοντέλο πρόβλεψης βελτιώνει και τις δύο τιμές. Σημαντικό είναι να επισημανθεί, ότι όπως θα φανεί και από τις μέσες ημερήσιες μορφές ανά εποχή και ανά κατάσταση ουρανού που ακολουθούν, τα μοντέλα καταφέρνουν τα παραπάνω ποσοστά όχι προβλέποντας μία σταθερή τιμή έντασης φωτισμού (εντός της ζώνης) αλλά προσαρμοζόμενα στις τρέχουσες κάθε φορά συνθήκες.

Πίνακας 6-5 Είσοδοι και αποτελέσματα των πιο επιτυχημένων εκδοχών του ασαφούς μοντέλου για τον Χρήστη 2.

α/α	Είσοδοι		Μέσο Σφάλμα (Lux)	Ζώνη Άνεσης 1		Ζώνη Άνεσης 2		Ζώνη Άνεσης 3	
	Υπόθεσης	Συμπεράσματος		Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση
1	N,I	G,D	187	63.5	66	85.4	26.7	96.9	3.8
2	N,I	G,V,D,S	187	72.5	44	90.7	16.7	97.9	1.3
3	N,I	G,S	190	70.1	54	87.4	21.8	97.9	0.9
4	N,I	G	192	71.4	56	89.1	28.3	95.6	6.2
5	N,I	V	192	70.4	74	87.8	33.1	96.3	6.8
6	N,I,G	V,D,I	192	64.0	60	83.5	27.3	94	4.6
7	N,I	G,I	195	69.8	53	88.1	20.9	97.1	2.2
8	N,I	G,D,I	199	70.8	50	89.3	19.7	97.9	0.9
Πραγματικά Δεδομένα				58.6	92.2	77.8	44.8	89.5	9.9

Τα μοντέλα του Πίνακα παρουσιάζουν και πάλι μεγάλη πολυπλοκότητα (κάθε μοντέλο έχει 10-27 κανόνες) και γι' αυτό εξετάζεται και πάλι η μέση μορφή της προβλεπόμενης ημερήσιας καμπύλης συναρτήσει της εποχής (Σχήμα 6-9) και της κατάστασης του ουρανού (Σχήμα 6-10). Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται οι καμπύλες που αφορούν στα πραγματικά δεδομένα καθώς και ενδεικτικά οι προβλέψεις τριών από τα μοντέλα του Πίνακα 6-5 (συγκεκριμένα τα 2, 6 και 7).

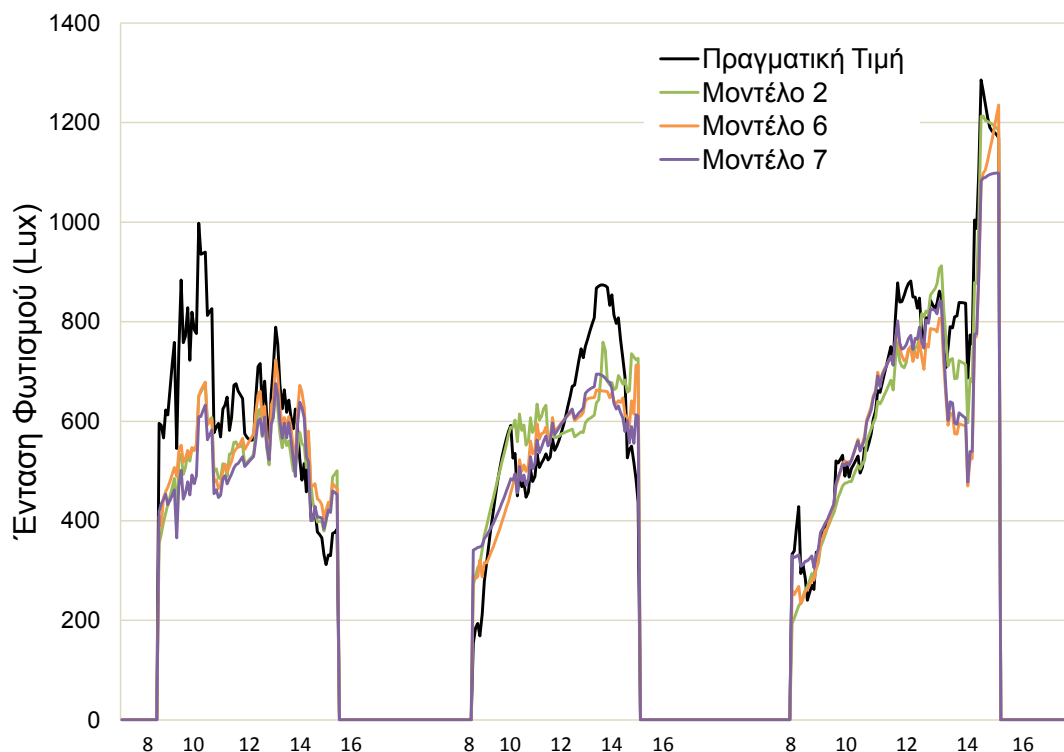


Σχήμα 6-9 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 2, 6 και 7, για τον Χρήστη 2, για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και τη θερινή περίοδο (δεξιά).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-9, οι προβλέψεις των τριών μοντέλων συγκλίνουν μεταξύ τους και προσεγγίζουν την πραγματική καμπύλη για κάθε ώρα της ημέρας και εποχή του έτους. Κατά τη θερινή περίοδο, η μέση προβλεπόμενη από τα μοντέλα τιμή έντασης φωτισμού κινείται χαμηλότερα από την αντίστοιχη μέση καμπύλη των δεδομένων, χωρίς ωστόσο οι προβλέψεις να βρίσκονται έξω από τη ζώνη άνεσης του συγκεκριμένου χρήστη. Επιπλέον μικρές αστοχίες κατά τις ώρες άφιξης και αναχώρησης του χρήστη, που παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση (Χρήστης 1), δεν εμφανίζονται εδώ λόγω του περισσότερο σταθερού ωραρίου εργασίας που τηρεί ο Χρήστης αυτός.

Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από το Σχήμα 6-10 όπου παρουσιάζονται τα μέσα ημερήσια προφίλ έντασης φωτισμού για τα πρότυπα του συνόλου ενθύμησης για τον Χρήστη 2, καθώς και οι αντίστοιχες προβλέψεις των μοντέλων 2, 6 και 7 του Πίνακα 6-5, διαχωρισμένα βάσει της κατάστασης του ουρανού που είχε καταγραφεί για τις αντίστοιχες μετρήσεις. Τα μοντέλα ακολουθούν πολύ ικανοποιητικά την μέση καμπύλη της έντασης φωτισμού για τις ημέρες με καθαρό ουρανό, ενώ αστοχία εμφανίζεται κατά τις πρωινές ώρες των ημερών με νεφοσκεπή ουρανό. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αριθμός τέτοιων προτύπων στο σύνολο ενθύμησης είναι μικρός, οι δε τιμές τους διαφοροποιούνται από αυτές του συνόλου εκπαίδευσης, όπως φαίνεται και στη συνολική μέση μορφή της έντασης φωτισμού (Σχήμα 6-2), όπου τις πρωινές ώρες των ημερών με νεφοσκεπή ουρανό δεν εμφανίζονται τόσο υψηλές τιμές. Παρατηρείται επίσης ότι για τις ημέρες με νεφοσκεπή

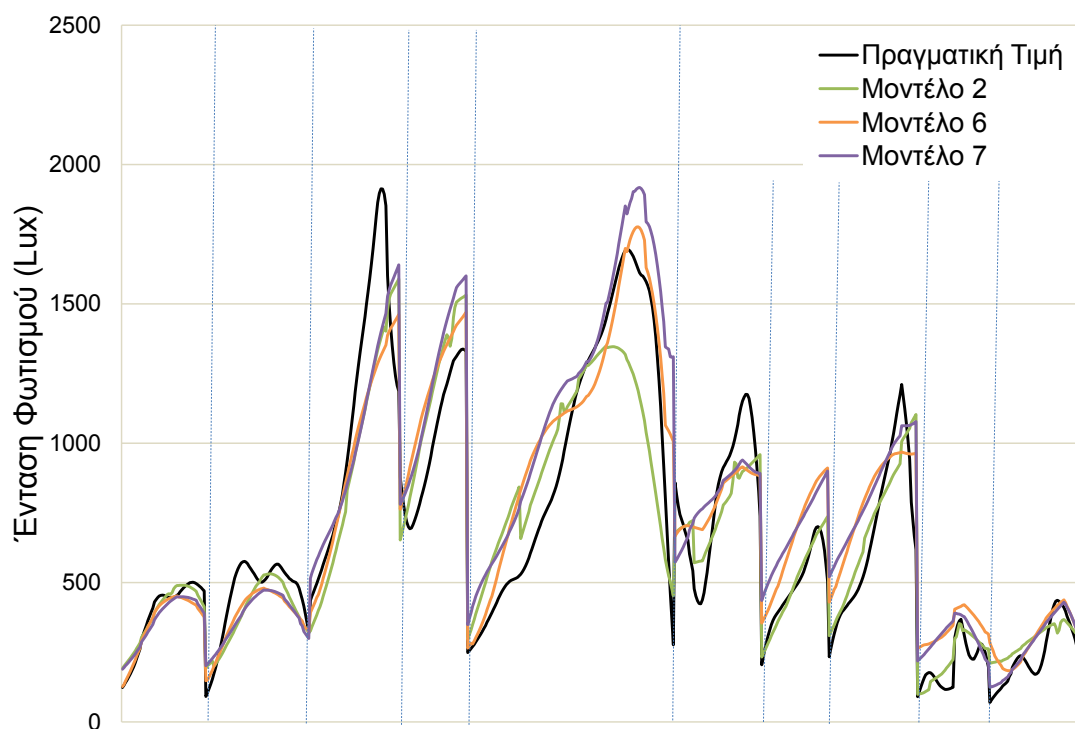
ουρανό, τόσο οι προβλέψεις όσο και τα πραγματικά δεδομένα παρουσιάζουν καμπύλες με χαμηλές και κυμαινόμενες μορφές, ενώ για τις ημέρες με περισσότερη ηλιοφάνεια οι μέσες μορφές τόσο για τα πραγματικά δεδομένα όσο και για τις προβλέψεις είναι περισσότερο ομαλές.



Σχήμα 6-10 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 2, 6 και 7, για τον Χρήστη 2, για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά).

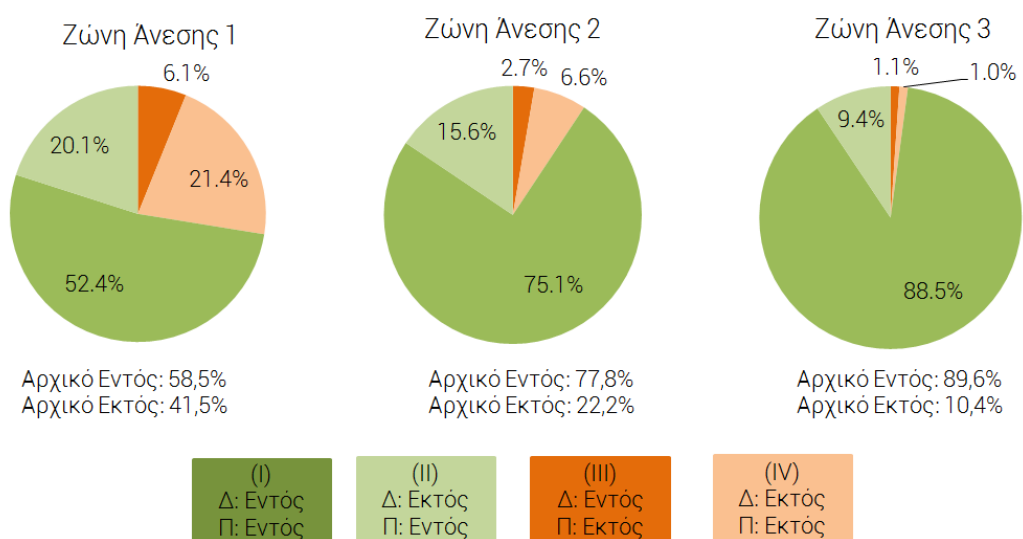
Στο Σχήμα 6-11 συγκρίνονται οι πραγματικές καμπύλες έντασης φωτισμού με τις αντίστοιχες προβλέψεις των τριών μοντέλων (μόνο για τις ώρες παρουσίας του χρήστη) για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, που περιέχει ημέρες από διαφορετικές εποχές, καταστάσεις ουρανού κλπ. Στο Σχήμα αυτό διακρίνεται η δυνατότητα των μοντέλων να παράγουν προβλέψεις οι οποίες παρουσιάζουν ποικιλία μορφών ανάλογα με τις αντίστοιχες εισόδους, προσεγγίζουν τις πραγματικές καμπύλες, χωρίς έντονες και απότομες μεταβολές οι οποίες θα γίνονταν δύσκολα αποδεκτές από τον κάθε χρήστη.

Μπορεί επίσης κανείς να διακρίνει την επίδραση που έχει στη μορφή των προβλέψεων η πολυπλοκότητα του μοντέλου. Το μοντέλο 2 που έχει 2 εισόδους υπόθεσης, 4 εισόδους συμπεράσματος και συνολικά 23 κανόνες παράγει ημερήσιες μορφές με πιο έντονες αυξομειώσεις, προσπαθώντας να παρακολουθήσει καλύτερα την πραγματική καμπύλη. Αντίθετα, το μοντέλο 7 (το οποίο έχει δύο εισόδους υπόθεσης, δύο εισόδους συμπεράσματος και μόλις 10 κανόνες) παράγει προβλέψεις που είναι πιο απλές και σχεδόν γραμμικές, χωρίς ωστόσο να αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματικότητα.



Σχήμα 6-11 Σύγκριση δεδομένων έντασης φωτισμού και αντίστοιχων προβλέψεων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, για τρεις εκδοχές του μοντέλου ασαφούς λογικής για τον Χρήστη 2.

Όσον αφορά στα επιμέρους αποτελέσματα σχετικά με τις περιπτώσεις του Πίνακα 6-2, αυτά παρουσιάζονται για το μοντέλο 2 ανά ζώνη άνεσης στα κυκλικά διαγράμματα του Σχήματος 6-12.



Σχήμα 6-12 Επιμέρους αποτελέσματα ανά Ζώνη Άνεσης για το μοντέλο 2 του Χρήστη 2.

Τα ποσοστά των προβλέψεων της κατηγορίας (III), False Negative, δηλαδή οι περιπτώσεις όπου η πρόβλεψη αστοχεί και βγάζει εκτός ορίων άνεσης τιμές που αρχικά ήταν εντός της κάθε ΖΑ, είναι πολύ μικρά (από 1.1 έως 6.1%). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι αντίστοιχες αποστάσεις των τιμών αυτών από το όρια της κάθε ζώνης έδειξαν ότι οι αστοχίες αυτές στην πλειοψηφία τους δεν είναι σημαντικές, αφού οι τιμές πρόβλεψης ήταν κοντά στα προαναφερθέντα όρια. Παράλληλα, τα ποσοστά της κατηγορίας (II), False Positive, είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά της κατηγορίας (III), αποδεικνύοντας την ικανότητα του μοντέλου να αυξάνει συνολικά τις τιμές που βρίσκονται εντός της κάθε ΖΑ. Όπως φαίνεται από το τρίτο κυκλικό διάγραμμα, στην ΖΑ3 το μοντέλο πρόβλεψης άφησε εκτός ορίων μόνο το 2.1% των τιμών, δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις για ένα άνετο περιβάλλον εργασίας με περιορισμένες πιθανότητες παρέμβασης του χρήστη στη ρύθμιση του φωτισμού του.

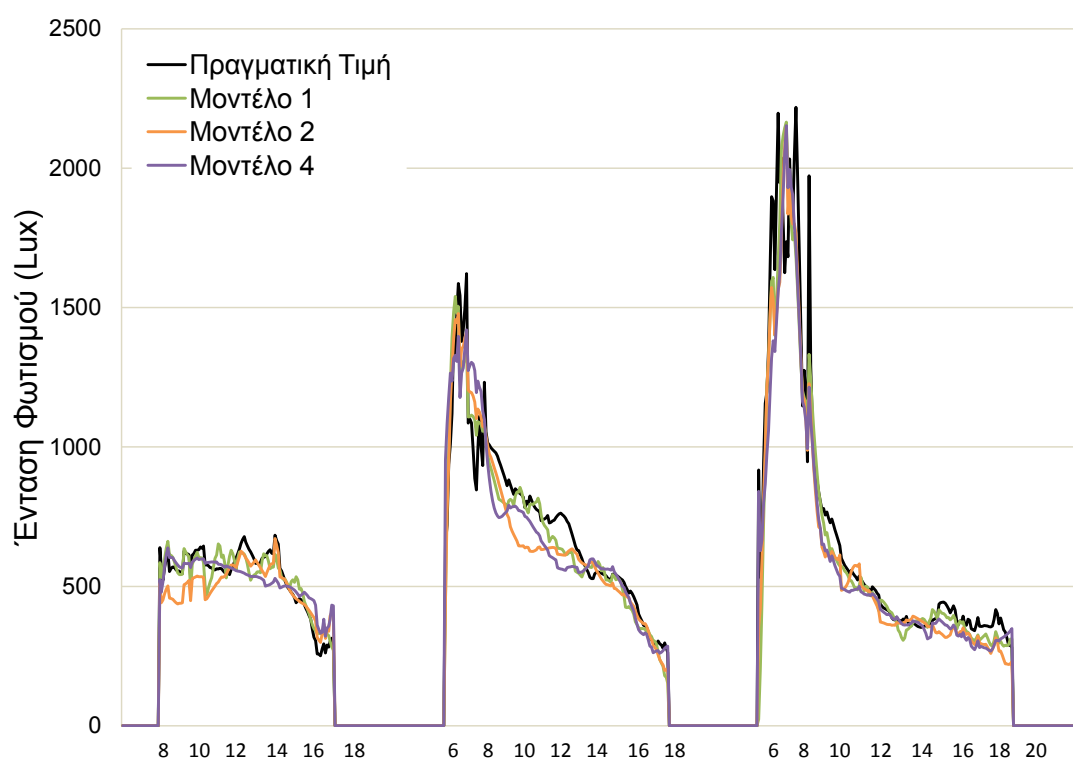
### **6.5.3 Αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης για τον Χρήστη 3**

Όμοια με τις παραπάνω περιπτώσεις, παρουσιάζονται για τον Χρήστη 3 συγκεντρωμένα στον Πίνακα 6-6 τα αποτελέσματα για 8 διαφορετικές εκδοχές του ασαφούς μοντέλου πρόβλεψης και συγκεκριμένα αυτές με το μικρότερο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα Πρόβλεψης. Παρατίθενται επίσης τα αποτελέσματα για τα υπόλοιπα κριτήρια ελέγχου που εφαρμόστηκαν σε αυτές. Για μία ακόμη φορά, τα πραγματικά δεδομένα (στην τελευταία γραμμή του Πίνακα) εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα, καθώς όλα τα μοντέλα πρόβλεψης που παρουσιάζονται στον Πίνακα επιφέρουν σημαντική βελτίωση όσον αφορά τόσο στο ποσοστό τιμών εντός των Ζωνών Άνεσης όσο και στις μέσες αποστάσεις. Το μοντέλο 1 το οποίο παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα πρόβλεψης είναι και το πιο περίπλοκο αφού έχει 3 εισόδους υπόθεσης, 5 εισόδους συμπεράσματος και συνολικά 27 κανόνες, δίνει καλά αποτελέσματα για τις ΖΑ1 και ΖΑ2, ωστόσο εμφανίζει αδυναμίες στην ΖΑ3. Αντίθετα το μοντέλο 5 που εμφανίζει μεγαλύτερο μέσο σφάλμα αλλά είναι απλούστερο (2 εισόδοι υπόθεσης, 2 εισόδοι συμπεράσματος και μόλις 9 κανόνες) αποδίδει ικανοποιητικά σε όλα τα επιπρόσθετα κριτήρια. Το μοντέλο 8, με το μεγαλύτερο μέσο σφάλμα, εμφανίζει την καλύτερη απόδοση από όλα τα μοντέλα στα επιμέρους κριτήρια, ωστόσο εμφανίζει αδυναμίες στην ημερήσια καμπύλη πρόβλεψης.

Τα μοντέλα του Πίνακα παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις ως προς την πολυπλοκότητά τους (τα μοντέλα έχουν από 9 ως 40 κανόνες). Εξετάζεται και πάλι η μέση μορφή της προβλεπόμενης ημερήσιας καμπύλης συναρτήσει της εποχής (Σχήμα 6-13) και της κατάστασης του ουρανού (Σχήμα 6-14). Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται οι καμπύλες που αφορούν τα πραγματικά δεδομένα καθώς και ενδεικτικά οι προβλέψεις τριών από τα μοντέλα του Πίνακα 6-6 (συγκεκριμένα τα μοντέλα 1, 2 και 4).

Πίνακας 6-6 Είσοδοι και αποτελέσματα των πιο επιτυχημένων εκδοχών του ασαφούς μοντέλου για τον Χρήστη 3.

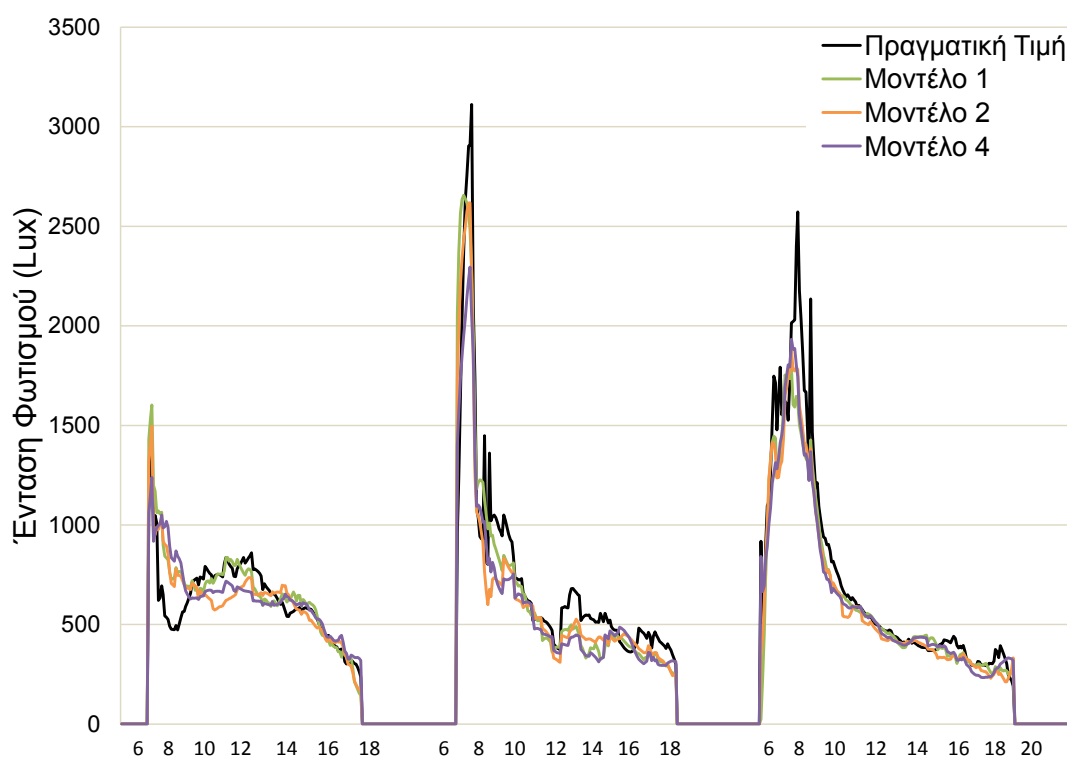
α/α	Είσοδοι		Ζώνη Άνεσης 1			Ζώνη Άνεσης 2		Ζώνη Άνεσης 3	
	Υπόθεσης	Συμπεράσματος	Μέσο Σφάλμα (Lux)	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση	Ποσοστό προβλέψεων εντός	Μέση απόσταση
1	N,I,G	G,V,D,N,I	225	41.4	143	66	49.8	73.8	28.6
2	N,I	G,V,I	242	42.0	142	64.5	50.3	77	30.2
3	N,I	G,V,D,N,I	245	41.0	142	63.8	48.1	76.1	27.0
4	N,I	G,V,N,I	247	42.1	131	64.5	36.0	78.8	15.7
5	N,I	G,V	247	42.7	127	65.9	44.0	76.9	24.1
6	N,I,G	G,V,N,I	249	38.5	139	63.7	48.8	75.6	27.5
7	N,I	V,I	260	40.8	146	66.1	47.6	76.1	27.6
8	N,I	G,I	266	46.1	108	68.8	36.9	81.4	19.5
Πραγματικά Δεδομένα				34.2	198	61.4	59.1	72.7	30.9



Σχήμα 6-13 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 2 και 4, για τον Χρήστη 3, για τη χειμερινή (αριστερά), την ενδιάμεση (κέντρο) και τη θερινή περίοδο (δεξιά).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-13, οι προβλέψεις των τριών μοντέλων συγκλίνουν μεταξύ τους και προσεγγίζουν την αντίστοιχη πραγματική καμπύλη για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε εποχή του έτους. Η χαρακτηριστική αυτή μορφή της ημερήσιας καμπύλης έντασης φωτισμού οφείλεται στον Βορειοανατολικό προσανατολισμό του γραφείου και στο γεγονός

ότι ο Χρήστης 3 κατά κανόνα βρίσκεται στο γραφείο του κατά την ώρα ανατολής του ηλίου. Οι πολύ υψηλές τιμές έντασης φωτισμού δεν εμφανίζονται κατά τη χειμερινή περίοδο λόγω της διαφορετικής τροχιάς του ηλίου. Στο Σχήμα 6-14 παρουσιάζονται τα μέσα ημερήσια προφίλ έντασης φωτισμού για τις πραγματικές τιμές και τις αντίστοιχες προβλέψεις των μοντέλων 1, 2 και 4 του Πίνακα 6-6, διαχωρισμένα βάσει της κατάστασης του ουρανού. Τα μοντέλα ακολουθούν πολύ ικανοποιητικά την μέση καμπύλη της έντασης φωτισμού σε όλες τις περιπτώσεις. Είναι χαρακτηριστικό ότι τις ημέρες με καθαρό ουρανό κατά την ανατολή του ηλίου ο χρήστης κάνει συχνότερη χρήση των περσίδων οδηγώντας σε ένταση φωτισμού χαμηλότερη σε σχέση με τις νεφελώδεις ημέρες.



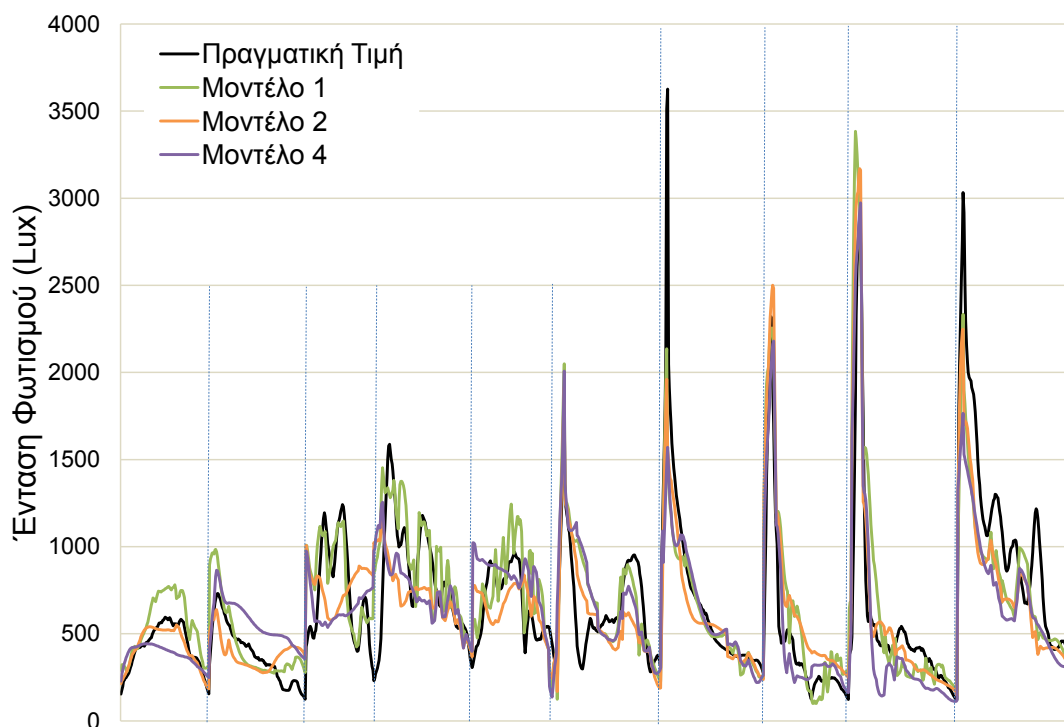
Σχήμα 6-14 Σύγκριση του μέσου ημερήσιου προφίλ της εσωτερικής έντασης φωτισμού των πρότυπων του συνόλου ενθύμησης και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων 1, 2 και 4, για τον Χρήστη 3, για νεφосκεπή (αριστερά), μερικώς νεφελώδη (κέντρο) και καθαρό ουρανό (δεξιά).

Καθώς οι μέσες μορφές των Σχημάτων 6-13 και 6-14 δεν δείχνουν κάποια συστηματική αστοχία ή ιδιαίτερη διαφοροποίηση μεταξύ των τριών μοντέλων, στο Σχήμα 6-15 συγκρίνονται οι πραγματικές καμπύλες έντασης φωτισμού με τις αντίστοιχες προβλέψεις τους για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών που περιέχει ημέρες από διαφορετικές εποχές, καταστάσεις ουρανού κλπ. Στο Σχήμα αυτό διακρίνονται η πολυμορφία των πραγματικών καμπυλών έντασης φωτισμού καθώς και η ποικιλία στις προβλέψεις των μοντέλων ανάλογα με τις αντίστοιχες εισόδους και τον αριθμό των κανόνων.

Το μοντέλο 1 που έχει τις περισσότερες εισόδους υπόθεσης και συμπεράσματος καθώς και τους περισσότερους κανόνες (27) παρουσιάζει πιο έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια ημερών με αυξομειώσεις της ακτινοβολίας. Τα άλλα δύο μοντέλα εμφανίζουν πιο

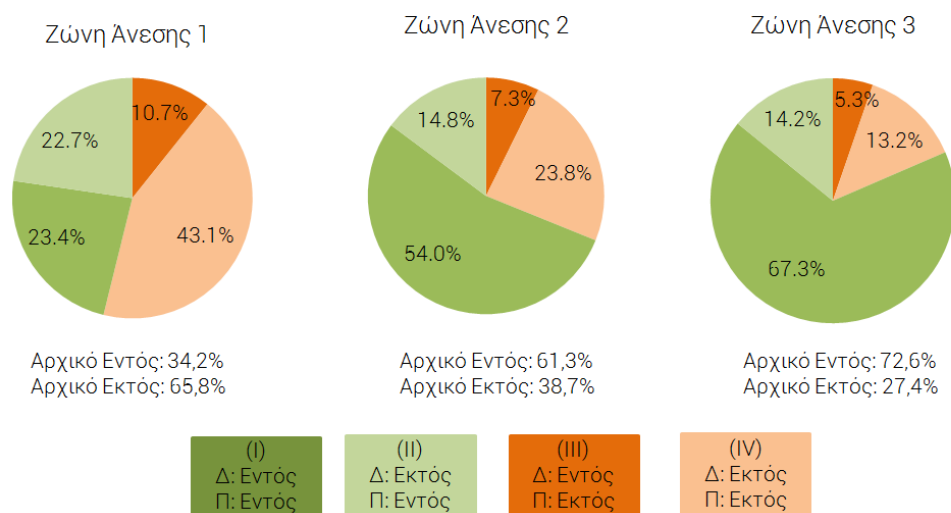


ομαλές μορφές σε εκείνες τις ημέρες. Ωστόσο, σε ημέρες με πιο υψηλή ακτινοβολία τα μοντέλα συγκλίνουν.



Σχήμα 6-15 Σύγκριση δεδομένων έντασης φωτισμού και αντίστοιχων προβλέψεων για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 10 ημερών, για τρεις εκδοχές του μοντέλου ασαφούς λογικής για τον Χρήστη 3.

Τα επιμέρους αποτελέσματα σχετικά με τις περιπτώσεις του Πίνακα 6-2, παρουσιάζονται τέλος για το μοντέλο 8 ανά ζώνη άνεσης στα κυκλικά διαγράμματα του Σχήματος 6-16. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, ο Χρήστης 3 έχει αρκετά μεγάλο ποσοστό δεδομένων εκτός της ΖΑ1, λόγω κυρίως των μεγάλων τιμών έντασης φωτισμού που εμφανίζονται κατά τα χρονικά διαστήματα της ανατολής του ηλίου, ενώ στη συνέχεια η ένταση φωτισμού μειώνεται απότομα και διατηρείται συνήθως σε σταθερά επίπεδα με χρήση τεχνητού φωτισμού (εφόσον ο φυσικός φωτισμός δεν είναι συχνά επαρκής για τον χρήστη). Ωστόσο, στην ευρύτερη ζώνη άνεσης ΖΑ3 το ποσοστό των δεδομένων που βρίσκεται εντός της είναι σημαντικά υψηλότερο. Σε κάθε περίπτωση τα μοντέλα βελτιώνουν τα ποσοστά αυτά, και συγκεκριμένα το μοντέλο 8 που παρουσιάζεται προβλέπει τιμές έντασης φωτισμού που είναι κατά 81.5% εντός της ΖΑ3, αστοχώντας μόνο σε ένα ποσοστό 5.3% (Κατηγορία III, False Negative). Επιπλέον τα υψηλά ποσοστά της κατηγορίας (II, False Positive) δείχνουν ότι το μοντέλο καταφέρνει να αυξήσει τις τιμές που βρίσκονται εντός της κάθε ΖΑ, διορθώνοντας ουσιαστικά μεγάλο μέρος δεδομένων που ίσως προκαλούσαν όχληση στον χρήστη.



Σχήμα 6-16 Επιμέρους αποτελέσματα ανά Ζώνη Άνεσης για το μοντέλο 8 του Χρήστη 3.

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία ανασκόπηση των επιμέρους τμημάτων της διδακτορικής διατριβής, συνοψίζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματά της και τέλος παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και μελλοντικές επεκτάσεις αυτής.

### 7.1 Ανασκόπηση της διατριβής

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης κάθε ατόμου με τον τεχνητό φωτισμό και τα συστήματα σκίασης (περσίδες) στον χώρο εργασίας και η εύρεση τεχνικών για να α) αποτυπώσουν και να μοντελοποιήσουν την συμπεριφορά αυτή, β) να προβλέψουν τις αντίστοιχες ημερήσιες δράσεις του χρήστη ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες, και γ) να προβλέψουν την βέλτιστη ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του κάθε χρήστη ανάλογα με εξωτερικές συνθήκες, τις προτιμήσεις και την αντίστοιχη συμπεριφορά του. Η στοχαστικότητα των ανθρώπινων αντιδράσεων και οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του φυσικού φωτός εισάγουν μία έντονη πολυπλοκότητα στους παραπάνω στόχους, αφού προϋποθέτουν τον συνδυασμό μεγάλου αριθμού μεταβλητών

Όλα τα παραπάνω αποτελούν τα κύρια τμήματα της διατριβής, τα οποία αναλύθηκαν αρχικά σε θεωρητικό επίπεδο και στη συνέχεια προτάθηκαν συγκεκριμένα εργαλεία για την μοντελοποίησή τους. Η κατανόηση της συμπεριφοράς και ο σχεδιασμός των κατάλληλων μοντέλων αποτελούν τους βασικούς άξονες για την εφαρμογή έξυπνων προσωποποιημένων συστημάτων διαχείρισης φωτισμού, με κυμαινόμενο φωτισμό ο οποίος θα ακολουθεί την φυσική ένταση φωτισμού του κάθε χώρου.

Στο **Κεφάλαιο 1** έγινε μία αναλυτική εισαγωγή για το κάθε τμήμα της διατριβής. Παρουσιάστηκε αρχικά ο παράγοντας του φυσικού φωτός σε ένα χώρο και τα θετικά οφέλη που προκύπτουν για την υγεία και την ψυχολογία των χρηστών από την εκμετάλλευσή του. Υπογραμμίστηκε η ανάγκη χρήσης συστημάτων διαχείρισης φωτισμού τα οποία επιτρέπουν την διεύθυνση του φυσικού φωτός σε ένα χώρο χωρίς ωστόσο να προκαλούν αίσθημα όχλησης στους χρήστες αυτού. Εξετάστηκε επίσης η έννοια της οπτικής άνεσης και η διαφοροποίησή της ανάμεσα σε διαφορετικά άτομα. Επιπλέον αναλύθηκε τόσο η στοχαστικότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς όσο και η διαφορετικότητα ανάμεσα σε χρήστες χώρων με όμοια αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, μέσω μελετών αλληλεπίδρασης χρηστών με διαφορετικά συστήματα διαχείρισης φωτισμού. Οι παρεμβάσεις των χρηστών σε τέτοια αυτόματα συστήματα διαχείρισης μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τις επιθυμίες τους και να προδιαγράψουν ουσιαστικά το κατάλληλο σύστημα ελέγχου, αφού οι πραγματικοί χρήστες μπορεί να συμπεριφέρονται με πολύ διαφορετικό τρόπο από αυτόν που τα διάφορα πρότυπα σχεδιασμού ορίζουν. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι βασικές μεταβλητές που πρέπει να

ληφθούν υπ' όψη κατά τον σχεδιασμό ενός έξυπνου προσωποποιημένου συστήματος διαχείρισης φωτισμού και επισημάνθηκε η άμεση σύνδεση πολλών από αυτών με το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και με άλλους παράγοντες όπως είναι η συνήθεια ή η ανάγκη για ιδιωτικότητα. Στη συνέχεια αναλύθηκαν τρόποι μοντελοποίησης της συμπεριφοράς σε σχέση με την χρήση φωτισμού και περσίδων και τονίστηκαν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες της κάθε προσέγγισης. Φάνηκε επομένως η ανάγκη για τη δημιουργία μίας νέας προσέγγισης με στόχο την μοντελοποίηση των προτιμήσεων των χρηστών με βάση τις αντίστοιχες δράσεις που αυτοί πραγματοποιούν στο χώρο εργασίας τους για την ρύθμιση του φωτισμού τους και την δημιουργία οπτικά άνετου περιβάλλοντος σε αυτό. Τέλος παρουσιάστηκε μία ανάλυση σχετικά με τις εφαρμογές που βρίσκουν εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης στο τομέα της διαχείρισης και εξοικονόμησης φωτισμού, τονίζοντας τις δυνατότητες επιτυχίας τέτοιων μοντέλων στους συγκεκριμένους τομείς.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάστηκαν ο τρόπος συλλογής και τα αποτελέσματα των μετρήσεων έντασης φωτισμού και δράσεων που έγιναν για διάστημα ενός έτους σε τρία πανεπιστημιακά γραφεία. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν αρχικά η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι εξωτερικές συνθήκες επηρεάζουν την εσωτερική ένταση φωτισμού, και κυρίως ο τρόπος με τον οποίο αντιδρά ο κάθε χρήστης στις εκάστοτε συνθήκες έντασης φωτισμού, κάνοντας συγκεκριμένες δράσεις περιορισμού ή αύξησης αυτής. Η στατιστική ανάλυση των παραπάνω μετρήσεων έδειξε τις έντονες διαφορές που προκύπτουν στο εσωτερικό του κάθε γραφείου ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και τον προσανατολισμό του. Επιπρόσθετα ανέδειξε τις διαφορετικές επιλογές που κάνει κάθε χρήστης υπό τις ίδιες αντικειμενικές συνθήκες ώστε να δημιουργήσει ένα άνετο οπτικό περιβάλλον στο χώρο εργασίας του, τονίζοντας την ανάγκη για πιθανοτική μοντελοποίηση των δράσεων του κάθε χρήστη. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση εμπορικού λογισμικού που έδωσαν μία ολοκληρωμένη γενική εικόνα της εσωτερικής έντασης φωτισμού στο κάθε γραφείο (σε θέσεις εργασίας με διαφορετικές αποστάσεις από τα παράθυρα) σε όλους τους προσανατολισμούς και με διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες και στάθμες ρύθμισης των περσίδων.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάστηκαν δεδομένα οριζόντιας ακτινοβολίας που συλλέχθηκαν για το ίδιο χρονικό διάστημα. Για να συνδυαστούν οι τιμές αυτές με τις αντίστοιχες μετρήσεις εσωτερικής έντασης φωτισμού σε κάθε γραφείο, ήταν απαραίτητος ο διαχωρισμός της οριζόντιας ακτινοβολίας στις τρεις συνιστώσες της (άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη), λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του ουρανού και τον προσανατολισμό κάθε γραφείου. Για το σκοπό αυτό παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι απαραίτητες μεταβλητές (ηλιακές γωνίες, χρονικές σταθερές κλπ) καθώς και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί και μετασχηματισμοί που εφαρμόστηκαν. Παράλληλα, διερευνήθηκε η επίδραση της κατάστασης του ουρανού στην ακτινοβολία και τις συνιστώσες της, με χρήση του μοντέλου ουρανού του Reindl.

Δημιουργήθηκαν έτσι κάποιες από τις απαραίτητες εισόδους για τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια.

Στο **Κεφάλαιο 4** τα αποτελέσματα των μετρήσεων έντασης φωτισμού και κυρίως τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πολύμηνη παρακολούθηση των χρηστών οδήγησαν στην δημιουργία μίας νέας προσέγγισης για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς, που αφορά στον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων από τον χρήστη για να επιτύχει συνθήκες άνεσης στον χώρο του. Παρουσιάστηκαν οι βασικές θεωρήσεις της προτεινόμενης μοντελοποίησης καθώς και ο τρόπος υλοποίησής της. Η μοντελοποίηση του κάθε χρήστη γίνεται με την χρήση καμπυλών συμπεριφοράς, οι οποίες απεικονίζουν τις προτιμήσεις και τις αντίστοιχες δράσεις του στο χώρο εργασίας του. Οι καμπύλες αυτές αποδίδουν την πιθανότητα για τον κάθε χρήστη να δράσει (να ανοίξει τον τεχνητό φωτισμό ή να κλείσει τις περσίδες) συναρτήσει της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας του. Για τη διερεύνηση της ευστοχίας των παραμέτρων των καμπυλών αυτών ανά χρήστη χρησιμοποιήθηκαν κριτήρια ελέγχου που ανέδειξαν την ακρίβειά τους και την ικανότητα προσαρμογής και γενίκευσής τους. Επιπρόσθετα, εισήχθησαν οι όροι της καθυστέρησης δράσης του χρήστη (συναρτήσει της έντασης φωτισμού) και της σωρευτικής έκθεσης του χρήστη σε ένα χρονικό διάστημα και προτάθηκε η μεθοδολογία για τον υπολογισμό τους. Οι δύο αυτές παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της σταθερότητας στις δράσεις του κάθε χρήστη καθώς και της ανοχής του κάθε χρήστη, δηλαδή της δυνατότητας του κάθε χρήστη να εργάζεται σε διαφορετικά επίπεδα έντασης φωτισμού.

Στο **Κεφάλαιο 5** δημιουργήθηκαν και παρουσιάστηκαν δύο νέα ξεχωριστά μοντέλα με βάση την μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Το πρώτο μοντέλο προβλέπει για κάθε χρήστη και χρονική στιγμή δύο τιμές της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας που αντιστοιχούν σε ανοικτές και κλειστές περσίδες. Στη συνέχεια, με χρήση των καμπυλών συμπεριφοράς υπολογίζει τις πιθανότητες δράσης του χρήστη. Το δεύτερο μοντέλο προβλέπει τις πιθανότητες αυτές χωρίς να προηγηθεί ο υπολογισμός της εσωτερικής έντασης φωτισμού. Αναλύθηκαν οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στα δύο μοντέλα και προσδιορίστηκε ο βέλτιστος τύπος νευρωνικού δικτύου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί καθώς και η αρχιτεκτονική του έτσι ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο σφάλμα πρόβλεψης. Η αντίστοιχη αποτίμηση έδειξε ότι οι προβλέψεις τόσο των ωριαίων τιμών εσωτερικής έντασης φωτισμού όσο και των δράσεων των χρηστών είναι επιτυχημένες και επομένως θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και για την εκτίμηση της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τον φωτισμό ενός γραφείου, ανάλογα με τον προσανατολισμό του και τις συνήθειες του χρήστη του. Στο αντίστοιχο παράδειγμα εφαρμογής που παρουσιάστηκε αναδείχτηκε ο μοναδικός τρόπος με τον οποίο οι προτιμήσεις του κάθε χρήστη αλλά και ο προσανατολισμός του γραφείου του συνδέονται με την τελική κατανάλωση ενέργειας φωτισμού και οδήγησε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να λαμβάνονται

υπ' όψη κατά το σχεδιασμό του φωτισμού του χώρου και κατά την εφαρμογή ενός συστήματος διαχείρισης φωτισμού.

Στο **Κεφάλαιο 6** τέλος έγινε χρήση της ασαφούς λογικής και δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο που βασίζεται αποκλειστικά στις τιμές έντασης φωτισμού που καταγράφηκαν κατά την παρουσία του χρήστη κάθε γραφείου, ανεξάρτητα από την κατάσταση των περσίδων και του φωτισμού. Το μοντέλο αυτό είναι προσωποποιημένο και προβλέπει ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες, την ώρα της ημέρας και την εποχή του έτους τη βέλτιστη ένταση φωτισμού που ο συγκεκριμένος χρήστης θα ήθελε στην επιφάνεια εργασίας του. Είναι ικανό να διαχωρίζει τα δεδομένα σε κατηγορίες (κανόνες) βάσει κάποιων κρίσιμων μεταβλητών, να διαμορφώνει μία επιμέρους συνάρτηση εισόδων-εξόδων για κάθε κανόνα και μετά να τις συνδυάζει με βέλτιστο τρόπο. Τα βασικά πλεονεκτήματά του είναι ότι επιτυγχάνει να παράγει τιμές έντασης φωτισμού που ελαχιστοποιούν την πιθανότητα παρέμβασης του χρήστη (για τυχόν διόρθωσή της) και ότι οι ημερήσιες μορφές της προβλεπόμενης έντασης φωτισμού προσεγγίζουν την μορφή της φυσικής έντασης φωτισμού που θα υπήρχε στον κάθε χώρο. Η έξοδος του μοντέλου (τιμή βέλτιστης έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας) θα μπορεί να τροφοδοτείται σε ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης το οποίο θα προσπαθεί να την επιτύχει με κατάλληλη ρύθμιση του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων. Παρουσιάστηκαν επίσης αναλυτικά οι μεταβλητές εισόδου (υπόθεσης και συμπεράσματος) για τα μοντέλα του κάθε χρήστη και επιπλέον τα αποτελέσματά τους αποτιμήθηκαν με μία σειρά νέων κριτηρίων βασισμένων στην επίτευξη της οπτικής άνεσης κάθε χρήστη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα προτεινόμενα μοντέλα ασαφούς λογικής είναι επιτυχημένα καθώς καταφέρνουν να παράγουν ποικιλία μορφών ανάλογα με τον προσανατολισμό του γραφείου, την εποχή του έτους και την κατάσταση του ουρανού, οι δε τιμές της εξόδου τους (εσωτερική ένταση φωτισμού) βρίσκονται σε πολύ μεγάλο ποσοστό εντός των ορίων άνεσης του κάθε χρήστη, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου τα πραγματικά δεδομένα ήταν εκτός από αυτές.

## 7.2 Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω:

- Αναπτύσσεται, μέσω της αξιοποίησης μετρήσεων εσωτερικής έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας τριών γραφείων, μία νέα μεθοδολογία για τη δημιουργία προσωποποιημένων πιθανοτικών καμπυλών συμπεριφοράς. Οι καμπύλες αυτές αφορούν τη χρήση του τεχνητού φωτισμού και των περσίδων σε ένα χώρο εργασίας και αποτυπώνουν την πιθανότητα που έχει κάθε χρήστης να παρέμβει στα δύο αυτά συστήματα συναρτήσει της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας. Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους, η νέα προσέγγιση αποτυπώνει την στοχαστικότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς με τρόπο σαφή και εύκολα υλοποιήσιμο. Αποτυπώνει τα σημεία (τιμές έντασης φωτισμού) στα οποία ο κάθε χρήστης οχλείται και επομένως δρα. Οι αντίστοιχες τιμές των πιθανοτήτων δράσης

εισάγονται σε προσωποποιημένα μοντέλα ελέγχου της έντασης φωτισμού, τα οποία εκτιμούν κάθε χρονική στιγμή την βέλτιστη για τον κάθε χρήστη ένταση φωτισμού στο χώρο εργασίας του.

- Επιπρόσθετα, εισάγονται οι έννοιες της καθυστέρησης δράσης και της σωρευτικής έκθεσης ανά χρήστη και προτείνεται μία μεθοδολογία υπολογισμού τους. Ο υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών παρέχει πρόσθετη πληροφορία σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του χρήστη όσον αφορά τη συνέπεια των δράσεών του και την αντίστοιχη ανοχή του σε διαφορετικά επίπεδα έντασης φωτισμού. Για το λόγο αυτό, η νέα μεθοδολογία υπολογισμού τους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μία πιο στοχευμένη κατηγοριοποίηση των χρηστών και να αξιοποιηθεί σε σενάρια απόκρισης ζήτησης.

- Αναπτύσσονται με χρήση ΤΝΔ δύο νέα μοντέλα για την πρόβλεψη της εσωτερικής έντασης φωτισμού που θα επικρατούσε στο χώρο εργασίας με ανοικτές ή κλειστές περσίδες και των αντίστοιχων πιθανοτήτων δράσης του κάθε χρήστη. Η ένταση φωτισμού προβλέπεται για κάθε ώρα της ημέρας και ημέρα του έτους ανάλογα με την κατάσταση του ουρανού, την τοποθεσία και τον προσανατολισμό του γραφείου. Συνυπολογίζονται επίσης η απόσταση της θέσης εργασίας από τα παράθυρα και η επίδραση των περσίδων. Στα παραπάνω υπεισέρχονται και οι καμπύλες συμπεριφοράς του χρήστη, όπως αυτές προέκυψαν από την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του, οδηγώντας σε μία πολυπαραγοντική πρόβλεψη των δράσεων του κάθε χρήστη. Τα μοντέλα αυτά είναι γενικευμένα, μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε πλήθος διαφορετικών περιπτώσεων και να αποτελέσουν αξιόπιστα εργαλεία εκτίμησης σε πραγματικό χρόνο της προσωποποιημένης χρήσης φωτισμού. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν τμήμα ενός ευρύτερου εργαλείου που θα προβλέπει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός κτιρίου.

- Διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο οι δράσεις του κάθε χρήστη σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό του γραφείου του και την εποχή του έτους συνδέονται με την συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό. Παρουσιάζεται μία ετήσια προσομοίωση με χρήση εξωτερικών δεδομένων, από την οποία καθίστανται εμφανείς οι διαφορές μεταξύ των χρηστών και ποσοτικοποιείται η αντίστοιχη διαφορά στην συνολική κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό.

- Αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο με χρήση ασαφούς λογικής που είναι σε θέση να προβλέπει την βέλτιστη για τον κάθε χρήστη ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες, την ώρα της ημέρας και την εποχή του έτους. Το μοντέλο βασίζεται αποκλειστικά στο σύνολο των δεδομένων έντασης φωτισμού που καταγράφηκαν κατά την παρουσία του χρήστη χωρίς να απαιτείται η γνώση (ή η καταγραφή) των αντίστοιχων δράσεών του. Οι πιθανοτικές καμπύλες συμπεριφοράς χρησιμοποιούνται μόνο για την αποτίμηση της επάρκειας του μοντέλου για τον κάθε χρήστη. Διερευνώνται οι πιθανές είσοδοι (υπόθεσης και συμπεράσματος) έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σωστή πρόβλεψη, ενώ αναλύεται ο τρόπος που η πολυπλοκότητα των μοντέλων ασαφούς λογικής

επηρεάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά χρήστη αποδεικνύει ότι η μοντελοποίηση της βέλτιστης έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας μπορεί να υλοποιηθεί επιτυχώς με χρήση ασαφούς λογικής.

- Τέλος, προτείνονται νέα κριτήρια αποτίμησης για τα αποτελέσματα μοντέλων που συνδέονται με την πρόβλεψη συνθηκών άνεσης. Τα κριτήρια αυτά εφαρμόζονται για τη διερεύνηση της επάρκειας του ασαφούς συστήματος που αναπτύχθηκε, αλλά μπορούν να βρουν εφαρμογές σε αντίστοιχες περιπτώσεις, όπως π.χ. σε μοντέλα που αφορούν θερμική άνεση.

### 7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή στόχευσε στη ανάπτυξη μεθοδολογιών και στη δημιουργία εργαλείων για την εφαρμογή προσωποποιημένου φωτισμού σε χώρους γραφείων. Η στοχαστικότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς καθώς και η μεταβλητότητα των εξωτερικών συνθηκών δημιουργούν ένα πολυσύνθετο πρόβλημα. Η κατανόηση του προβλήματος αυτού καθώς και η μοντελοποίηση των επιμέρους τμημάτων του οδήγησαν στην παραγωγή πρωτότυπων αλγορίθμων οι οποίοι μπορούν να εισαχθούν σε έξυπνα συστήματα διαχείρισης φωτισμού και περσίδων πραγματικού χρόνου.

Επόμενο βήμα της παραπάνω έρευνας θα ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος διαχείρισης φωτισμού που θα αξιοποιεί τα προτεινόμενα μοντέλα και θα ρυθμίζει με κατάλληλο τρόπο τα φωτιστικά σώματα και τις περσίδες κάθε χώρου, ώστε ο χρήστης του να αισθάνεται οπτική άνεση. Κατά το σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με τον τρόπο που θα γίνεται ο έλεγχος των δύο υποσυστημάτων (τεχνητού φωτισμού και περσίδων), τα χρονικά διαστήματα δειγματοληψίας, αποτίμησης και επαναπροσδιορισμού των ρυθμίσεων των υποσυστημάτων αυτών καθώς και των μετρητικών οργάνων (τύπος και θέση μέσα στο χώρο) που θα χρησιμοποιούνται για να προσδιορίζεται κάθε στιγμή η τιμή της εσωτερικής έντασης φωτισμού.

Ιδιαίτερο τμήμα έρευνας στο παραπάνω αντικείμενο θα μπορούσε να αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο ο χρήστης θα μπορεί να παρέμβει στις ρυθμίσεις – προτάσεις του συστήματος διαχείρισης φωτισμού καθώς και η διαδικασία επαναπροσδιορισμού του εγκατεστημένου σε αυτό εργαλείου πρόβλεψης, βάσει των παρεμβάσεων αυτών. Προς το σκοπό αυτό, θα πρέπει κατά τη λειτουργία του έξυπνου συστήματος διαχείρισης φωτισμού να μετράται η ένταση φωτισμού, να καταγράφονται οι παρεμβάσεις του χρήστη, και να δημιουργηθούν κατάλληλα εργαλεία διαδραστικότητας με στόχο οι προβλέψεις και οι ρυθμίσεις να βελτιώνονται συνεχώς. Θα πρέπει να εξεταστεί επιπρόσθετα η μέθοδος αποτίμησης και αναπροσαρμογής των καμπυλών συμπεριφοράς που έχουν προταθεί, κάθε φορά που ο χρήστης παρεμβαίνει και διορθώνει την ρύθμιση φωτισμού ή περσίδων που αποφάσισε ο αλγόριθμος.



Θα μπορούσε επίσης να εξεταστεί η ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας εξοικονόμησης ενέργειας που θα εξισορροπεί κάθε χρονική στιγμή τη μέγιστη εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού και τη διαχείριση του φωτισμού στα όρια άνεσης των χρηστών. Η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος δεν θα επιτρέπει την άσκοπη κατανάλωση ενέργειας από κινήσεις των χρηστών που γίνονται λόγω συνήθειας (π.χ. ενεργοποίηση του τεχνητού φωτισμού με την είσοδο στο γραφείο χωρίς να συντρέχουν λόγοι οπτικής όχλησης, αμέλεια απενεργοποίησης του τεχνητού φωτισμού ενώ επαρκεί ο φυσικός, αμέλεια ανοίγματος των περσίδων ενώ έχει παρέλθει η όχληση λόγω φυσικού φωτισμού κλπ). Με την χρήση της μεθοδολογίας αυτής θα μπορεί να γίνει και ανάλυση της εξοικονόμησης ενέργειας που θα μπορεί να επιτευχθεί ανά χρήστη, ανάλογα με τη συμπεριφορά του.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα αξιοποίησης των μοντέλων ελέγχου που προτάθηκαν σε εφαρμογές απόκρισης ζήτησης καταναλωτών. Σε τέτοια προγράμματα ο πάροχος αποστέλλει στους ευέλικτους καταναλωτές αιτήματα μείωσης του φορτίου κατά ένα ποσοστό για μία χρονική περίοδο. Τα αιτήματα αυτά είναι πιθανόν να υλοποιούνται αυτόματα ή να απαιτείται η συναίνεση του χρήστη. Η γνώση των καμπυλών συμπεριφοράς του κάθε χρήστη και η ύπαρξη του έξυπνου αλγόριθμου ρύθμισης φωτισμού θα μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα τέτοιο σενάριο, ώστε να είναι δυνατή η κατηγοριοποίηση των χρηστών ανάλογα με τις καμπύλες συμπεριφοράς τους. Μετά την κατηγοριοποίηση αυτή, θα είναι δυνατή η εφαρμογή διαφορετικών ποσοστών μείωσης φορτίου φωτισμού στις διαφορετικές ομάδες χρηστών με παρόμοια χαρακτηριστικά. Επομένως, μία μείωση φορτίου φωτισμού θα κατανέμεται δίκαια και αποτελεσματικά μεταξύ των χρηστών με την έννοια ότι δεν θα μειώνεται αισθητά η ποιότητα φωτισμού κανενός χρήστη και θα καθίσταται πιθανότερη η αποδοχή των προτεινόμενων σεναρίων από τον κάθε χρήστη.

## Αναφορές

- [1] Energy performance in buildings Directive. 2019. European Commission
- [2] IEA-EBC Annex 66. 2016. Definition and simulation of occupant behavior in buildings
- [3] Zhao, J., Lasternas, B., Lam, K.P., Yun, R., and Loftness, V. 2014. "Occupant behavior and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining." *Energy and Buildings* 82: 341-355.
- [4] EIA. 2017. Trends in lighting in commercial buildings, Report
- [5] Yang, J., Santamouris, M., and Lee, S. E. 2016. "Review of occupancy sensing systems and occupancy modeling methodologies for the application in institutional buildings." *Energy and Buildings* 121: 344-349.
- [6] Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D'Oca, S., Yan, D., and Corgnati, S. P. 2016. "Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. " *Energy and buildings* 116: 694-702.
- [7] Pandharipande, A., and Caicedo, D. 2015. "Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches." *Energy and Buildings* 104: 369-377.
- [8] ECS (European Committee for Standardization) 2011. EN 12464-1: Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places. European Committee for Standardization.
- [9] Dounis, A. I., and Caraiscos, C. 2009. "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6-7): 1246-1261.
- [10] Yang, R., and Wang, L. 2012. "Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control." *Sustainable Cities and Society* 2(1): 1-7.
- [11] da Silva P.C., Leal V. and Andersen M. 2014. "Occupants' behaviour in energy simulation tools: lessons from a field monitoring campaign regarding lighting and shading control." *Journal of Building Performance Simulation* 8(5): 338–358.
- [12] Parys W., Saelens D., and Hens H. 2011. "Coupling of dynamic building simulation with stochastic modelling of occupant behaviour in offices—a review-based integrated methodology." *Journal of Building Performance Simulation* 4: 339–358.
- [13] Gaetani I., Hoes P.J., and Hensen J.L.M. 2016. "Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy." *Energy and Buildings* 121: 188–204.
- [14] Popoola, O. M. 2018. "Computational intelligence modelling based on variables interlinked with behavioral tendencies for energy usage profile—A necessity." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 60-72.
- [15] Page, J., Robinson, D., and Scartezzini, J. L. 2007. "Stochastic simulation of occupant presence and behaviour in buildings." *Proceedings of Tenth Int. IBPSA Conf: Building Simulation* 757-764. Beijing, China, September 3-6.
- [16] Webb, A. R. 2006. "Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light." *Energy and Buildings* 38(7): 721–727.
- [17] Fernandez, D. C., Fogerson, P. M., Ospri, L. L., Thomsen, M. B., Layne, R. M., Severin, D., and Berson, D. M. 2018. "Light affects mood and learning through distinct retina-brain pathways." *Cell* 175(1): 71-84.
- [18] Galasiu, A.D., and Veitch, J.A. 2006. "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review." *Energy and Buildings* 38: 728–742.
- [19] Begemann, S.H.A., van den Beld, G., and Tenner J.A.D. 1997. "Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses." *Industrial Ergonomics* 20: 231–239.

- [20] Veitch, J.A., Hine, D.W., and Gifford, R. 1993. "End users' knowledge, beliefs, and preferences for lighting." *Journal of Interior Design* 19: 15–26.
- [21] Veitch, J.A., and Gifford, R. 1996. "Assessing beliefs about lighting effects on health, performance, mood, and social behavior." *Environment and Behavior* 28: 446–70.
- [22] Inoue, T., Kawase, T., Ibamoto, T., Takakusa, S., and Matsuo Y. 1988. "The development of an optimal control system for window shading devices based on investigations in office buildings." *ASHRAE Transactions* 94:1034–49.
- [23] Bourgeois, D., Reinhart, C., and Macdonald, I. 2006. "Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control." *Energy and buildings* 38(7): 814-823.
- [24] Bodart, M., and De Herde, A. 2002. "Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting." *Energy and buildings* 34(5): 421-429.
- [25] Franzetti, C., Fraisse, G., and Achard, G. 2004. "Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings." *Energy and Buildings* 36(2): 117-126.
- [26] Rodriguez, R. G., Garretón, J. A. Y., and Pattini, A. E. 2017. "An epidemiological approach to daylight discomfort glare." *Building and Environment* 113: 39-48.
- [27] Amundadottir, M. L., Rockcastle, S., Khanie, M. S., and Andersen, M. 2017. "A human-centric approach to assess daylight in buildings for non-visual health potential, visual interest and gaze behavior." *Building and Environment* 113: 5-21.
- [28] Alzoubi, H. H., and Al-Zoubi, A. H. 2010. "Assessment of building façade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: Vertical and horizontal shading devices for southern exposure facades." *Energy Conversion and Management* 51(8): 1592-1599.
- [29] Li, D. H., Lou, S., Ghaffarianhoseini, A., Alshaibani, K. A., and Lam, J. C. 2017. "A review of calculating procedures on daylight factor based metrics under various CIE Standard Skies and obstructed environments." *Building and Environment* 112: 29-44.
- [30] Mangkuto, R. A., Rohmah, M., and Asri, A. D. 2016. "Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics." *Applied energy* 164: 211-219.
- [31] Goia, F. 2016. "Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential." *Solar Energy* 132: 467-492.
- [32] Acosta, I., Campano, M. Á., and Molina, J. F. 2016. "Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces." *Applied Energy* 168: 493-506.
- [33] Haldi, F., and Robinson, D. 2010. "Adaptive actions on shading devices in response to local visual stimuli." *Journal of Building Performance Simulation* 3:135–53.
- [34] Nicol, F., Wilson, M., and Chiancarella, C. 2006. "Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds." *Energy and Buildings* 38: 802–813.
- [35] Moore, T., Carter, D.J., and Slater, A.I. 2002. "A field study of occupant controlled lighting in offices." *Lighting Research and Technology* 34(3): 191–202.
- [36] Moore, T., Carter, D.J., and Slater A.I. 2003. "Long-term patterns of use of occupant controlled office lighting." *Lighting Research and Technology* 35(1): 43–57.
- [37] Clevenger, C. M., and Haymaker, J. 2006. "The impact of the building occupant on energy modeling simulations." *Proceedings of Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*. Montreal, Canada. (pp. 1-10).
- [38] Gaetani, I., Hoes, P.J., and Hensen, J.L.M. 2016. "Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy." *Energy and Buildings* 121: 188–204.

- [39] Menezes, A.C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., and Buswell, R. 2012. "Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap." *Applied Energy* 97: 355–364.
- [40] De Wilde, P. 2014. "The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation." *Automation in Construction* 41: 40–49.
- [41] Majcen, D., Itard, L.C.M., and Visscher H. 2013. "Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications." *Energy Policy* 54: 125–136.
- [42] Zhang, Y., and Barrett, P. 2012. "Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building." *Building and Environment* 54: 137–147.
- [43] Gunay, H. B., O'Brien, W., Beausoleil-Morrison, I., and Gilani, S. 2017. "Development and implementation of an adaptive lighting and blinds control algorithm." *Building and Environment* 113: 185-199.
- [44] Despenic, M., Chraibi, S., Lashina, T., and Rosemann, A. 2017. "Lighting preference profiles of users in an open office environment." *Building and Environment* 116: 89-107.
- [45] Chraibi, S., Lashina, T., Shrubsole, P., Aries, M., van Loenen, E., and Rosemann, A. 2016. "Satisfying light conditions: a field study on perception of consensus light in Dutch open office environments." *Building and Environment* 105: 116-127.
- [46] O'Brien, W., Gaetani, I., Carlucci, S., Hoes, P. J., and Hensen, J. L. 2017. "On occupant-centric building performance metrics." *Building and Environment* 122: 373-385.
- [47] Peng, C., Yan, D., Wu, R., Wang, C., Zhou, X., and Jiang, Y. 2012. "Quantitative description and simulation of human behavior in residential buildings." *Building Simulation* 5: 85–94.
- [48] Vine, E., Lee, E., Clear, R., DiBartolomeo, D., and Selkowitz, S. 1998. "Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study." *Energy and Buildings* 28: 205–218.
- [49] da Silva, C, Leal, V., and Andersen, M. 2013. "Occupants interaction with electric lighting and shading systems in real single-occupied offices: Results from a monitoring campaign." *Building and Environment* 64: 152–168.
- [50] Sutter, Y., Dumortier, D., and Fontoynt, M. 2006. "The use of shading systems in VDU task offices: A pilot study." *Energy and Buildings* 38(7): 780-789.
- [51] Haldi, F., and Robinson, D. 2009. "A comprehensive stochastic model of blind usage: theory and validation." *Proceedings of Elev. Int. IBPSA Conf. Glasgow, Scotland.*
- [52] Reinhart, C.F., and Voss, K. 2003. "Monitoring manual control of electric lighting and blinds." *Lighting Research and Technology* 35: 243–258.
- [53] Hunt, D.R.G. 1979. "The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy." *Building and Environment* 14: 21–33.
- [54] Yao, J. 2014. "Determining the energy performance of manually controlled solar shades: A stochastic model based co-simulation analysis." *Applied Energy* 127: 64–80.
- [55] Stazi, F., Naspi, F., and D'Orazio, M. 2017. "A literature review on driving factors and contextual events influencing occupants' behaviours in buildings." *Building and Environment* 118: 40-66.
- [56] Iwata, T., Taniguchi, T., and Sakuma, R. 2017. "Automated blind control based on glare prevention with dimmable light in open-plan offices." *Building and Environment* 113: 232-246.
- [57] Raja, I.A., Nicol, J.F., McCartney, K.J., and Humphreys M.A. 2001. "Thermal comfort: Use of controls in naturally ventilated buildings." *Energy and Buildings* 33: 235–244.
- [58] Maniccia, D., Rutledge, B., Rea, M., and Morow, W. 1999. "Occupant use of manual lighting controls in private offices." *Journal of the Illuminating Energy Society* 28(2): 42-56.
- [59] Rea, M. 1984. "Window blind occlusion: a pilot study." *Building and Environment* 19:133-7.
- [60] Xiong, J., and Tzempelikos, A. 2016. "Model-based shading and lighting control considering visual comfort and energy use." *Solar Energy* 134: 416–428.

- [61] Haldi, F., and Robinson, D. 2008. "On the behaviour and adaptation of office occupants." *Building and Environment* 43: 2163–2177.
- [62] Foster, M., and Oreszczyn, T. 2001. "Occupant control of passive systems: the use of venetian blinds." *Building and Environment* 36(2): 149–155.
- [63] Inkarojrit, V. 2008. "Monitoring and modelling of manually-controlled venetian blinds in private offices: a pilot study." *Journal of Building Performance Simulation* 1:75–89.
- [64] Eilers, M., Reed, J., and Works, T. 1996. "Behavioral aspects of lighting and occupancy sensors in private offices: a case study of a university office building." *ACEEE summer study on energy efficiency in buildings*.
- [65] Mahdavi, A., Mohammadi, A., Kabir, E., and Lambeva, L. 2008. "Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings." *Journal of Building Performance Simulation* 1:57–65.
- [66] O'Brien, W., and Gunay, H. B. 2014. "The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices—A review and proposed modeling framework." *Building and Environment* 77: 77–87.
- [67] Boyce, P.R., Veitch, J. A, Newsham, G.R., Jones, C.C., Heerwagen, J., Myer, M., and Hunter, C. M. 2006. "Occupant use of switching and dimming controls in offices." *Lighting Research and Technology* 38: 358–376.
- [68] Yun, G.Y., Kong, H.J., Kim, H., and Kim, J.T. 2012. "A field survey of visual comfort and lighting energy consumption in open plan offices." *Energy and Buildings* 46: 146–151.
- [69] Yun, G.Y., Kim, H., and Kim, J.T. 2012. "Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption" *Energy and Buildings* 46: 152–158.
- [70] Pigg, S., Eilers, M., Consultant, I., Reed, J., and Works, T. 1996. "Behavioral Aspects of Lighting and Occupancy Sensors in Privates Offices: A case study of a University Office Building." *ACEEE Summer Study Energy Efficiency in Buildings* 161–170.
- [71] Inkarojrit, V. 2005. "Balancing Comfort: Occupants' control of window blinds in private offices." PhD dissertation, University of California, Berkeley.
- [72] Reinhart, CF, and Wienold, J. 2011. "The daylighting dashboard- a simulation-based design analysis for daylit spaces." *Building and Environment* 46:386–96.
- [73] Rubin, A.I., Collins, B.L., and Tibbott, R.L. 1978. "Window blinds as a potential energy saver: a case study." US Department of Commerce. National Bureau of Standards.
- [74] Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Piselli, C., Fabiani, C., and Cotana, C. 2016. "How peers' personal attitudes affect indoor microclimate and energy need in an institutional building: results from a continuous monitoring campaign in summer and winter conditions." *Energy and Buildings* 126: 485–497.
- [75] Lindsay, C.R.T., and Littlefair, P.J. 1993. "Occupant use of venetian blinds in offices." *Building Research Establishment*.
- [76] Bakker, L.G., Hoes-van Oeffelen, E.C.M., Loonen, R.C.G.M. and Hensen, J.L.M. 2014. "User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study." *Building and Environment* 78: 44–52.
- [77] Meerbeek, B., Kulve, M., Gritti, T., Aarts, M., Loenen, E., and Aarts, E. 2014. "Building automation and perceived control: A field study on motorized exterior blinds in Dutch offices." *Building and Environment* 79: 66–77.
- [78] Kim, J.H., Park, Y.J., Yeo, M.S., and Kim, K.W. 2009. "An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer." *Building and Environment* 44(7): 1517–1527.
- [79] O'Brien, W., Kapsis, K., and Athienitis, A.K., 2012. "Manually-operated window shade patterns in office buildings: a critical review." *Building and Environment* 60(0) :319–38.
- [80] Newsham, G.R. 1994. "Manual control of window blinds and electric lighting: Implications for comfort and energy consumption." *Indoor Environment* 3: 135–144.
- [81] Lindelof, L., and Morel, M. 2006. "A field investigation of the intermediate light switching by users." *Energy and Buildings* 38: 790–801.

- [82] Leaman, A., and Bordass, B. 2001. "Assessing building performance in use 4: The Probe occupant surveys and their implications." *Building Research and Information* 29(2): 129–143.
- [83] Lee, E., Fernandes, L., Coffey, B., McNeil, A., Clear, R., Webster, T., et al. 2013. "A post-occupancy monitored evaluation of the dimmable lighting, automated shading, and underfloor air distribution system" *New York Times Building*.
- [84] Cole, R.J., and Brown Z. 2009. "Reconciling human and automated intelligence in the provision of occupant comfort." *Intelligent Buildings International* 1(1): 39–55.
- [85] Jakubiec, J.A., and Reinhart, C.F. 2012. "The 'adaptive zone'- A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces." *Lighting research and Technology* 44(2): 149–170.
- [86] Yilmaz, F.S., Ticleanu, C., Howlett, G., King, S. and Littlefair, P.J. 2015. "People-friendly lighting controls – User performance and feedback on different interfaces." *Lighting Research and Technology* 48(4): 449–472.
- [87] Goller, M. 1998. "Integration of daylighting technologies in demand side management programmes : estimation of the energetical and peak load potential." *Fraunhofer-IRB-Verlag, Final report; SAVE project no. XVII/4.1031/S/ 94–138*.
- [88] Inkarojrit, V, and Paliaga, G. 2004. "Indoor climatic influences on the operation of windows in a naturally ventilated building." *Proceedings of 21th PLEA conference*. Eindhoven, The Netherlands.
- [89] Van den Wymelenberg, K. 2012. "Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review." *Energy and Buildings* 51: 165–176.
- [90] Haldi, F., and Robinson, D. 2011. "Modelling occupants' personal characteristics for thermal comfort prediction." *International Journal of Biometeorology* 55: 681–94.
- [91] Sadeghi, S.A., Karava, P., Konstantzos, I., and Tzempelikos, A. 2016. "Occupant interactions with shading and lighting systems using different control interfaces: a pilot field study." *Building and Environment* 97: 177–95.
- [92] Herkel, S., Knapp, U., and Pfafferott, J. 2008. "Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings." *Buildings and Environment* 43: 588–600.
- [93] Reinhart, CF. 2004. "Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds." *Solar Energy* 77: 15–28.
- [94] Rijal, H.B., Tuohy, P., Nicol, F., et al. 2008 "Development of an adaptive window-opening algorithm to predict the thermal comfort, energy use and overheating in buildings." *Journal of Building Performance Simulation* 1: 17–30.
- [95] Yun, G.Y., and Steemers, K. 2008. "Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer." *Building and Environment* 43: 1471–1482.
- [96] Lindelöf, D., and Morel, N. 2008. "Bayesian estimation of visual discomfort." *Building Research and Information* 36(1): 83–96.
- [97] D'Oca, S., Gunay, H. B., Gilani, S., and O'Brien, W. 2019. "Critical review and illustrative examples of office occupant modelling formalisms." *Building Services Engineering Research and Technology* 40(6): 732-757.
- [98] Tahmasebi, F., Mahdavi, A. 2016. "An inquiry into the reliability of window operation models in building performance simulation." *Building and Environment* 105: 343–357.
- [99] Wang, C., Yan, D., Sun, H., and Jiang Y. 2016. "A generalized probabilistic formula relating occupant behavior to environmental conditions." *Building and Environment* 95: 53–62.
- [100] Neto, A. H., and Fiorelli, F. A. S. 2008. "Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption." *Energy and buildings* 40(12): 2169-2176.
- [101] Chae, Y. T., Horesh, R., Hwang, Y., and Lee, Y. M. 2016. "Artificial neural network model for forecasting sub-hourly electricity usage in commercial buildings." *Energy and Buildings* 111: 184-194.

- [102] Li, K., Hu, C., Liu, G., and Xue, W. 2015. "Building's electricity consumption prediction using optimized artificial neural networks and principal component analysis." *Energy and Buildings* 108: 106-113.
- [103] Safa, M., Safa, M., Allen, J., Shahi, A., and Haas, C. T. 2017. "Improving sustainable office building operation by using historical data and linear models to predict energy usage." *Sustainable Cities and Society* 29: 107-117.
- [104] Wong, S. L., Wan, K. K., and Lam, T. N. 2010. "Artificial neural networks for energy analysis of office buildings with daylighting." *Applied Energy* 87(2): 551-557.
- [105] da Fonseca, R. W., Didoné, E. L., and Pereira, F. O. R. 2013. "Using artificial neural networks to predict the impact of daylighting on building final electric energy requirements." *Energy and Buildings* 61: 31-38.
- [106] Janjai, S., and Plaon, P. 2011. "Estimation of sky luminance in the tropics using artificial neural networks: Modeling and performance comparison with the CIE model." *Applied Energy* 88(3): 840-847.
- [107] Loutfi, H., Bernatchou, A., Raoui, Y., and Tadili, R. 2017. "Learning Processes to Predict the Hourly Global, Direct, and Diffuse Solar Irradiance from Daily Global Radiation with Artificial Neural Networks." *International Journal of Photoenergy*.
- [108] Li, D. H., Chau, N. T., and Wan, K. K. 2013. "Predicting daylight illuminance and solar irradiance on vertical surfaces based on classified standard skies." *Energy* 53: 252-258.
- [109] Si, W., Pan, X., Ogai, H., Hirai, K., Yamauchi, N., and Li, T. 2014. "Illumination Modeling Method for Office Lighting Control by Using RBFNN." *IEICE transactions on Information and Systems* 97(12): 3192-3200.
- [110] Wang, Z., and Tan, Y. K. 2013. "Illumination control of LED systems based on neural network model and energy optimization algorithm." *Energy and Buildings* 62: 514-521.
- [111] Tran, D., and Tan, Y. K. 2014. "Sensorless illumination control of a networked LED-lighting system using feedforward neural network." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61(4): 2113-2121.
- [112] Kazanasmaz, T., Günaydin, M., and Binol, S. 2009. "Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings." *Building and Environment* 44(8): 1751-1757.
- [113] Kurian, C. P., Aithal, R. S., Bhat, J., and George, V. I. 2008. "Robust control and optimisation of energy consumption in daylight—artificial light integrated schemes." *Lighting Research and Technology* 40(1): 7-24.
- [114] Kurian, C. P., and Shetty, S. 2019. "A data-driven approach for the control of a daylight—artificial light integrated scheme." *Lighting Research and Technology*.
- [115] Cilasun Kunduracı, A., and Kazanasmaz, Z. T. 2017. "Fuzzy logic model for the categorization of manual lighting control behaviour patterns based on daylight illuminance and interior layout." *Indoor and Built Environment* 28(5): 584-598.
- [116] Athienitis, A. K., and Tzempelikos, A. 2002. "A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device." *Solar energy* 72(4): 271-281.
- [117] Nembrini, J., Kämpf, J. H., Pappinutto, M., and Lalanne, D. 2019. "A smart luminaire in an office environment: impact on light distribution, user interactions and comfort." In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1343, No. 1, p. 012164). IOP Publishing.
- [118] Lolli, N., Nocente, A., Brozovsky, J., Woods, R., and Grynning, S. 2019. "Automatic vs Manual Control Strategy for Window Blinds and Ceiling Lights." *Consequences to Perceived Visual and Thermal Discomfort*.
- [119] Park, K. W., and Athienitis, A. K. 2003. "Workplane illuminance prediction method for daylighting control systems." *Solar Energy* 75(4): 277-284.
- [120] Duff, J., Kelly, K., and Cuttle, C. 2017. "Perceived adequacy of illumination, spatial brightness, horizontal illuminance and mean room surface exitance in a small office." *Lighting Research and Technology* 49(2): 133-146.

- [121] van de Meughevel, N., Pandharipande, A., Caicedo, D., and Van Den Hof, P. P. J. 2014. "Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation." *Energy and Buildings* 75: 321-329.
- [122] Parise, G., and Martirano, L. 2013. "Combined electric light and daylight systems ecodesign." *IEEE Transactions on Industry applications* 49(3): 1062-1070.
- [123] Mavromatidis, L. E., Marsault, X., and Lequay, H. 2014. "Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings' energy consumption due to artificial lighting: A numerical approach based on Doehlert and Box–Behnken designs." *Energy* 65: 488-502.
- [124] Jensen, H. W. 2001. "Realistic image synthesis using photon mapping." New York: AK Peters/CRC Press.
- [125] Greenberg, D. P., Cohen, M. F., and Torrance, K. E. 1986. "Radiosity: A method for computing global illumination." *The Visual Computer* 2(5): 291-297.
- [126] Liu, B. Y., and Jordan, R. C. 1960. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation." *Solar energy* 4(3): 1-19.
- [127] Orgill, J.F., and Hollands, K.G.T. 1977. "Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface." *Solar Energy* 19(4):357–359.
- [128] Erbs, D.G., Klein, S.A., and Duffie, J.A. 1982. "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation." *Solar Energy* 28(4): 293–302.
- [129] Reindl, D.T., Beckman, W.A., and Duffie, J.A. 1990. "Diffuse fraction correlations." *Solar Energy* 45(1):1–7.
- [130] Lam, J.C., and Li, D.H.W. 1996. "Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components." *Building and Environment* 31(6):527–535.
- [131] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R. 1990. "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance." *Solar Energy* 44(5):271–289.
- [132] Duffie, J. A., and Beckman, W. A. 1980. "Solar thermal engineering processes." New York: John Wiley and Sons.
- [133] Hunt, D. R. G. 1980. "Predicting artificial lighting use-a method based upon observed patterns of behaviour." *Lighting Research and Technology* 12(1): 7-14.
- [134] <https://energyplus.net/weather>
- [135] Yao, Q., Cai, W., Li, M., Hu, Z., Xue, P., and Dai, Q. "Efficient circadian daylighting: A proposed equation, experimental validation, and the consequent importance of room surface reflectance." *Energy and Buildings* (2020): 109784.
- [136] Kwon, M., Remøy, H., van den Dobbelsteen, A., and Knaack, U. 2019. "Personal control and environmental user satisfaction in office buildings: Results of case studies in the Netherlands." *Building and Environment* 149: 428-435.
- [137] Hamedani, Z., Solgi, E., Skates, H., Hine, T., Fernando, R., Lyons, J., and Dupre, K. 2019. "Visual discomfort and glare assessment in office environments: A review of light-induced physiological and perceptual responses." *Building and Environment* 153: 267-280.
- [138] Kwon, M., Remøy, H., and van den Bogaard, M. 2019. "Influential design factors on occupant satisfaction with indoor environment in workplaces." *Building and Environment* 157: 356-365.
- [139] Ding, X., Yu, J., and Si, Y. 2018. "Office light control moving toward automation and humanization: a literature review." *Intelligent Buildings International*, 1-32.
- [140] Shafaghat, A., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Lamit, H. B., Ahmad, M. H., Ferwati, M. S., and Ghoshal, S. K. 2016. "Methods for adaptive behaviors satisfaction assessment with energy efficient building design." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57: 250-259.
- [141] Takagi, T., and Sugeno, M. 1985. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* (1): 116-132.



- [142] Sugeno, M., and Kang, G. T. 1988. "Structure identification of fuzzy model." *Fuzzy sets and systems* 28(1): 15-33.