

Ανάπτυξη συγκεντρωτή φορτίων για την παροχή υπηρεσιών απόκρισης ζήτησης

Κωνσταντίνος Καλλιγαρόπουλος
Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΣΘΕΤ ΕΑΠ
std138187@ac.eap.gr

Βασίλειος Καψάλης
Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστημίου
Πελοποννήσου
και Μέλος ΣΕΠ ΣΘΕΤ ΕΑΠ
kapsalis@go.uop.gr

Περίληψη – Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η σχεδίαση, ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας διαδικτυακής υπηρεσίας που αποτελείται από τον συγκεντρωτή φορτίων καθώς και οικιακές πύλες, για την παροχή υπηρεσιών απόκρισης ζήτησης. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της λειτουργίας πλυντηρίων ρούχων και θερμοσιφώνων αλλά μπορεί να επεκταθεί και σε διαφορετικούς τύπους φορτίων. Η βελτιστοποίηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους σε περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης, λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις άνεσης των χρηστών.

Λέξεις κλειδιά: Διαδικτυακή υπηρεσία, συγκεντρωτής φορτίων, απόκριση ζήτησης, δυναμική τιμολόγηση, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, Python, Raspberry Pi

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται στροφή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή με χρήση ορυκτών καυσίμων σε παραγωγή από ΑΠΕ. Τα πλεονεκτήματα είναι αρκετά, όπως λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς και απεξάρτηση της οικονομίας των χωρών από την εισαγωγή ορυκτών καυσίμων από έτερες παραγωγικές χώρες.

Ωστόσο η εκμετάλλευση της ενέργειας των ΑΠΕ διαφέρει κατά πολύ από την παραγόμενη από ορυκτά καύσιμα καθώς οι ΑΠΕ δεν δύνανται να προσφέρουν συνεχή και σταθερή ισχύος παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν μειωμένη ισχύ κατά τις σκοτεινές-συννεφιασμένες ημέρες η οποία μηδενίζεται τη νύχτα.

Η ιδιαιτερότητα αυτή αποτελεί πρόκληση για τα δίκτυα διαχείρισης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς απαιτείται η αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να είναι εφικτή η χρήση της είτε όταν υφίσταται αυξημένη ζήτηση ενέργειας, είτε όταν είναι μειωμένη η παραγωγή της. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας όμως είναι αρκετά κοστοβόρα, καθώς απαιτούνται συσσωρευτές ιδιαίτερα μεγάλης χωρητικότητας οι οποίοι εκτός του κόστους απόκτησης έχουν και ιδιαίτερα αυξημένο κόστος συντήρησης και επιπλέον προσθέτουν απώλειες ενέργειας στο δίκτυο. (Cappers et al., 2010).

Η σκέψη που επικρατεί για την αντιμετώπιση των αδυναμιών των ΑΠΕ είναι η εξισορρόπηση της κατανάλωσης με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να μειώνονται οι απαιτήσεις αποθήκευσης ενέργειας, μέσω της δυναμικής τιμολόγησης της ενέργειας αναλόγως της παραγωγής της. Η εφαρμογή της επιτυγχάνεται μέσω της απόκρισης ζήτησης (Demand Response, DR), η οποία αφορά σε ενέργειες για την αλλαγή της καμπύλης κατανάλωσης στην πλευρά της ζήτησης, ως απόκριση στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρονική περίοδο (δυναμική τιμολόγηση) ή χρηματικά κίνητρα σχεδιασμένα να επάγουν μικρότερη χρήση του ηλεκτρισμού σε περιόδους υψηλών τιμών στην αγορά ή όταν απειλείται η αξιοπιστία του συστήματος (Cappers et al., 2010).

Το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη αφορά στα κτήρια (UNEP, 2009). Συνήθως οι οικιακοί χρήστες πληρώνουν σταθερή τιμή για την ενέργεια. Ωστόσο, η υιοθέτηση δυναμικής τιμολόγησης, ανταποκρινόμενη στις μεταβολές του κόστους της ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της μέγιστης ζήτησης και τη μείωση της μέσης τιμής καθώς και της διακύμανσης της τιμής της ενέργειας. Η δυναμική τιμολόγηση είναι πλέον εφικτή με τη χρήση έξυπνων μετρητών και προηγμένων υποδομών μέτρησης (AMI). Ένα ευρέως διαδεδομένο σχήμα τιμολόγησης είναι η τιμολόγηση Time of Use (ToU) (Time Based Rate Programs, 2022), η οποία παρέχει διάφορες τιμές της ενέργειας μέσα στο 24ωρο με μέγιστες, μέσες και ελάχιστες τιμές, το ύψος των οποίων καθορίζεται από την εποχή και την ώρα. Σε σύγκριση με τη σταθερή τιμολόγηση η ToU προσφέρει περισσότερα κίνητρα στους καταναλωτές να μεταφέρουν τη χρήση των συσκευών σε λιγότερο ακριβές χρονικές περιόδους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η δυναμική τιμολόγηση Day-Ahead Real-Time Pricing (DA-RTP), όπου η τιμή της ενέργειας αλλάζει ανά ώρα και είναι γνωστή από την προηγούμενη ημέρα εφαρμογής, ανταποκρινόμενη στην ακριβή τιμή ενέργειας της αγοράς, προκειμένου να αντικατοπτρίζεται η μεταβαλλόμενη ισορροπία προσφοράς/ζήτησης (ENTSO-E Transparency Platform, 2022).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα διαδικτυακό σύστημα βελτιστοποίησης της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακούς καταναλωτές σε περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης με κύρια οντότητα των συγκεντρωτή φορτίων (Aggregator). Ο συγκεντρωτής φορτίων υπολογίζει το βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό λειτουργίας των ελεγχόμενων συσκευών κάθε οικίας, λαμβάνοντας ως εισόδους τις προτιμήσεις του χρήστη (προφίλ χρήσης και επιθυμητό επίπεδο άνεσης), τα χαρακτηριστικά των φορτίων (π.χ. χωρητικότητα θερμοσίφωνα, ισχύ θέρμανσης, πρόγραμμα λειτουργίας πλυντηρίου ρούχων κ.λπ.), εξωτερική θερμοκρασία, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού και τις δυναμικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Ως ελεγχόμενα φορτία επιλέχθηκαν ο θερμοσίφωνας και το πλυντήριο, ως οι πιο ενεργοβόρες οικιακές συσκευές. Το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας για κάθε τύπο φορτίου στέλνεται από τον συγκεντρωτή στην αντίστοιχη οικιακή πύλη (home gateway) η οποία είναι υπεύθυνη για τη φυσική υλοποίησή του.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την ανάπτυξη του συγκεντρωτή φορτίων εφαρμόστηκαν τα παρακάτω βήματα:

a. Ανάλυση απαιτήσεων

Αφού καταγράφηκαν οι απαιτήσεις της εφαρμογής, δημιουργήθηκε διάγραμμα περιπτώσεων χρήσης, τεκμηριώθηκαν οι λεκτικές περιγραφές τους και εξήχθη το μοντέλο του πεδίου του προβλήματος, το οποίο ανανεώθηκε στα επόμενα στάδια ώστε να προκύψει το διάγραμμα κλάσεων. Στο στάδιο αυτό δημιουργήθηκαν:

- Ένα διάγραμμα περιπτώσεων χρήσης.
- Οκτώ λεκτικές περιγραφές περιπτώσεων χρήσης.
- Το μοντέλο του πεδίου του προβλήματος.

b. Ανάλυση ευρωστίας

Με την δημιουργία των διαγραμμάτων ευρωστίας διευκολύνεται η σχεδίαση της εφαρμογής. Στο τέλος του σταδίου αυτού προκύπτει το διάγραμμα κλάσεων. Στο στάδιο αυτό δημιουργήθηκαν:

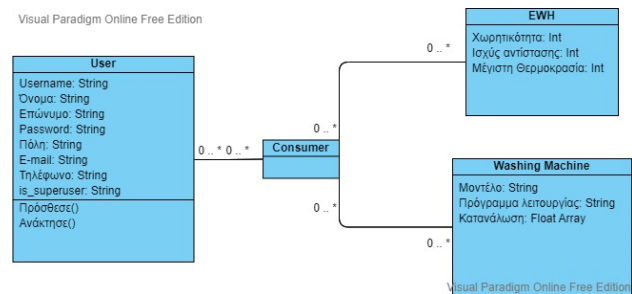
- Οκτώ διαγράμματα ευρωστίας.
- Ένα διάγραμμα κλάσεων.

c. Σχεδίαση

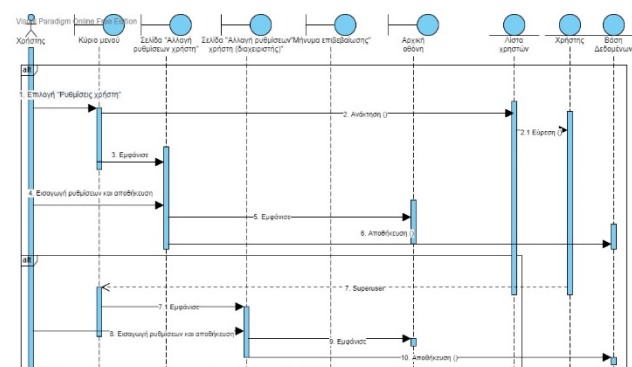
Στο στάδιο αυτό αποσαφηνίζεται η λειτουργικότητα του συστήματος, με την απόδοση ιδιοτήτων και μεθόδων στις κλάσεις, χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα ακολουθίας. Στο τέλος δημιουργήθηκε το τελικό διάγραμμα κλάσεων το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της εφαρμογής. Στο στάδιο αυτό δημιουργήθηκαν:

- Οκτώ διαγράμματα ακολουθίας.
- Το τελικό διάγραμμα κλάσεων.

Το διάγραμμα κλάσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 1, ενώ το διάγραμμα ακολουθίας για την περίπτωση χρήσης «Εισαγωγή ρυθμίσεων» απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 1. Διάγραμμα Κλάσεων

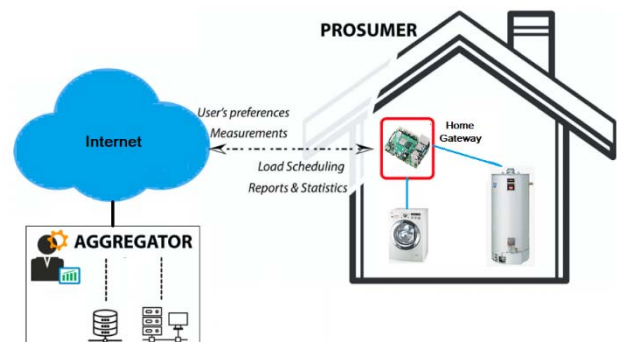


Σχήμα 2. Διάγραμμα ακολουθίας Περίπτωσης Χρήσης «Εισαγωγή ρυθμίσεων»

d. Υλοποίηση

Αρχιτεκτονική του συστήματος

Η αρχιτεκτονική του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Αρχιτεκτονική του συστήματος

Οι δύο βασικές οντότητες του συστήματος είναι ο συγκεντρωτής φορτίων και η οικιακή πύλη.

Συγκεντρωτής φορτίων: Ο πυρήνας του συστήματος είναι ο συγκεντρωτής που αποτελεί τον κεντρικό εξυπηρετητή, ο οποίος τρέχει στο cloud και παρέχει τις κατάλληλες διεπαφές για διαχείριση της υπηρεσίας. Υλοποιεί την εφαρμογή βελτιστοποίησης των φορτίων με βάση τις επιθυμίες των χρηστών και επικοινωνεί μέσω του Διαδικτύου, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο HTTP, με

τις οικιακές πύλες (home gateways), τόσο για λήψη μετρήσεων, όσο και για αποστολή χρονοδιαγραμμάτων λειτουργίας καθώς και άμεσων εντολών ελέγχου των φορτίων.

Οικιακή πύλη: Αποτελεί τον τοπικό ελεγκτή φορτίων που αναπτύχθηκε σε μικροϋπολογιστή Raspberry Pi (Raspberry Pi) και είναι συνδεδεμένος με τα ελεγχόμενα φορτία μέσω κατάλληλων ηλεκτρονόμων που ελέγχουν την παροχή ρεύματος προς αυτά σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνουν από τον συγκεντρωτή μέσω του Διαδικτύου. Η οικιακή πύλη είναι εφοδιασμένη με οθόνη 16 χαρακτήρων και 2 γραμμών για την απεικόνιση της κατάστασης λειτουργίας των ελεγχόμενων φορτίων (Σχήμα 4). Η εφαρμογή που τρέχει στην οικιακή πύλη αναπτύχθηκε σε Python. Η επικοινωνία με τον συγκεντρωτή επιτυγχάνεται μέσω web sockets, τόσο για λήψη εντολών όσο και για αποστολή δεδομένων κατάστασης.



Σχήμα 4. Απεικόνιση της κατάστασης λειτουργίας του πλυντηρίου

Βασική λειτουργικότητα του συγκεντρωτή φορτίων

Αρχικά ο κάθε χρήστης εγγράφεται στον συγκεντρωτή (Σχήμα 5) και στη συνέχεια εισάγει τις ρυθμίσεις του οικιακού ελεγκτή φορτίων (διεύθυνση IP κ.λπ.) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ελεγχόμενων φορτίων του (ισχύς θερμοσίφωνα, χωρητικότητα νερού, προγράμματα πλύσης του πλυντηρίου ρούχων κ.λπ.). Στη συνέχεια ο συγκεντρωτής λαμβάνει δεδομένα από την οικιακή πύλη για την κατάσταση λειτουργίας των ελεγχόμενων φορτίων καθώς και την τρέχουσα κατανάλωσή τους.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τις προτιμήσεις του μέσω της αντίστοιχης σελίδας του συγκεντρωτή, όπως προφίλ χρήσης ζεστού νερού, επιθυμητή/ελάχιστη θερμοκρασία νερού για το θερμοσίφωνα, επιθυμητή ώρα ολοκλήρωσης της λειτουργίας και πρόγραμμα πλύσης για το πλυντήριο ρούχων. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητου (άμεσου) ελέγχου της λειτουργίας κάθε φορτίου του χρήστη, όπως άναμμα/σβήσιμο του θερμοσίφωνα ή έναρξη προγράμματος πλύσης στο πλυντήριο ρούχων, μέσω της σελίδας που φαίνεται στο Σχήμα 6.

Ο συγκεντρωτής φορτίων αναπτύχθηκε ως μια διαδικτυακή υπηρεσία. Η συνολική έκταση της εφαρμογής ανέρχεται σε 5,5 χιλιάδες γραμμές κώδικα, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Εγγραφή χρηστών.
- Εισαγωγή/αλλαγή ρυθμίσεων χρήστη.
- Δημιουργία λογαριασμού διαχειριστή με δυνατότητα διαγραφής χρηστών.

- Επικοινωνία με τους οικιακούς ελεγκτές φορτίων.
- Χειροκίνητος έλεγχος λειτουργίας φορτίων.
- Προβολή καταναλισκόμενης ενέργειας χρήστη.

Σχήμα 5. Σελίδα εγγραφής χρήστη

Σχήμα 6. Σελίδα χειροκίνητου (άμεσου) ελέγχου των φορτίων

- Λήψη δυναμικών τιμών ενέργειας για κάθε ημέρα (DA-RTP) και προβολή τους σε διάγραμμα.
- Εφαρμογή αλγορίθμων ελαχιστοποίησης του ενεργειακού κόστους των ελεγχόμενων φορτίων.
- Αποθήκευση ιστορικών στοιχείων χρήσης για κάθε φορτίο καθώς και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.
- Προβολή ιστορικών στοιχείων χρήστη μέσα από ημερήσια διαγράμματα.
- Προβολή ιστορικών στοιχείων συνόλου χρηστών για τους διαχειριστές της εφαρμογής.
- Προβολή ιστορικών στοιχείων ανά φορτίο.
- Προβολή ιστορικών στοιχείων για το σύνολο των φορτίων των χρηστών.

Η βασική λειτουργία του συγκεντρωτή φορτίων είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του πλυντηρίου ρούχων και του θερμοσίφωνα, η οποία επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων αλγορίθμων.

Για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του πλυντηρίου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε στην εργασία (C. Antonopoulos, V. Kapsalis, L. Hadellis, 2012):

- Λαμβάνει ως εισόδους τις τιμές της ενέργειας ανά λεπτό, την ανάλυση της στιγμιαίας κατανάλωσης ανά λεπτό των προγραμμάτων λειτουργίας της συσκευής, το επιθυμητό πρόγραμμα λειτουργίας της συσκευής, και την επιθυμητή ώρα ολοκλήρωσης του προγράμματος λειτουργίας.
- Υπολογίζει διαδοχικά για κάθε λεπτό τη στιγμιαία κατανάλωση του πλυντηρίου για το χρονικό διάστημα που έχει δοθεί από τον χρήστη ως είσοδο. Στη συνέχεια αποθηκεύει την τιμή σε μία λίστα, από την οποία προκύπτει και η ελάχιστη τιμή κόστους λειτουργίας της συσκευής καθώς και η μέγιστη τιμή της.
- Η έξοδος του αλγόριθμου είναι μία λίστα με το κόστος των καταναλώσεων για το σύνολο των δυνατών χρόνων έναρξης του προγράμματος πλύσης στο επιθυμητό διάστημα ολοκλήρωσης και ένας πίνακας με τους αντίστοιχους χρόνους έναρξης της συσκευής. Το χρονοπρόγραμμα λειτουργίας που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο κόστος στέλνεται στην αντίστοιχη οικιακή πύλη για εκτέλεση.

Για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του θερμοσίφωνα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε στην εργασία (V. Kapsalis et al., 2018) και απεικονίζεται ως ψευδοκώδικας στο Σχήμα 7.

Algorithm 1. The operation scheduling algorithm.

inputs: $M, U, A, Q, C, n, t, \mathcal{M} = \{M_1^{dish}, \dots, M_n^{dish}\}, \mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_n\}, T_{pref}, T_{min}, T_{max}, T_{inlet}, T_{amb}, step, cost_{perc}$

outputs: $S^* = \{s_1^*, \dots, s_n^*\}$

$\lambda_{discomfort} = 0$

$excess = false$ (excess = false: the water temperature is lower than the maximum)

do

$\lambda_{cost} = 1 - \lambda_{discomfort}$

Calculate T_{min}

for $i = 1$ **to** n **do**

$S_i = 0$

Calculate T_i^0, T_i^1, T_i^2

end for

do

$\omega = false$ ($\omega = false$: the water temperature is not less than the preferred one)

Find the first slot k (between 1 and n) where $T_k^2 < T_{min}$

if slot k was found **then**

$\omega = true$

$\omega_{max} = \infty$

for $i = 1$ **to** k **do**

if slot i is available **then**

$S_i = 1$ (EWH is switched ON during slot i)

for $j = i$ **to** n **do**

Calculate T_j^0, T_j^1, T_j^2

if $T_j^2 > T_{max}$ **then**

$excess = true$ (excess = true: the water temperature is higher than the maximum)

end if

end for

if $excess = true$ **then**

$S_i = 0$

Mark slot i as not available

else

Calculate the energy cost ($cost_i$) and the normalized energy cost for slot i (w_i^{cost}).

Find the first slot m (between k and n) where $T_m^2 < T_{min}$

Calculate the average normalized comfort cost (discomfort) from slot k to slot m ($w_{average,k,m}^{discomfort}$)

Calculate the objective function (J)

if $J < \omega_{max}$ **then**

$\omega_{max} = J$

Update $S^* = \{s_1^*, \dots, s_n^*\}$

end if

end if

end for

end if

loop until $\omega = false$

if $\lambda_{discomfort} = 0$ **then**

$cost_{min} = cost_i$

end if

$\lambda_{discomfort} = \lambda_{discomfort} + step$

loop while ($\lambda_{discomfort} < 1$) and ($cost_i < (1 + cost_{perc}) * cost_{min}$) and (# of slots that ($T_i^2 < T_{pref}$) $> slots_{acc}$)

Σχήμα 7. Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της λειτουργίας του θερμοσίφωνα

Επιπλέον, ο συγκεντρωτής παρέχει τη δυνατότητα προβολής των ιστορικών στοιχείων μέσα από διαγράμματα προβολής ανά ημέρα: α) της τιμής της ενέργειας, β) της συνολικής κατανάλωσης καθώς και των επιμέρους καταναλώσεων των φορτίων, δ) της σύγκρισης κόστους μεταξύ του βέλτιστου και του τυπικού σεναρίου λειτουργίας των φορτίων.

Παράλληλα, ο συγκεντρωτής υποστηρίζει το ρόλο του διαχειριστή σε επιλεγμένους χρήστες, οι οποίοι έχουν την επιπλέον δυνατότητα προβολής των παραπάνω στοιχείων είτε για το σύνολο των χρηστών είτε για έναν επιλεγμένο υποσταθμό είτε ανά τύπο φορτίου.

Οι εντολές άμεσου ελέγχου της λειτουργίας των ελεγχόμενων φορτίων ή/και το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας τους στέλνονται στον οικιακό ελεγκτή φορτίων για εκτέλεση. Το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας περιλαμβάνει την ώρα ανάμματος/σβησίματος για το θερμοσίφωνα καθώς και την ώρα έναρξης και το πρόγραμμα λειτουργίας για το πλυντήριο ρούχων.

Οι δυναμικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας (Day-Ahead Prices) αντλούνται καθημερινά από τον ιστότοπο του Ευρωπαϊκού Δικτύου Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς (ENTSO-E Transparency Platform, 2022) για κάθε επόμενη ημέρα και αποθηκεύονται στην τοπική βάση δεδομένων για αξιοποίηση στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης.

Εργαλεία υλοποίησης

Για τη δημιουργία του συγκεντρωτή φορτίων απαιτήθηκε η ανάπτυξη μιας διαδικτυακής εφαρμογής με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python (M. Καφές, 2017) για τη δημιουργία τόσο της “back-end” εφαρμογής όσο και της “front-end” εφαρμογής η οποία δύναται να λειτουργήσει σε ένα φυλλομετρητή σε πληθώρα υπολογιστών ή φορητών συσκευών (smartphones, tablets κ.α.).

Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Web framework Django, το οποίο επιτρέπει την δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής με ικανοποιητικό βαθμό ασφάλειας, δυνατότητα επεκτασιμότητας και ευκολία συντηρησιμότητας, καθώς και η γλώσσα προγραμματισμού Javascript. Ως σύστημα διαχείρισης της βάσης δεδομένων επιλέχθηκε το SQLite.

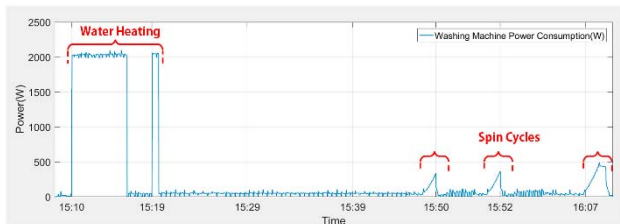
Για την ανάπτυξη και την υλοποίηση του οικιακού ελεγκτή φορτίων χρησιμοποιήθηκε ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi και συγκεκριμένα η έκδοση 4 (4GB RAM) ο οποίος λαμβάνει το χρονοπρόγραμμα λειτουργίας από τον συγκεντρωτή φορτίων και με βάση αυτό ελέγχει τη λειτουργία των φορτίων, προβάλλει την τρέχουσα κατάσταση τους και τέλος, στέλνει στον συγκεντρωτή φορτίων δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας του χρήστη.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

α. Βελτιστοποίηση πλυντηρίου

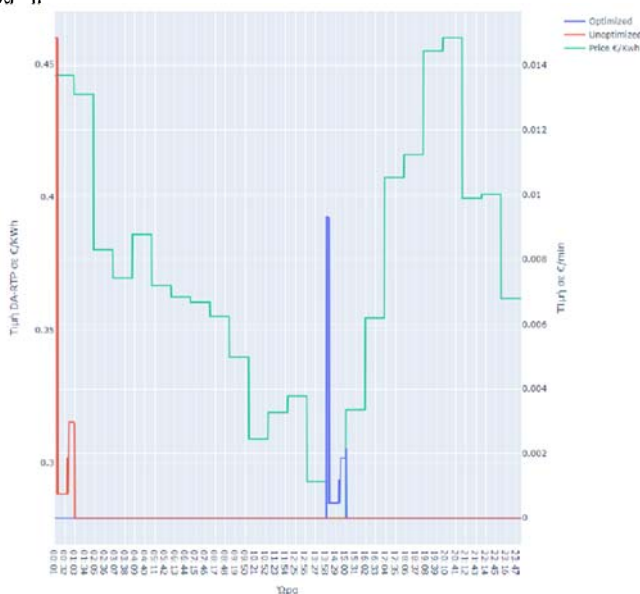
Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα προφίλ κατανάλωσης για το πλυντήριο ρούχων Bosch

WAT24460TR, που παρουσιάστηκαν στην εργασία (F. Issi, 2008). Τα δεδομένα κατανάλωσης αναφέρονται σε 3 προγράμματα λειτουργίας της συσκευής: μάλλινα και συνθετικά στους 40 °C, μικτό πρόγραμμα στους 30 °C και μικτό πρόγραμμα στους 40 °C. Από την παρατήρηση και των τριών προγραμμάτων φαίνεται ότι η μεγαλύτερη στιγμιαία κατανάλωση ισχύος αφορά την λειτουργία της θέρμανσης του νερού με τιμή περίπου στα 2000 W, ενώ η αμέσως επόμενη είναι η λειτουργία στύψιματος με κατανάλωση από 300 W έως 500 W ανάλογα με το πρόγραμμα.



Σχήμα 8. Προφίλ κατανάλωσης για το μικτό πρόγραμμα πλύσης στους 30 °C

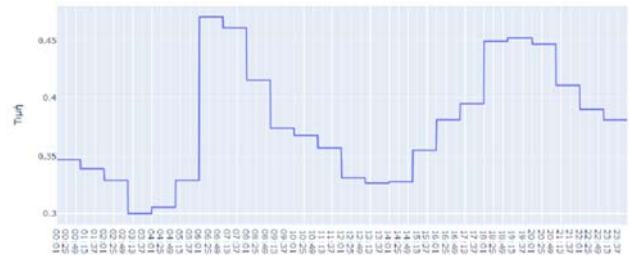
Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το προφίλ κατανάλωσης για το μικτό πρόγραμμα στους 30 °C, ενώ στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η σύγκριση της βελτιστοποιημένης λειτουργίας του πλυντηρίου (μπλε χρώμα) σε σχέση με την τυπική λειτουργία του (κόκκινο χρώμα), καθώς και οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας (πράσινο χρώμα). Ως χρόνος ολοκλήρωσης της πλύσης είχε οριστεί η ώρα 17:00. Το ενεργειακό κόστος πλύσης είναι 0,12 € για τη βελτιστοποιημένη λειτουργία και 0,191 € για την ακριβότερη, επιτυγχάνοντας μείωση της τάξης του 37%. Παρόμοια αποτελέσματα επιτεύχθηκαν και για τα υπόλοιπα προγράμματα πλύσης που δοκιμάστηκαν, δείχνοντας ότι η εφαρμογή τεχνικών απόκρισης ζήτησης έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων.



Σχήμα 9. Σύγκριση τυπικής και βελτιστοποιημένης λειτουργίας πλυντηρίου ρούχων για μία ημέρα

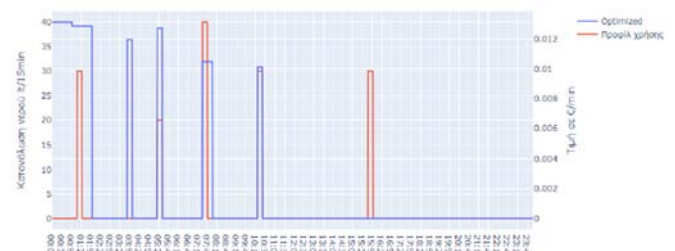
b. Βελτιστοποίηση θερμοσίφωνα

Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του θερμοσίφωνα, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας που φαίνονται στο Σχήμα 10 και τα εξής χαρακτηριστικά του θερμοσίφωνα: χωρητικότητα νερού 150 lt, ισχύς αντίστασης 3000 W, και μέγιστη θερμοκρασία νερού 70 °C.



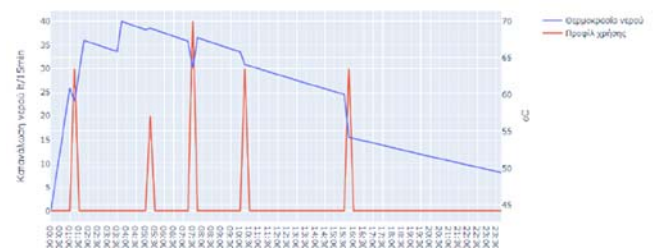
Σχήμα 10. Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για την 25-3-2022

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές παραμέτρων: θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 12 °C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 17 °C, προτιμώμενη θερμοκρασία 40 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 36 °C. Το ημερήσιο προφίλ χρήσης ζεστού νερού (κόκκινο χρώμα) και το βέλτιστο χρονοδιάγραμμα λειτουργία του (μπλε χρώμα) φαίνεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11. Προφίλ χρήσης ζεστού νερού και χρονοδιάγραμμα λειτουργίας του θερμοσίφωνα

Η θερμοκρασία του νερού (μπλε χρώμα) και το προφίλ χρήσης ζεστού νερού (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζεται στο Σχήμα 12. Με βάση τις συγκεκριμένες τιμές ενέργειας, το ημερήσιο κόστος ήταν 2,40 €, επιτυγχάνοντας μείωση της τάξης του 25% σε σχέση με την τυπική λειτουργία. Ωστόσο, αυτή είναι μια ενδεικτική τιμή καθώς η εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται κάθε φορά από το συγκεκριμένο προφίλ χρήσης, τα χαρακτηριστικά του θερμοσίφωνα και τη διακύμανση των τιμών ενέργειας.



Σχήμα 12. Προφίλ χρήσης – θερμοκρασία ζεστού νερού

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Την παρούσα χρονική περίοδο η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζει κρίση με ιδιαίτερα αισθητές αυξήσεις στις τιμές ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι μέσα σε ένα έτος η τιμή της ενέργειας έχει σχεδόν τριπλασιαστεί από 205.00 € σε 608.69 € ανά MWh (μέγιστη τιμή για 20-09-2021 και 20-09-2022, αντίστοιχα). Επιπλέον, η τιμή της ενέργειας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση εντός της ημέρας (ενδεικτικά, στις 20-09-2022, οι τιμές κυμάνθηκαν από 307,94 € ως 608,69 € ανά MWh) (ENTSO-E Transparency Platform, 2022).

Η απόκριση ζήτησης και η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους ενέργειας σε κάθε νοικοκυριό με παράλληλη μείωση της ζήτησης ενέργειας σε περιόδους αιχμής/μειωμένης παραγωγής, καθιστώντας την πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας.

Ο συγκεντρωτής φορτίων που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο όσον αφορά στη μείωση του ενεργειακού κόστους και με τις δυνατότητες επέκτασής του να ενσωματώσει επιπλέον φορτία (π.χ. κλιματιστικό, πλυντήριο πιάτων, φούρνο κ.λπ.), αποκτώντας δυνατότητες ολοκληρωμένης διαχείρισης των οικιακών φορτίων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- United Nations Environmental Programme. (2009). Buildings and Climate Change. Retrieved from <https://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/unep207.pdf>.
- Cappers, P., Goldman, C., & Kathan, D. (2010). Demand response in U.S. electricity markets: Empirical evidence. *Energy*, 35(4), 1526–1535. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.029>
- Antonopoulos, C. P., Kapsalis, V., & Hadellis, L. (2012). Optimal scheduling of smart homes' appliances for the minimization of energy cost under dynamic pricing. In *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2012.6489708>
- Kapsalis, V., Safouri, G., & Hadellis, L. (2018). Cost/comfort-oriented optimization algorithm for operation scheduling of electric water heaters under dynamic pricing. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1053–1065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.024>
- Time Based Rate Programs, U.S Department of Energy Smart Grid. Retrieved from https://www.smartgrid.gov/recovery_act/time_based_rate_programs.html
- Issi, F., & Kaplan, O. (2018). The determination of load profiles and power consumptions of home appliances. *Energies*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/en11030607>
- ENTSO-E Transparency Platform (2022). Transmission Day-ahead Prices, European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) <https://transparency.entsoe.eu/>
- Python. <https://python.org>
- Django introduction, MDN Web Docs. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Server-side/Django/Introduction>
- SQLite. <https://www.sqlite.org/>
- Javascript. <https://javascript.com/>
- Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.org/>