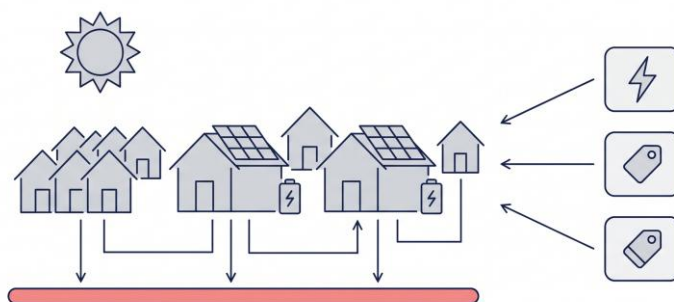


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αυτόνομοι Πράκτορες (Agentic AI) για Δυναμική
Διαχείριση Φορτίου και Ανταλλαγή Ενέργειας σε
Μικροδίκτυα



Του φοιτητή
Ευάγγελος Γιαννόπουλος
Αρ. Μητρώου: 2020024

Επιβλέπων
Καλλιόπη Κραβάρη
Βαθμίδα: Επικ. Καθηγήτρια

Ημερομηνία 03/09/2026

Τίτλος Δ.Ε.: Αυτόνομοι Πράκτορες (Agentic AI) για Δυναμική Διαχείριση Φορτίου και Ανταλλαγή
Ενέργειας σε Μικροδίκτυα

Κωδικός Δ.Ε.: 26170

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Ευάγγελος Γιαννόπουλος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Καλλιόπη Κραβάρη

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 18/03/2026

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 03/09/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ευάγγελου Γιαννόπουλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Η πρόοδος είναι αποτέλεσμα συνεχούς πειραματισμού και βελτίωσης.»

Πρόλογος

Επέλεξα αυτό το θέμα επειδή η λιανική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αναδιοργανώνεται γύρω από μικρότερες, τοπικές μονάδες, και σε κλίμακα μικροδικτύου μπορεί να προσομοιωθεί πράκτορα προς πράκτορα. Ένα μικροδίκτυο είναι αρκετά μικρό ώστε κάθε νοικοκυριό, παραγωγοκαταναλωτής και πάροχος να αναπαρασταθούν ρητά, και αρκετά μεγάλο ώστε να έχουν σημασία ο ανταγωνισμός και η συνολική συμπεριφορά του τροφοδότη.

Με απασχόλησε εξίσου ένας συγκεκριμένος τρόπος με τον οποίο ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να είναι σιωπηλά λανθασμένο. Ο ανταγωνισμός παρόχων μπορεί να αλλάζει ορατά ποιος πάροχος εξυπηρετεί ποιον πελάτη και σε ποια τιμή, ενώ το σχήμα του συνολικού φορτίου του τροφοδότη μένει σχεδόν ανέπαφο. Αν τίποτε δεν συνδέει την τιμή ενός παρόχου με την αιχμή ή τη μεταβλητότητα του τροφοδότη, η ευστάθεια είναι ιδιότητα του καιρού και της ζήτησης, όχι της αγοράς.

Από την εκπόνηση κράτησα κυρίως έναν τρόπο εργασίας. Κράτησα το πλαίσιο σταθερό, με κανόνες που δεν μαθαίνουν και χωρίς εκ των υστέρων ρύθμιση παραμέτρων, ώστε μια μετρική που κινείται να μην αποδίδεται σε προσαρμογή. Έμαθα να κατασκευάζω έναν μηχανισμό του οποίου η επίδραση αποδίδεται σε ένα ονομασμένο κανάλι αντί να δηλώνεται, να ελέγχω τι έχει ήδη αναφερθεί πριν ονομάσω κάτι δικό μου, και να επαληθεύω κάθε αριθμό πριν τον αναφέρω.

Περίληψη

Η εργασία κατασκευάζει πρακτορο-κεντρική προσομοίωση λιανικής αγοράς ενέργειας μικροδικτύου, στο πλαίσιο Mesa. Καταναλωτές και παραγωγοκαταναλωτές επιλέγουν ανάμεσα σε λίγους ανταγωνιζόμενους παρόχους, και κάθε πράκτορας ακολουθεί σταθερό κανόνα: καμία ενισχυτική μάθηση, καμία φυσική δικτύου. Είναι προσομοίωση τιμολόγησης και κατανομής φορτίου, όχι μοντέλο συστημάτων ισχύος.

Η συνεισφορά είναι χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη με δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμα κανάλια ανάδρασης. Το λογιστικό κανάλι χρεώνει μόνο το καθολικό του υπεύθυνου παρόχου και εξ ορισμού δεν μετακινεί φυσικό μέγεθος. Το κανάλι τιμολόγησης μετατρέπει τον επιμερισμό σε προσαύξηση ανά πάροχο στην επόμενη τιμή, κλιμακωμένη από συντελεστή μετακύλισης που φέρει ισχύ σήματος, όχι τιμολογιακό συντελεστή· οδηγεί τιμοευαίσθητο κανόνα αναβολής ζήτησης εντός ημέρας, χωρίς πρόβλεψη, με διατήρηση ενέργειας, σε όλον τον πληθυσμό.

Στο κύριο κελί της σάρωσης 1440 εκτελέσεων (κατώφλι $k=1.0$, τρεις πάροχοι, 30 σπόροι, κατά ζεύγη έναντι του απενεργοποιημένου μηχανισμού), το κανάλι τιμολόγησης μειώνει τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο κατά 9.84 και τον συντελεστή μεταβλητότητας κατά 7.22 τοις εκατό, ενώ αυξάνει το μέσο κόστος ανά πράκτορα κατά 6.0 τοις εκατό. Αναφέρονται 6000 αναλυόμενες γραμμές από 4630 εκτελέσεις του μοντέλου σε έξι σαρώσεις.

Το εύρημα είναι τριμερές. Ο μηχανισμός εξομαλύνει μόνος του τη συνολική μεταβλητότητα. Ο επιμερισμός της χρέωσης σε ανταγωνιζόμενους παρόχους μειώνει την προσαύξηση και τον αναβεβλημένο όγκο ανά πάροχο, περικόπτοντας την ταυτόχρονη αιχμή με μικρότερη επιβάρυνση από μονοπώλιο χωρίς δοσομέτρηση. Η δόση είναι δομική, από κανόνα επιμερισμού με μερίδια που αθροίζουν στη μονάδα, όχι από συντονισμό της αναβολής: μονοπωλητής με αντιστοιχισμένη δόση την αναπαράγει εντός της ζώνης θορύβου ανά σπόρο, οπότε ο ανταγωνισμός είναι ικανός αλλά όχι αναγκαίος. Το όφελος στον λόγο αιχμής ισχύει μόνο εντός δύο περιβαλλουσών, περίπου $k=0.5$ έως 1.5 με τρεις ή περισσότερους παρόχους και μιας ζώνης αναβεβλημένης ενέργειας, χειροτερεύοντας σε 9 από τα 48 κελιά συντελεστών· ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται σε 44 από αυτά και δεν αντιστρέφεται σε κανένα δοκιμασμένο k .

Autonomous Agents (Agentic AI) for Dynamic Load Management and Energy Exchange in Microgrids

Evangelos Giannopoulos

Abstract

This thesis builds an agent-based simulation of a microgrid retail energy market in the Mesa framework. Consumers and prosumers choose among a few competing brokers, and every agent follows a fixed rule: no reinforcement learning, no grid physics. It is a billing and dispatch simulation, not a power-systems model.

The contribution is a shared-feeder scarcity charge with two independently ablatable feedback channels. The accounting channel only debits the responsible broker's ledger and by construction moves nothing physical. The pricing channel turns the same allocation into a next-step, per-broker surcharge, scaled by a passthrough coefficient that carries signal strength, not a tariff rate; it drives a price-elastic, forecast-free, energy-conserving intra-day demand-deferral rule over the whole population.

At the headline cell of the 1440-run main sweep (threshold $k=1.0$, three competing brokers, 30 paired seeds against the mechanism disabled), enabling the pricing channel lowers the feeder's peak-to-average ratio by 9.84 percent and its coefficient of variation by 7.22 percent, while average cost per agent rises by 6.0 percent. The thesis reports 6000 analysed rows from 4630 model runs across six sweeps.

The finding has three parts. The mechanism flattens overall feeder-load variability on its own. Splitting that charge across competing brokers lowers the per-broker surcharge and deferred volume, shaving the coincident peak at a lower cost penalty than an undosed monopoly. The dose is structural, from an allocation rule whose shares sum to one, not from competition coordinating deferral: a dose-matched monopolist reproduces that peak reduction within the seed-level noise band, so competition is sufficient but not necessary. The peak-to-average gain holds only inside two envelopes, roughly $k=0.5$ to 1.5 at three or more brokers and a deferred-energy band, worsening in 9 of 48 tested coefficient cells; the coefficient of variation improves in 44 of 48 and reverses at no k tested.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η υπομονή τους και η εμπιστοσύνη τους σε κάθε βήμα αυτής της πορείας ήταν για μένα σταθερό στήριγμα, ιδίως στις περιόδους που η εκπόνηση της εργασίας απαιτούσε τον περισσότερο χρόνο και κόπο.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στην επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Καλλιόπη Κραβάρη, για τη στήριξή της από την πρώτη στιγμή και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο θέμα που επέλεξα. Η καθοδήγησή της και οι συμβουλές της σε όλα τα στάδια της εκπόνησης ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συντομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας και πρακτορο-κεντρικά μικροδίκτυα.....	1
1.3 Το πρόβλημα: η δομική αναλλοιωσιμότητα του τροφοδότη.....	2
1.4 Ερευνητικό ερώτημα	3
1.5 Στόχοι, σκοποί και παραδοτέα	3
1.6 Συνεισφορά.....	4
1.7 Διάρθρωση της εργασίας.....	5
1.8 Επίλογος	6
Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Πρακτορο-κεντρική μοντελοποίηση αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.....	7
2.3 Το πλαίσιο του agentic AI και οι πράκτορες σταθερών κανόνων.....	8
2.4 Πράκτορες σταθερών κανόνων έναντι πρακτόρων μάθησης.....	9
2.5 Ειδικό πεδίο: λιανικές αγορές μικροδικτύων και επιλογή καταναλωτή.....	9
2.6 Διαχείριση αποθήκευσης παραγωγοκαταναλωτή.....	10
2.7 Απόκριση ζήτησης και χρεώσεις αιχμής ή χωρητικότητας.....	11
2.8 Η στάθμη της τεχνολογίας και το κενό	11
2.9 Επίλογος.....	13
Κεφάλαιο 3ο: Εργαλεία και τεχνολογίες	14
3.1 Εισαγωγή	14
3.2 Γλώσσα και περιβάλλον εκτέλεσης.....	14
3.3 Το πλαίσιο Mesa 3.5.1 και ο τρόπος χρήσης του	14
3.4 Επιστημονική στοίβα	15

3.5	Έλεγχος: pytest και pytest-xdist	16
3.6	Πηγές δεδομένων ως εργαλεία	16
3.7	Ο μηχανισμός αρχείων παραμετροποίησης	17
3.8	Εργαλεία πειραμάτων και ανάλυσης	17
3.9	Διαδικασία: git και ανταγωνιστική επιθεώρηση ανά φάση	17
3.10	Επίλογος	18
Κεφάλαιο 4ο:	Αρχιτεκτονική συστήματος και μοντέλο προσομοίωσης	19
4.1	Εισαγωγή	19
4.2	Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής	19
4.3	Ο ωριαίος βρόχος βήματος	20
4.4	Τα τρία αρχέτυπα παρόχων	21
4.5	Ο πληθυσμός: καταναλωτές, παραγωγοκαταναλωτές και οι κανόνες τους	24
4.6	Διαχείριση φωτοβολταϊκών και μπαταρίας του παραγωγοκαταναλωτή	26
4.7	Δεδομένα εισόδου	27
4.8	Οι τέσσερις μετρικές της εργασίας	28
4.9	Επίλογος	30
Κεφάλαιο 5ο:	Υλοποίηση: ο μηχανισμός χωρητικότητας και οι σχεδιαστικές αποφάσεις	31
5.1	Εισαγωγή	31
5.2	Σκοπός και εμβέλεια του μηχανισμού	31
5.3	Η χρέωση σπανιότητας	32
5.4	Επιμερισμός στους παρόχους	32
5.5	Τα δύο κανάλια ανάδρασης	33
5.6	Τρόποι κατανομής της προσαύξεσης και ο διαιρέτης	35
5.7	Το φυσικό κανάλι: τιμοευαίσθητη αναβολή ζήτησης	37
5.8	Οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις	38
5.9	Ιστορικό της σχεδίασης: από το D6 στο D7	39
5.10	Δύο τεκμηριωμένα σφάλματα και οι διορθώσεις τους	40
5.11	Γιατί αυτή η κατασκευή απομονώνει τα κανάλια	41
5.12	Επίλογος	41
Κεφάλαιο 6ο:	Πειραματική σχεδίαση και επικύρωση	42
6.1	Εισαγωγή	42
6.2	Επισκόπηση των έξι σαρώσεων	42
6.3	Η κύρια σάρωση ευαισθησίας	43
6.4	Κατασκευή του πλήθους παρόχων και το εύρημα ονομαστικών έναντι ενεργών	44
6.5	Τι καταγράφει κάθε εκτέλεση	44

6.6	Στατιστική μεθοδολογία.....	45
6.7	Σάρωση δομικών συντελεστών (D9) και η επαλήθευση της αναλλοιωσιμότητας.....	46
6.8	Σύγκριση μετρημένης ζήτησης (OPSD).....	46
6.9	Σκέλος ελέγχου κατανομής προσαύξησης (D10).....	47
6.10	Σκέλος μονοπωλίου εξισωμένης δόσης (D11)	47
6.11	Η σουίτα ελέγχων ως τεκμήριο επικύρωσης	48
6.12	Επίλογος.....	48
Κεφάλαιο 7ο: Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση.....		50
7.1	Εισαγωγή.....	50
7.2	Καθαρή απομόνωση των καναλιών.....	50
7.3	Μετρική 3: ευστάθεια του τροφοδότη.....	51
7.4	Μετρική 1: μέσο κόστος ανά πράκτορα.....	53
7.5	Μετρικές 2 και 4: σχεδόν αμετάβλητες.....	54
7.6	Ετερογένεια της προσαύξησης μεταξύ παρόχων	55
7.7	Ρυθμός ενεργοποίησης έναντι k	55
7.8	Αλλαγή παρόχου	56
7.9	Το συμπληρωματικό σκέλος μονοπωλίου.....	57
7.10	Ο έλεγχος κατανομής της προσαύξησης (D10).....	58
7.11	Πολλαπλές συγκρίσεις και διαστήματα bootstrap.....	60
7.12	Ευαισθησία στους δομικούς συντελεστές (D9).....	61
7.13	Έλεγχος ανθεκτικότητας: μετρημένη ζήτηση OPSD	64
7.14	Μονοπώλιο εξισωμένης δόσης (D11)	64
7.15	Επίλογος.....	66
Κεφάλαιο 8ο: Συζήτηση και περιορισμοί		68
8.1	Εισαγωγή.....	68
8.2	Τι στηρίζουν τα αποτελέσματα	68
8.3	Δύο περιβάλλοντες: το κατώφλι k και ο όγκος αναβεβλημένης ενέργειας	69
8.4	Τι διευθετεί και τι δεν διευθετεί ο έλεγχος εξισωμένης δόσης	70
8.5	Ο συντελεστής μετακύλισης, επαναδιατυπωμένος	71
8.6	Περιορισμοί.....	71
8.7	Η ειλικρινής συνολική εικόνα	73
8.8	Επίλογος.....	74
Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....		75
9.1	Εισαγωγή.....	75
9.2	Η συνεισφορά, επαναδιατυπωμένη	75

9.3	Κεντρικό εύρημα.....	75
9.4	Το πλαίσιο καινοτομίας και ο τρόπος που διαμόρφωσε την εργασία	77
9.5	Μελλοντική εργασία	77
9.6	Επίλογος.....	78
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Εξωτερική επικύρωση του προσομοιωμένου τροφοδότη.....		81
A.1	Σκοπός και εμβέλεια.....	81
A.2	Μέθοδος	81
A.3	Αποτελέσματα	83
A.4	Ετυμηγορία.....	85
A.5	Συζήτηση των στατιστικών εκτός εύρους	86
A.5.1	Συντελεστής ταυτοχρονισμού και συντελεστής διαφοροποίησης.....	86
A.5.2	Εποχή της ετήσιας αιχμής και λόγος χειμώνα προς καλοκαίρι	87
A.5.3	Ωρα της ημερήσιας αιχμής	87
A.5.4	Συντελεστής φορτίου και λόγος αιχμής προς μέσο όρο	88
A.5.5	Λόγος ελαχίστου προς μέγιστο και ώρες καθαρής εξαγωγής	89
A.5.6	Βάθος νυχτερινής κοιλάδας.....	89
A.6	Τι θα το άλλαζε.....	89
A.7	Επίδραση του μηχανισμού χωρητικότητας στην ευλογοφάνεια	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Συνοπτική αναφορά επαλήθευσης.....		91
B.1	Τι σημαίνει επαλήθευση εδώ.....	91
B.2	Η επιφάνεια που φέρει ισχυρισμούς.....	91
B.3	Έλεγχος μεταλλάξεων	91
B.4	Κάλυψη κώδικα	92
B.5	Ο έλεγχος κενών ισχυρισμών	92
B.6	Αναπαραγωγικότητα και ντετερμινισμός.....	93
B.7	Διαδρομές αναπαραγωγής	93
B.8	Η ετυμηγορία πιστοποίησης	93
B.9	Τι παραμένει ανεπαλήθευτο	94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πίνακες παραμετροποίησης και αποσπάσματα κώδικα.....		96
Γ.1	Εισαγωγή.....	96
Γ.2	Γενικές παράμετροι προσομοίωσης, πληθυσμού και δεδομένων	96
Γ.3	Εύρη παραμέτρων ανά πράκτορα	97
Γ.4	Παράμετροι του μηχανισμού χωρητικότητας	98
Γ.5	Παράμετροι των τριών παρόχων.....	99

Γ.6 Τα έξι σενάρια επικάλυψης.....	101
Γ.7 Το άρθρωμα του μηχανισμού χωρητικότητας	101
Γ.8 Ο ωριαίος βρόχος βήματος	105
Γ.9 Ο κανόνας απόκρισης του καταναλωτή.....	106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Οδηγός εκτέλεσης του λογισμικού	108
Δ.1 Απαιτήσεις και εγκατάσταση.....	108
Δ.2 Εκτέλεση των ελέγχων	108
Δ.3 Εκτέλεση του μοντέλου	108
Δ.4 Εκτέλεση των σαρώσεων.....	108
Δ.5 Ανάλυση και αποτελέσματα	109
Δ.6 Αρχεία αποτελεσμάτων και στήλες μετρικών	109
Δ.7 Διάταξη του αποθετηρίου	110

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Σχηματική εικόνα του μικροδικτύου της εργασίας.....	2
Σχήμα 4.1: Η αρχιτεκτονική του συστήματος.....	20
Σχήμα 4.2: Οι ωριαίες τιμές των τριών παρόχων σε έναν χρόνο.	23
Σχήμα 4.3: Ο μεταβλητός πάροχος: ημερήσιες κηροπήγιες, κατανομή καινοτομιών και κανονικά ποσοστημόρια.....	24
Σχήμα 4.4: Ο πράκτορας και οι κανόνες απόφασής του.	25
Σχήμα 5.1: Η ροή σήματος του μηχανισμού χωρητικότητας.	35
Σχήμα 6.1: Η πειραματική αλυσίδα της εργασίας.....	43
Σχήμα 7.1: Συντελεστής μεταβλητότητας και λόγος αιχμής προς μέσο όρο ως προς το k	53
Σχήμα 7.2: Σύγκριση των τεσσάρων αφαιρετικών διαμορφώσεων στις μετρικές αναφοράς.	54
Σχήμα 7.3: Ετερογένεια της προσαύξεσης κατά την κατάταξη μεριδίου φορτίου.	55
Σχήμα 7.4: Ο ρυθμός ενεργοποίησης του μηχανισμού ως προς το k	56
Σχήμα 7.5: Οι δύο πρώτες υπομετρικές της μετρικής 3 με το σκέλος μονοπωλίου.....	58
Σχήμα 7.6: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο υπό τους τρεις κανόνες κατανομής.....	60
Σχήμα 7.7: Περιθώριες επιδράσεις και αλληλεπίδραση των δομικών συντελεστών.	63
Σχήμα 7.8: Επίδραση και αναβεβλημένος όγκος ως προς τον διαιρέτη προσαύξεσης.....	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Οι καθηλωμένες εκδόσεις των εξαρτήσεων και η χρήση τους.....	16
Πίνακας 4.1: Τα τρία αρχέτυπα παρόχων της προεπιλεγμένης διαμόρφωσης.	23
Πίνακας 4.2: Τα οκτώ διαστήματα δειγματοληψίας των παραμέτρων των πρακτόρων.	26
Πίνακας 4.3: Οι τέσσερις μετρικές της εργασίας και οι υπομετρικές τους.....	30
Πίνακας 5.1: Τα δύο κλειδιά ελέγχου του μηχανισμού χωρητικότητας.....	36
Πίνακας 5.2: Οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις και οι τρεις σημαίες τους.....	38
Πίνακας 6.1: Οι έξι σαρώσεις της πειραματικής σχεδίασης.	42
Πίνακας 7.1: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο: ποσοστιαία μεταβολή ανά k και πλήθος παρόχων.	51
Πίνακας 7.2: Συντελεστής μεταβλητότητας: ποσοστιαία μεταβολή ανά k και πλήθος παρόχων.	51
Πίνακας 7.3: Μέσο κόστος ανά πράκτορα: ποσοστιαία μεταβολή ανά k και πλήθος παρόχων.	53
Πίνακας 7.4: Μέσος ρυθμός ενεργοποίησης του πλήρους μηχανισμού ανά k και πλήθος παρόχων....	56
Πίνακας 7.5: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο στη σάρωση δομικών συντελεστών.	61
Πίνακας 7.6: Τα 15 σημεία του ανεστραμμένου U κατά αναβεβλημένο όγκο.	63
Πίνακας 7.7: Συνθετική έναντι μετρημένης ζήτησης OPSD στο κελί αναφοράς ($k = 1.0$, πλήθος παρόχων 3).	64
Πίνακας 7.8: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο και αναβεβλημένος όγκος ανά σκέλος δόσης.	65
Πίνακας Α.1: Στατιστικά σχήματος φορτίου του τροφοδότη έναντι δημοσιευμένων μεγεθών.....	84
Πίνακας Γ.1: Γενικές παράμετροι προσομοίωσης, πληθυσμού και δεδομένων.....	97
Πίνακας Γ.2: Τα οκτώ εύρη δειγματοληψίας των παραμέτρων ανά πράκτορα.	98
Πίνακας Γ.3: Οι παράμετροι του μηχανισμού χωρητικότητας.	99
Πίνακας Γ.4: Οι πλήρεις παράμετροι των τριών αρχετύπων παρόχου.....	101
Πίνακας Γ.5: Τα έξι σενάρια επικάλυψης.	101

Συντομογραφίες

AI	Artificial Intelligence (τεχνητή νοημοσύνη)
API	Application Programming Interface (διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών)
AR(1)	Autoregressive process of order 1 (αυτοπαλίνδρομη διαδικασία πρώτης τάξης)
CIGRE	Conseil International des Grands Reseaux Electriques
CIRED	International Conference on Electricity Distribution
CoV	Coefficient of Variation (συντελεστής μεταβλητότητας)
CSV	Comma-Separated Values (μορφή αρχείου με τιμές χωρισμένες με κόμμα)
D1...D11	Αναγνωριστικά των σχεδιαστικών αποφάσεων του ημερολογίου αποφάσεων του αποθετηρίου
EUR	Ευρώ (euro)
F2, F3, F4	Αναγνωριστικά των διορθώσεων και επαναβαθμονομήσεων του ημερολογίου αποφάσεων του αποθετηρίου
GW	Gigawatt (γιγαβάτ)
HHI	Herfindahl-Hirschman Index (δείκτης συγκέντρωσης Herfindahl-Hirschman)
IEA	International Energy Agency (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kWh	Kilowatt-hour (κυλοβατώρα)
kWp	Kilowatt-peak (κυλοβάτ αιχμής)
MB	Megabyte (μεγαμπάιτ)
MW	Megawatt (μεγαβάτ)
MWh	Megawatt-hour (μεγαβατώρα)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ODYSSEE-MURE	Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων ενεργειακών δεικτών, πηγή του εύρους κατανάλωσης ανά κατοικία
OPSD	Open Power System Data (πηγή μετρημένων δεδομένων οικιακού φορτίου)
P&L	Profit and Loss (κέρδη και ζημιές, το λογιστικό κανάλι του μηχανισμού)
PAR	Peak-to-Average Ratio (λόγος αιχμής προς μέσο όρο)
PNG	Portable Network Graphics (μορφή αρχείου εικόνας)
PV	Photovoltaics (φωτοβολταϊκά)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System (πηγή της ωριαίας ηλιακής σειράς)
RNG	Random Number Generator (γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών)
SMART-DS	Synthetic Models for Advanced, Realistic Testing: Distribution systems and Scenarios
SSR	Self-Sufficiency Ratio (λόγος αυτόαρκειας παραγωγοκαταναλωτή)
TWh	Terawatt-hour (τεραβατώρα)
UTC	Coordinated Universal Time (συντονισμένη παγκόσμια ώρα)
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΔΙ.ΠΑ.Ε.	Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΡΑΑΕΥ	Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
ΧΤ	Χαμηλή τάση

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

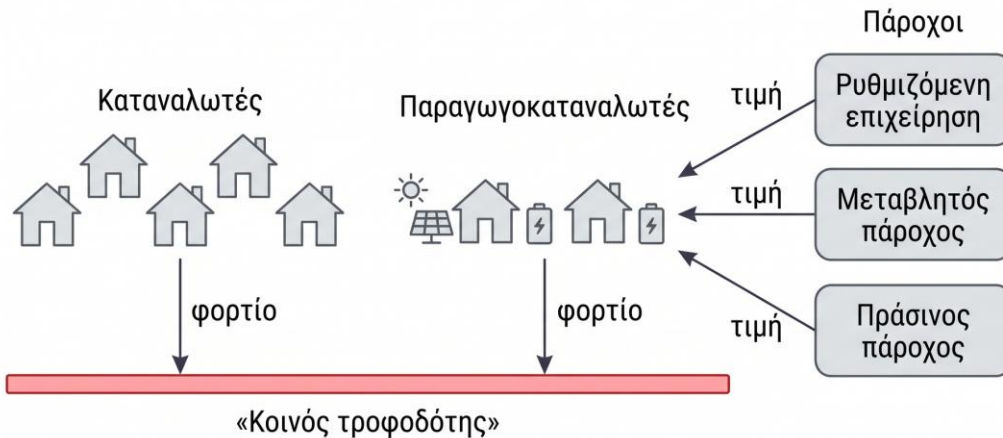
1.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό τοποθετεί την εργασία στο πεδίο της, διατυπώνει το πρόβλημα που την προκάλεσε και το ερευνητικό ερώτημα στο οποίο απαντά, καταγράφει τους στόχους, τους σκοπούς και τα παραδοτέα, συνοψίζει τη συνεισφορά και δίνει τη διάρθρωση των υπόλοιπων κεφαλαίων. Δύο προτάσεις ορίζουν εξαρχής την εμβέλεια, ώστε να μην αφεθεί σε κανένα σημείο ασαφής. Κάθε πράκτορας του μοντέλου, καταναλωτής, παραγωγοκαταναλωτής ή πάροχος, ακολουθεί σταθερό κανόνα απόφασης: πουθενά δεν χρησιμοποιείται ενισχυτική μάθηση. Επίσης πουθενά δεν μοντελοποιείται φυσική δικτύου, δηλαδή ροή ισχύος, τάση ή όρια γραμμών. Πρόκειται για προσομοίωση τιμολόγησης και διαχείρισης φορτίου σε μια λιανική αγορά, όχι για μοντέλο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας και πρακτορο-κεντρικά μικροδίκτυα

Η λιανική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αναδιοργανώνεται γύρω από μικρότερες και πιο τοπικές μονάδες προσφοράς και ζήτησης. Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) στέγης, οι οικιακές μπαταρίες και οι πάροχοι λιανικής τρίτων μετέτρεψαν αυτό που ήταν κάποτε μια μοναδική σχέση με μια ρυθμιζόμενη επιχείρηση κοινής ωφέλειας σε μια μικρή αγορά: ένα νοικοκυριό επιλέγει ανάμεσα σε λίγους ανταγωνιζόμενους παρόχους, ενώ μια μειοψηφία νοικοκυριών μπορεί επιπλέον να παράγει και να αποθηκεύει ενέργεια η ίδια.

Το μικροδίκτυο είναι μια βολική κλίμακα για τη μελέτη αυτής της αγοράς: αρκετά μικρό ώστε να προσομοιωθεί πράκτορα προς πράκτορα, και αρκετά μεγάλο ώστε να έχουν σημασία τόσο ο ανταγωνισμός όσο και η συνολική συμπεριφορά του τροφοδότη. Και τα δύο σκέλη αυτής της ισορροπίας μετράνε για την παρούσα εργασία. Σε πολύ μικρότερη κλίμακα, ένα ή δύο νοικοκυριά, δεν υπάρχει αγορά να παρατηρηθεί, αφού ο ανταγωνισμός των παρόχων δεν έχει πληθυσμό πάνω στον οποίο να εκδηλωθεί. Σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα, η αναπαράσταση κάθε νοικοκυριού ως ξεχωριστού πράκτορα παύει να είναι πρακτική και η ανάλυση αναγκαστικά επιστρέφει σε συγκεντρωτικά μεγέθη, οπότε χάνεται ακριβώς η ατομική απόφαση που το μοντέλο θέλει να αποδώσει. Στην κλίμακα του μικροδικτύου η ατομική απόφαση και το άθροισμά της στον κοινό τροφοδότη παραμένουν και τα δύο ορατά μέσα στο ίδιο μοντέλο. Η δομή αυτή, δηλαδή ο κοινός τροφοδότης, οι καταναλωτές, οι παραγωγοκαταναλωτές και οι λίγοι ανταγωνιζόμενοι πάροχοι, αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Σχηματική εικόνα του μικροδικτύου της εργασίας.

Η πρακτορο-κεντρική μοντελοποίηση είναι φυσικό εργαλείο για αυτό το πλαίσιο. Κάθε καταναλωτής, παραγωγοκαταναλωτής και πάροχος μπορεί να αναπαρασταθεί ως αυτόνομος πράκτορας με δικό του σύνολο κανόνων, και το συνολικό αποτέλεσμα αναδύεται από πολλές, ατομικά απλές αποφάσεις αντί να προκύπτει από μια ενιαία βελτιστοποιημένη διαχείριση. Το πρόσφατο ενδιαφέρον για το *agentive AI* επεκτείνει την ίδια ιδέα: αυτόνομοι πράκτορες λογισμικού που παρατηρούν, αποφασίζουν και δρουν με βάση τοπική πληροφορία υπό μια σταθερή πολιτική απόφασης, και όχι ένας κεντρικός ελεγκτής ρυθμισμένος στο χέρι. Η παρούσα εργασία υιοθετεί αυτό το πλαίσιο, χωρίς όμως πράκτορες μάθησης: «*agentive*» εδώ σημαίνει ότι κάθε πράκτορας αντιλαμβάνεται τη δική του τοπική κατάσταση και ενεργεί πάνω της σε κάθε ωριαίο βήμα, όχι ότι κάποιος πράκτορας μαθαίνει μια πολιτική. Κάθε πράκτορας του μοντέλου ακολουθεί σταθερό κανόνα, δεν χρησιμοποιείται ενισχυτική μάθηση πουθενά, και δεν μοντελοποιείται φυσική δικτύου, δηλαδή ροή ισχύος, τάση ή όρια γραμμών. Η εμβέλεια είναι μια προσομοίωση χρέωσης και κατανομής φορτίου για τον λιανικό ανταγωνισμό και την απόκριση της ζήτησης, όχι ένα μοντέλο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3 Το πρόβλημα: η δομική αναλλοιωσιμότητα του τροφοδότη

Μια λιανική αγορά τριών παρόχων με σταθερούς κανόνες είναι εύκολο να κατασκευαστεί και εξίσου εύκολο να αστοχήσει με έναν πολύ συγκεκριμένο τρόπο: ο ανταγωνισμός των παρόχων μπορεί να αλλάζει ορατά ποιος πάροχος εξυπηρετεί ποιον πελάτη και σε ποια μέση τιμή, αφήνοντας ταυτόχρονα σχεδόν ανέπαφο το φυσικό σχήμα του συνολικού φορτίου του τροφοδότη. Αν η ζήτηση των καταναλωτών είναι ανελαστική ως προς την τιμή και οι μπαταρίες της μικρής μειοψηφίας των παραγωγοκαταναλωτών εκτελούν έναν σταθερό τοπικό κανόνα, τότε τίποτα μέσα στο μοντέλο δεν συζεύγγει την τιμή ενός παρόχου με την αιχμή, τη μεταβλητότητα ή τον ρυθμό μεταβολής του τροφοδότη. Υπό αυτή τη στοιχειώδη διαμόρφωση, η ευστάθεια δικτύου είναι ιδιότητα του καιρού και του προφίλ ζήτησης, όχι της αγοράς.

Αυτό είναι πραγματικός κίνδυνος για κάθε εργασία που ισχυρίζεται ότι οι ανταγωνιστικές αγορές παράγουν πιο ρεαλιστικό μοντέλο αποκεντρωμένων έξυπνων ενεργειακών αγορών: αν η αγορά δεν μπορεί να μετακινήσει τη μοναδική μετρική που υποτίθεται ότι εκπροσωπεί αποτελέσματα σε επίπεδο δικτύου, ο κεντρικός ισχυρισμός δεν έχει τίποτα πίσω του για τη μετρική αυτή. Η διάγνωση δεν αφορά

κάποιο σφάλμα υλοποίησης, αφορά τη δομή του ίδιου του μοντέλου: με τους κανόνες αυτούς, καμία διαδρομή δεν οδηγεί από την τιμή στο φορτίο.

Οι αιτίες αυτής της δομικής αναλλοιωσιμότητας είναι δύο, όχι μία, και η διάκριση έχει σημασία γιατί ορίζει τι πρέπει να προστεθεί. Η επιπεδότητα της μετρικής 3, ευστάθεια δικτύου, υπό τη στοιχειώδη βάση αναφοράς προκαλείται και από την εσκεμμένη απουσία μηχανισμού χωρητικότητας και από την πλήρως ανελαστική ως προς την τιμή ζήτηση των καταναλωτών, όπου η ωριαία ζήτηση κάθε πράκτορα εξαρτάται μόνο από το προφίλ ζήτησης και την κλίμακα ζήτησης του πράκτορα, ποτέ από την τιμή ή από την επιλογή παρόχου, για κάθε προφίλ συμπεριφοράς. Ακόμη και αν ο μηχανισμός χωρητικότητας προστεθεί, η ζήτηση εξακολουθεί να μην αποκρίνεται σε τιμολογιακά σήματα, οπότε η ευστάθεια δικτύου παραμένει εν μέρει αναίσθητη στη δυναμική των τιμών σε επίπεδο παρόχου. Το πρόβλημα απαιτεί επομένως δύο προσθήκες μαζί, ένα σήμα και έναν αποδέκτη του σήματος, και όχι μία.

Από τη διάγνωση προκύπτουν δύο ερωτήματα. Πρώτον, παράγει ο ανταγωνισμός παρόχων με σταθερούς κανόνες, όπως μοντελοποιείται εδώ, μετρήσιμα διαφορετικά και ειδικότερα καλύτερα αποτελέσματα σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις μετρικές αξιολόγησης, δηλαδή στο μέσο κόστος, στην κατανομή φορτίου, στην ευστάθεια δικτύου και στην αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών; Δεύτερον, μπορεί η ευστάθεια δικτύου να γίνει αποκρίσιμη σε αυτόν τον ανταγωνισμό χωρίς να εισαχθεί ούτε ενισχυτική μάθηση ούτε ρητό μοντέλο φυσικής δικτύου, καθώς και τα δύο βρίσκονται εκτός του πλαισίου της εργασίας;

1.4 Ερευνητικό ερώτημα

Το ερώτημα στο οποίο απαντά η εργασία διατυπώνεται ως ένα ενιαίο, υπό όρους ερώτημα και όχι ως σειρά επιμέρους ερωτημάτων, επειδή το δεύτερο σκέλος του έχει νόημα μόνο αν το πρώτο απαντηθεί καταφατικά.

Μπορεί μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη, εφαρμοσμένη ως τιμολογιακό σήμα σε ένα μικρό σύνολο ανταγωνιζόμενων παρόχων με σταθερούς κανόνες, να κατασκευαστεί έτσι ώστε η επίδρασή της στην ευστάθεια του τροφοδότη να αποδίδεται καθαρά σε ένα κανάλι τιμολόγησης και όχι σε ένα λογιστικό κανάλι, και, αν ναι, σε ποιο εύρος της παραμέτρου κατωφλίου της χρέωσης βελτιώνει πράγματι την ευστάθεια, πάνω σε έναν συνθετικό αλλά ρεαλιστικό οικιακό πληθυσμό μικροδικτύου;

Ολόκληρη η εργασία είναι οριοθετημένη σε αυτό το ερώτημα. Η καθαρή απόδοση της επίδρασης σε ένα ονομαστικό κανάλι και ο προσδιορισμός του εύρους του κατωφλίου εντός του οποίου η επίδραση είναι βελτιωτική είναι τα δύο πράγματα που μετρώνται, και όχι κάποιος γενικός ισχυρισμός περί ευστάθειας δικτύων.

1.5 Στόχοι, σκοποί και παραδοτέα

Στόχος της εργασίας είναι να κατασκευαστεί μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη της οποίας η επίδραση στην ευστάθεια του τροφοδότη να αποδίδεται σε ένα ονομαστικό κανάλι. Αυτό σημαίνει ότι ο μηχανισμός δεν σχεδιάζεται απλώς για να λειτουργεί, αλλά για να μπορεί να απενεργοποιηθεί κατά κανάλι: αν η βελτίωση παραμένει όταν λειτουργεί μόνο το λογιστικό κανάλι, η απόδοση της βελτίωσης στο κανάλι τιμολόγησης καταρρίπτεται από την ίδια τη μέτρηση.

Σκοπός της εργασίας είναι να χαρακτηριστεί η περιβάλλουσα λειτουργίας του μηχανισμού και όχι να επιδειχθεί ένα ευνοϊκό σημείο λειτουργίας. Η διαφορά είναι πρακτική: μια σάρωση που αναζητά την καλύτερη διαμόρφωση παράγει ένα νούμερο χωρίς όρια ισχύος, ενώ μια σάρωση που διατρέχει την παράμετρο κατωφλίου με τους δομικούς συντελεστές σταθερούς παράγει το εύρος εντός του οποίου ο

μηχανισμός βοηθά και το εύρος εκτός του οποίου βλάπτει. Οι αντιστροφές αναφέρονται όπως μετρήθηκαν, με το πρόσημο και το μέγεθός τους, και δεν αποσιωπώνται ούτε επαναδιατυπώνονται εκ των υστέρων.

Τα παραδοτέα είναι συγκεκριμένα και όλα υπάρχουν στο αποθετήριο της εργασίας. Πρώτον, το πακέτο Python της εργασίας, που υλοποιεί το μοντέλο, τους πράκτορες, τους παρόχους, τον μηχανισμό χωρητικότητας και τον υπολογισμό των τεσσάρων μετρικών. Δεύτερον, το σύνολο παραμετροποίησης, δηλαδή το παραδιδόμενο αρχείο διαμόρφωσης μαζί με έξι επικαλύψεις σεναρίων που αλλάζουν μόνο ό,τι χρειάζεται να αλλάξει. Τρίτον, τα αποτελέσματα έξι σαρώσεων, δεσμευμένα στο αποθετήριο, συνολικά 6000 αναλυμένες γραμμές από 4630 εκτελέσεις του μοντέλου, μαζί με τα συνοπτικά αρχεία CSV και τα δέκα σχήματα αποτελεσμάτων. Τέταρτον, τα σεναρία εκτέλεσης και ανάλυσης που παράγουν και επεξεργάζονται αυτές τις σαρώσεις. Πέμπτον, η σουίτα ελέγχων, 461 επιτυχόντες έλεγχοι και 3 παραλειπόμενοι, μαζί με τα χρυσά πρότυπα που καθλώνουν τα νούμερα που φέρουν ισχυρισμούς, ώστε μια αναπαραγωγή της ανάλυσης που αποκλίνει να αποτυγχάνει σε έλεγχο αντί να αντικαθιστά σιωπηλά ένα νούμερο. Έκτον, το παρόν κείμενο, που τεκμηριώνει τη σχεδίαση, τη μεθοδολογία και τα μετρημένα αποτελέσματα.

1.6 Συνεισφορά

Η εργασία συνεισφέρει μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη με δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμα κανάλια ανάδρασης. Η χρέωση υπολογίζεται από ένα κυλιόμενο κατώφλι, τον μέσο όρο συν k φορές την τυπική απόκλιση της καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη σε ένα παράθυρο προηγούμενων ωρών, και επιμερίζεται στους παρόχους ανάλογα με τη συνεισφορά των δικών τους πελατών στο φορτίο του τροφοδότη εκείνου του βήματος. Είναι τιμολογιακή και λογιστική κατασκευή, όχι αναπαράσταση φυσικής χωρητικότητας δικτύου: πουθενά στην εργασία δεν μοντελοποιείται ροή ισχύος, τάση ή όριο γραμμής. Το ένα κανάλι ανάδρασης, το λογιστικό, χρεώνει μόνο το καθολικό του υπεύθυνου παρόχου, είναι καθαρά λογιστικό και εξ κατασκευής δεν μπορεί να μετακινήσει κανένα φυσικό μέγεθος. Το άλλο, το κανάλι τιμολόγησης, μετατρέπει τον ίδιο επιμερισμό σε προσαύξηση ανά πάροχο, σε EUR/kWh, που προστίθεται στην προσφερόμενη τιμή του παρόχου στο επόμενο βήμα.

Η προσαύξηση κλιμακώνεται από τον συντελεστή μετακύλισης, ο οποίος είναι συντελεστής ισχύος σήματος και όχι τιμολογιακός συντελεστής σε EUR/kWh: μετατρέπει ένα αδιάστατο μερίδιο συνεισφοράς σε προσθετικό όρο τιμής. Υπό τον αναλογικό κανόνα που ενσωματώνεται στο μοντέλο, και σε μια ώρα κατά την οποία η χρέωση όντως ενεργοποιείται, ένας πάροχος που συνεισέφερε περισσότερο στην αιχμή λαμβάνει αυστηρά μεγαλύτερη προσαύξηση από έναν που συνεισέφερε λιγότερο. Σε ώρα κατά την οποία η χρέωση δεν ενεργοποιείται, η προσαύξηση κάθε παρόχου είναι ακριβώς 0.0, οπότε καμία αυστηρή ανισότητα δεν ισχύει. Επειδή τα δύο κανάλια είναι ανεξάρτητα ενεργοποιήσιμα, το μοντέλο μπορεί να απομονώσει ποιο από τα δύο, αν κάποιο, μετακινεί πράγματι τη φυσική μετρική ευστάθειας του τροφοδότη.

Η απομόνωση του καναλιού είναι μόνο το μισό της συνεισφοράς. Ένα καθαρά τιμολογιακό σήμα δεν μπορεί να μετακινήσει φυσικό μέγεθος αν κάτι μέσα στο μοντέλο δεν αποκρίνεται στην τιμή. Το δεύτερο μισό είναι ένας τιμοευαίσθητος κανόνας ενδοημερήσιας αναβολής ζήτησης, χωρίς πρόβλεψη και με διατήρηση ενέργειας, που εφαρμόζεται σε κάθε πράκτορα και όχι μόνο στη μειοψηφία των παραγωγοκαταναλωτών: μετατοπίζει ένα φραγμένο κλάσμα της ωριαίας ζήτησης έξω από την ώρα σπανιότητας και το αποπληρώνει αργότερα με φραγμένο ρυθμό, με τη δεξαμενή αναβλημένης ενέργειας να μεταφέρεται πέρα από τα μεσάνυχτα αντί να αδειάζει αναγκαστικά σε μια σταθερή ώρα

του ρολογιού. Αυτό είναι το φυσικό κανάλι μέσω του οποίου η ανάδραση τιμολόγησης, και μόνο αυτή, δρα στην ευστάθεια του τροφοδότη.

Στο κύριο σημείο λειτουργίας της σάρωσης, δηλαδή σε κατώφλι $k = 1.0$ με τρεις ανταγωνιζόμενους παρόχους, η ενεργοποίηση του καναλιού τιμολόγησης βελτιώνει μετρήσιμα την ευστάθεια του τροφοδότη: ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο μειώνεται κατά 9.84 τοις εκατό και ο συντελεστής μεταβλητότητας κατά 7.22 τοις εκατό, και τα δύο κατά ζεύγη έναντι του μηχανισμού απενεργοποιημένου. Η βελτίωση δεν είναι δωρεάν, και από μόνη της δεν αποτελεί τεκμήριο ότι ο ίδιος ο ανταγωνισμός των παρόχων βελτιώνει την ευστάθεια. Η ενεργοποίηση του καναλιού τιμολόγησης αυξάνει το μέσο κόστος των καταναλωτών κατά ποσό που συρρικνώνεται καθώς ανεβαίνει το κατώφλι, ενώ η κατανομή φορτίου και η αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών μένουν σχεδόν ανεπηρέαστες. Το αποτέλεσμα αναφέρεται ως ανταλλαγή κόστους έναντι ευστάθειας, της οποίας η σκοπιμότητα είναι ρυθμιστική ή χρηστική κρίση και όχι κάτι που μπορεί να κρίνει η ίδια η προσομοίωση.

Ο ειλικρινής ισχυρισμός είναι τριμερής. Πρώτον, ο μηχανισμός εξομαλύνει από μόνος του τη συνολική μεταβλητότητα του φορτίου του τροφοδότη. Δεύτερον, ο επιμερισμός της ίδιας χρέωσης σε ανταγωνιζόμενους παρόχους μειώνει την προσαύξηση, και μαζί τον όγκο αναβεβλημένης ενέργειας, που αντιμετωπίζουν οι πελάτες κάθε παρόχου, και αυτό είναι που περικόπτει την ταυτόχρονη αιχμή, με μικρότερη επιβάρυνση κόστους από ό,τι ένα μονοπώλιο χωρίς δοσομέτρηση, μέσα από το ίδιο αποδοτέο κανάλι τιμής. Τρίτον, η δόση αυτή παραδίδεται από τον ανταγωνισμό δομικά, μέσω ενός κανόνα επιμερισμού του οποίου τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα, και όχι επειδή ο ανταγωνισμός συντονίζει την αναβολή με τρόπο που δεν θα μπορούσε να αναπαραγάγει ένας συντελεστής. Ένα ειδικό σκέλος ελέγχου 360 εκτελέσεων δείχνει ότι ένας μονοπωλητής δοσομετρημένος στην ισχύ σήματος ανά πάροχο που παραδίδει μια αγορά τριών παρόχων αναπαράγει το αποτέλεσμα της αγοράς αυτής στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο εντός της ζώνης θορύβου των σπόρων τυχαιότητας, με συγκρίσιμο πραγματοποιημένο όγκο αναβεβλημένης ενέργειας. Ο συντελεστής δοσομέτρησης είναι τεχνητό εργαλείο ανάλυσης χωρίς αγοραία ερμηνεία, και μια μη σημαντική διαφορά κατά ζεύγη σε 30 σπόρους τυχαιότητας δεν συνιστά ισοδυναμία: το διάστημα εμπιστοσύνης, όχι η σημειακή εκτίμηση, δίνεται στο Κεφάλαιο 7 και σχολιάζεται στο Κεφάλαιο 8. Ο ανταγωνισμός είναι επομένως ικανός για το κέρδος, όπως δείχνει η σχεδίαση που ενσωματώνεται στο μοντέλο, αλλά όχι αναγκαίος για αυτό.

Οι δύο πρώτες υπομετρικές της μετρικής 3 δεν είναι εξίσου σταθερές. Μια ειδική παραγοντική σάρωση 2880 γραμμών (1510 εκτελέσεις του μοντέλου) πάνω στους τρεις δομικούς συντελεστές του κανόνα απόκρισης, στο ίδιο κύριο σημείο λειτουργίας, σε κατώφλι $k = 1.0$ με τρεις παρόχους, τις διαχωρίζει. Ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται σε 44 από τα 48 κελιά συντελεστών και σε κάθε οριακό επίπεδο και των τριών συντελεστών, με τις τέσσερις εξαιρέσεις του συγκεντρωμένες στο υψηλότερο επίπεδο του μεριδίου αναβαλλόμενης ζήτησης που δοκιμάστηκε και με μέγιστη επιδείνωση +2.9 τοις εκατό: ανθεκτικός στον οριακό μέσο όρο, αλλά εύθραυστος ως προς τις αλληλεπιδράσεις, όχι καθολικά βελτιωτικός σε κάθε κελί. Ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο είναι πραγματικά εύθραυστος εκεί: επιδεινώνεται σε 9 από τα 48 κελιά, με χειρότερο μεμονωμένο κελί +27.01 τοις εκατό.

1.7 Διάρθρωση της εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 τοποθετεί τις σχεδιαστικές επιλογές της εργασίας απέναντι στη σχετική βιβλιογραφία πρακτορο-κεντρικών μικροδικτύων και απόκρισης ζήτησης και περιγράφει, με τη διατύπωση που χρησιμοποιούν οι πηγές, το κενό που ο μηχανισμός έρχεται να καλύψει. Το Κεφάλαιο 3 απαριθμεί τα εργαλεία και τις τεχνολογίες, από τη γλώσσα και το πλαίσιο πρακτόρων μέχρι τις πηγές δεδομένων, τον μηχανισμό αρχείων παραμετροποίησης και τα εργαλεία πειραμάτων. Το Κεφάλαιο 4 δίνει την

αρχιτεκτονική του συστήματος και το μοντέλο προσομοίωσης: τα αρχέτυπα παρόχων, τον πληθυσμό καταναλωτών και παραγωγοκαταναλωτών, τα δεδομένα εισόδου και τους ακριβείς ορισμούς των τεσσάρων μετρικών. Το Κεφάλαιο 5 δίνει τον μηχανισμό χωρητικότητας στο σύνολό του, με τους τύπους επιμερισμού και προσαύξησης, τον κανόνα αναβολής ζήτησης και τις τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις. Το Κεφάλαιο 6 περιγράφει την πειραματική σχεδίαση, δηλαδή τις έξι σαρώσεις, τη στατιστική μεθοδολογία κατά ζεύγη και τη σουίτα ελέγχων ως τεκμήριο επικύρωσης. Το Κεφάλαιο 7 αναφέρει τα αποτελέσματα όπως μετρήθηκαν, με το πρόσημο και το μέγεθος κάθε επίδρασης, μαζί με τα σκέλη ελέγχου. Το Κεφάλαιο 8 συζητά τι στηρίζουν τα αποτελέσματα και, με ίση έκταση, τι δεν στηρίζουν, μαζί με τους περιορισμούς. Το Κεφάλαιο 9 συμπεραίνει και απαριθμεί συγκεκριμένες κατευθύνσεις μελλοντικής εργασίας. Ακολουθούν τέσσερα παραρτήματα: η εξωτερική επικύρωση του προσομοιωμένου τροφοδότη, η συνοπτική αναφορά επαλήθευσης, οι πίνακες παραμετροποίησης με αποσπάσματα κώδικα, και ο οδηγός εκτέλεσης του λογισμικού.

1.8 Επίλογος

Το κεφάλαιο τοποθέτησε την εργασία σε μια λιανική αγορά ενέργειας που αναδιοργανώνεται σε τοπικές μονάδες και μελετάται εδώ στην κλίμακα ενός μικροδικτύου, με πράκτορες σταθερών κανόνων, χωρίς ενισχυτική μάθηση και χωρίς φυσική δικτύου. Διατύπωσε το πρόβλημα ως δομική αναλλοιωσιμότητα του τροφοδότη, με τις δύο αιτίες της, την απουσία μηχανισμού χωρητικότητας και την ανελαστική ως προς την τιμή ζήτηση. Έθεσε το ερευνητικό ερώτημα ως ένα ενιαίο υπό όρους ερώτημα απόδοσης και εύρους, κατέγραψε τους στόχους, τους σκοπούς και τα παραδοτέα, και συνόψισε την τριμερή συνεισφορά. Η απάντηση στο ερώτημα, με τα νούμερα και τα όριά της, δίνεται στο Κεφάλαιο 7 και ερμηνεύεται στο Κεφάλαιο 8.

Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό τοποθετεί τις σχεδιαστικές επιλογές της παρούσας εργασίας απέναντι στη βιβλιογραφία της πρακτορο-κεντρικής μοντελοποίησης μικροδικτύων και απόκρισης ζήτησης, ξεκινώντας από τη γενική μεθοδολογία των πρακτορο-κεντρικών μοντέλων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και καταλήγοντας στο ειδικό πεδίο των λιανικών αγορών μικροδικτύου, της επιλογής παρόχου, της διαχείρισης αποθήκευσης και των χρεώσεων αιχμής ή χωρητικότητας. Ο χαρακτηρισμός της κοινής πρακτικής που ακολουθεί είναι σκόπιμα γενικός και περιχαρακωμένος: περιγράφει ό,τι παρατηρήθηκε σε ένα σώμα εργασιών περίπου από το 2015 έως το 2025, δεν αποτελεί ισχυρισμό εξαντλητικής ανάγνωσης του πεδίου και δεν αποδίδει επινοημένες παραπομπές, συγγραφείς ή έτη σε γενικούς ισχυρισμούς. Πρόκειται δηλαδή για παρατήρηση επισκόπησης και όχι για συστηματική ανασκόπηση. Για τον λόγο αυτόν κάθε διατύπωση για το τι επικρατεί ή τι δεν εντοπίστηκε συνοδεύεται ρητά από την επιφύλαξη «στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε». Οι εργασίες που κατονομάζονται είναι εκείνες που μελετήθηκαν άμεσα και επαληθεύτηκαν στο ίδιο τους το κείμενο, με εξαίρεση δύο αναφορές που δηλώνονται ρητά ως αναφερόμενες εκ δευτέρου στο Παράρτημα Α, ώστε οι συγκεκριμένοι και ελέγξιμοι ισχυρισμοί της εργασίας να μπορούν να ανιχνευθούν στην πηγή τους. Το κεφάλαιο κλείνει με την περιγραφή του κενού που ο μηχανισμός της εργασίας κατασκευάστηκε για να καλύψει.

2.2 Πρακτορο-κεντρική μοντελοποίηση αγορών ηλεκτρικής ενέργειας

Σε ένα πρακτορο-κεντρικό μοντέλο κάθε οντότητα της αγοράς αναπαρίσταται ως αυτόνομος πράκτορας με δική του τοπική κατάσταση και δικό του σύνολο κανόνων. Ο πράκτορας δεν βλέπει τη συνολική κατάσταση του συστήματος και δεν λύνει κεντρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης: αντιλαμβάνεται μόνο ό,τι τον αφορά, το δικό του φορτίο, την τιμή του παρόχου του, τη δική του παραγωγή, και αποφασίζει με βάση αυτά. Το συνολικό αποτέλεσμα, δηλαδή το κόστος, η κατανομή του φορτίου στους παρόχους και το σχήμα του φορτίου του τροφοδότη, αναδύεται από πολλές μεμονωμένα απλές αποφάσεις αντί να προκύπτει από μία βελτιστοποιημένη κεντρική κατανομή. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα κάνει τη μέθοδο κατάλληλη για μια λιανική αγορά ενέργειας, όπου το ενδιαφέρον βρίσκεται στο πώς συντίθενται οι ετερογενείς αποφάσεις των νοικοκυριών και όχι στο ποια θα ήταν η άριστη λύση ενός κεντρικού σχεδιαστή.

Η πρακτορο-κεντρική προσομοίωση είναι καθιερωμένο εργαλείο για τη μελέτη λιανικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και μικροδικτύων: πληθυσμοί οικιακών πρακτόρων ή παραγωγοκαταναλωτών αλληλεπιδρούν με έναν ή περισσότερους παρόχους, με συγκεντρωτές (aggregators) ή με έναν κοινό τροφοδότη, και το μοντέλο αξιολογείται ως προς το κόστος, την ευημερία, την κατανομή φορτίου ή, λιγότερο συχνά, ως προς κάποιο μέγεθος ευστάθειας σε επίπεδο δικτύου. Δύο χαρακτηριστικά επανέρχονται στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε. Πρώτον, οι πράκτορες είναι συχνά βελτιστοποιούντες ή μαθαίνοντες: μοντέλα διακριτής επιλογής, τυπικά πολυωνυμικού ή φωλιασμένου λογιστικού τύπου, για την επιλογή παρόχου και, ολοένα συχνότερα, ενισχυτική μάθηση τόσο για τις αποφάσεις των καταναλωτών όσο και για εκείνες των παρόχων, κυρίως σε πλατφόρμες που κατασκευάστηκαν ειδικά για αυτόν τον σκοπό. Δεύτερον, όταν υπάρχει σήμα αιχμής ή χωρητικότητας, αυτό μελετάται συνήθως είτε σε κλίμακα ανταγωνιστικής πλατφόρμας με πράκτορες μάθησης είτε σε κλίμακα χαμηλής τάσης (XT) με έναν μόνο συγκεντρωτή που διαχειρίζεται ολόκληρο το σχήμα ενός τιμολογίου, και όχι με

λίγους μικρούς παρόχους σταθερών κανόνων που ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Το δεύτερο αυτό χαρακτηριστικό αναλύεται στην Ενότητα 2.7.

Το πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τρεις πάροχοι σταθερών κανόνων και, στην κύρια σάρωση, από δύο έως πέντε, σε οικιακή κλίμακα χαμηλής τάσης, τοποθετείται σκόπιμα απέναντι και στις δύο αυτές προεπιλογές. Η αντιπαραβολή χρειάζεται ακρίβεια και όχι ευκολία. Η πλατφόρμα PowerTAC [1], η αναφορά για προσομοίωση αγοράς ενέργειας με πράκτορες μάθησης, δεν είναι πλατφόρμα χονδρικής και μόνο: προσομοιώνει απελευθερωμένη λιανική αγορά, στην οποία οι πάροχοι προσφέρουν τιμολογιακά συμβόλαια σε πελάτες και στη συνέχεια τους εξυπηρετούν συναλλασσόμενοι σε αγορά χονδρικής, τρέχοντας μαζί αγορά τιμολογίων, αγορά χονδρικής και αγορά εξισορρόπησης. Η διάκριση που γίνεται εδώ δεν είναι επομένως λιανική έναντι χονδρικής, που θα ήταν λάθος, αλλά πάροχοι μάθησης σε κλίμακα ανταγωνισμού έναντι παρόχων σταθερών κανόνων, μικρού πλήθους, σε έναν μόνο τροφοδότη.

Δύο ακόμη συμβάσεις μοντελοποίησης τοποθετούνται εδώ, επειδή αφορούν τον τρόπο με τον οποίο στήνεται ο πληθυσμός και οι τιμές πριν καν τεθεί ζήτημα μηχανισμού. Η πρώτη είναι η ετερογένεια του πληθυσμού. Πολλά πρακτορο-κεντρικά μοντέλα μικροδικτύων χρησιμοποιούν λίγους πανομοιότυπους αντιπροσωπευτικούς πράκτορες ανά τύπο, ενώ η συνεχής ενδοπροφίλική ετερογένεια, δειγματοληπτημένη από φραγμένες κατανομές, είναι λιγότερο συνήθης ως ρητή σχεδιαστική επιλογή σε αυτή την οικιακή κλίμακα, στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε. Η εργασία αυτή δειγματοληπτει ανά πράκτορα την κλίμακα ζήτησης, την ανοχή τιμής, την ανοχή μεταβλητότητας, το κατώφλι πρασινότητας, την ποινή αλλαγής και, για τους παραγωγοκαταναλωτές, το μέγεθος των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) και τη χωρητικότητα της μπαταρίας, με ντετερμινιστικό σπόρο τυχαιότητας (D4). Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι η ενδοομαδική ετερογένεια είναι αυτό που καθιστά τις μετρικές κατανομής φορτίου και αυτάρκειας πληροφοριακές: πανομοιότυποι πράκτορες συμπύσσουν τη διακύμανση και κάνουν έναν πληθυσμό διακοσίων νοικοκυριών να συμπεριφέρεται σαν τρεις ή τέσσερις μακρο-πράκτορες. Η επιλογή των ίδιων των ορίων παραμένει επιλογή του συγγραφέα και δεν προσαρμόστηκε σε μετρημένα πληθυσμιακά δεδομένα, και αυτό δηλώνεται ρητά αντί να αποσιωπάται.

Η δεύτερη σύμβαση αφορά τη δυναμική των τιμών των παρόχων. Ο θόρυβος τιμής σε αυτά τα μοντέλα είναι, στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, σχεδόν πάντοτε γκαουσιανός ή φραγμένος ομοιόμορφος, ενώ καινοτομίες τιμής λιανικής με βαριές ουρές σπάνια χρησιμοποιούνται, παρότι οι τιμές χονδρικής ηλεκτρικής ενέργειας είναι γνωστές για τις απότομες αιχμές τους. Εδώ ο μεταβλητός πάροχος χαμηλού κόστους έχει ωριαία τιμή που προκύπτει από φθηνή βάση συν διαταραχή με επαναφορά στον μέσο και καινοτομίες από κατανομή Student-t, ώστε να εμφανίζονται περιστασιακά μεγάλες αιχμές (D5). Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι οι πραγματικές τιμές που συνδέονται με την αγορά άμεσης παράδοσης παρουσιάζουν παχιές ουρές, και μια γκαουσιανή διαταραχή θα υποεκτιμούσε ακριβώς τον κίνδυνο ουράς που ο προσανατολισμένος στη σταθερότητα καταναλωτής προσπαθεί να αποφύγει. Η ασυμμετρία, δηλαδή το ότι μόνο ο ένας από τους τρεις παρόχους έχει τέτοιες διαταραχές, προκύπτει από τους ορισμούς των ίδιων των αρχετύπων: η ρυθμιζόμενη επιχείρηση κοινής ωφέλειας ορίζεται ως σταθερή με εποχική διακύμανση και ο πράσινος υψηλής χρέωσης ως σταθερή προσαύξηση πάνω από τη ρυθμιζόμενη βασική τιμή.

2.3 Το πλαίσιο του agentic AI και οι πράκτορες σταθερών κανόνων

Το πρόσφατο ενδιαφέρον για το λεγόμενο agentic AI επεκτείνει την ιδέα του πρακτορο-κεντρικού μοντέλου: αυτόνομες οντότητες λογισμικού που παρατηρούν, αποφασίζουν και δρουν με βάση τοπική πληροφορία υπό μια σταθερή πολιτική απόφασης, αντί για έναν χειροκίνητα ρυθμισμένο κεντρικό

ελεγκτή. Η παρούσα εργασία υιοθετεί αυτό το πλαίσιο, χωρίς όμως πράκτορες μάθησης. Ο όρος «agentic» εδώ σημαίνει ότι κάθε πάροχος και κάθε καταναλωτής ή παραγωγοκαταναλωτής αντιλαμβάνεται ανεξάρτητα την τοπική του κατάσταση και δρα πάνω σε αυτήν σε κάθε ωριαίο βήμα, υπό τον δικό του σταθερό κανόνα απόφασης, και όχι ότι κάποιος πράκτορας μαθαίνει μια πολιτική. Η εργασία δεν διεκδικεί συνεισφορά στη βιβλιογραφία του agentic AI: δανείζεται μόνο τη διατύπωση του πλαισίου.

Ο αποκλεισμός της ενισχυτικής μάθησης ήταν ρητή απόφαση εμβέλειας από την αρχή και όχι παράλειψη, και στηρίζεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος αφορά την απόδοση αιτιότητας. Αν οι πράκτορες μάθαιναν, τότε κάθε μετρική που θα μετακινούνταν θα ήταν αδύνατο να αποδοθεί με βεβαιότητα: ένας εξεταστής δεν θα μπορούσε να διακρίνει αν η μετακίνηση οφείλεται στον μηχανισμό που κατασκευάστηκε ή σε ό,τι έτυχε να ανακαλύψει η μαθημένη πολιτική. Αυτό θα κατέλυε τη μεθοδολογία των αποτελεσμάτων που αναφέρονται όπως παρατηρούνται και ποτέ δεν ρυθμίζονται προς έναν στόχο, πάνω στην οποία στηρίζεται όλη η εργασία. Ο δεύτερος λόγος αφορά τη διαμόρφωση της ανταμοιβής, η οποία αποτελεί από μόνη της μια κρυφή μορφή ρύθμισης παραμέτρων και επομένως αποκλείεται ρητά από τον κανόνα μη ρύθμισης που διέπει το έργο. Επιπλέον, οι σταθερές ευρετικές των D1 έως D5 επιτρέπουν κάθε αποτέλεσμα να αποδοθεί σε έναν ονομαστικό, επιθεωρήσιμο κανόνα αντί σε μια αδιαφανή εκπαιδευμένη πολιτική. Η επιλογή αυτή κοστίζει σε ρεαλισμό συμπεριφοράς και το παραδέχεται: οι πράκτορες εδώ δεν προσαρμόζονται στρατηγικά, ούτε ανακαλύπτουν τρόπους να εκμεταλλευτούν τον μηχανισμό, και ό,τι λέγεται στην εργασία ισχύει για πληθυσμό σταθερών κανόνων.

2.4 Πράκτορες σταθερών κανόνων έναντι πρακτόρων μάθησης

Οι κυρίαρχες διατυπώσεις της επιλογής παρόχου στα πρακτορο-κεντρικά μοντέλα αγορών ενέργειας είναι δύο, στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε. Η πρώτη είναι η αντιτριβική διακριτή επιλογή ανά περίοδο, τυπικά πολυωνυμικού ή φωλιασμένου λογιστικού τύπου, πάνω στα χαρακτηριστικά των παρόχων. Η δεύτερη είναι οι πράκτορες μάθησης, οι οποίοι ενημερώνουν μια πολιτική από επαναλαμβανόμενη αλληλεπίδραση, με διατυπώσεις τύπου Q-learning και άλλες συγγενείς μορφές ενισχυτικής μάθησης. Καμία συγκεκριμένη εργασία λογιστικού τύπου δεν κατονομάζεται εδώ, ακριβώς επειδή ο χαρακτηρισμός είναι παρατήρηση επισκόπησης και δεν θα ήταν θεμιτό να στηριχθεί σε παραπομπή που δεν ελέγχθηκε.

Και οι δύο αυτές διατυπώσεις επιτρέπουν στον πράκτορα να επανεξετάζει την επιλογή παρόχου σε κάθε περίοδο. Η ρητή υστέρηση αλλαγής παρόχου σε επίπεδο νοικοκυριού, δηλαδή ο πράκτορας που κρατά τον τρέχοντα πάροχό του έως ότου ένα σήμα ικανοποίησης παραβιάσει την προσωπική του ανοχή για παρατεταμένο διάστημα ωρών, σπάνια αποτελεί το πρωτεύον μοντέλο καταναλωτή σε αυτή τη βιβλιογραφία (D1). Αντίστοιχα, η προτίμηση του καταναλωτή κωδικοποιείται συντριπτικά ως σταθμισμένη αθροιστική χρησιμότητα με ρυθμισμένα βάρη, ενώ οι λεξικογραφικοί κανόνες, αν και καλά τεκμηριωμένοι στην επιστήμη της απόφασης, σπάνια χρησιμοποιούνται ως ο κανόνας απόφασης του καταναλωτή σε πρακτορο-κεντρικά μοντέλα αγορών μικροδικτύου της τελευταίας δεκαετίας (D2). Και οι δύο αυτές παρατηρήσεις είναι φραγμένοι ισχυρισμοί επισκόπησης, όχι εξαντλητικοί.

2.5 Ειδικό πεδίο: λιανικές αγορές μικροδικτύων και επιλογή καταναλωτή

Η εργασία μοντελοποιεί την επιλογή καταναλωτή ως ικανοποιητική επιλογή (satisficing) περιορισμένης ορθολογικότητας με αδράνεια αλλαγής παρόχου (D1). Ο καταναλωτής επανεξετάζει τον πάροχό του μόνο μετά από παρατεταμένη παραβίαση της δικής του ανοχής, και η αλλαγή φέρει μικρή ποινή που εκφράζει μεροληψία υπέρ της υπάρχουσας κατάστασης. Η επιλογή παρόχου είναι επομένως υστερητική

και όχι αντιτριβική. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι εμπειρικός: οι μετρημένοι ρυθμοί αλλαγής παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας στα οικιακά τιμολόγια της Ευρωπαϊκής Ένωσης κινούνται από χαμηλά μονοψήφια έως χαμηλά διψήφια ποσοστά ετησίως, μέγεθος ασύμβατο με ωριαία επαναβελτιστοποίηση χωρίς τριβές και συμβατό με ισχυρή μεροληψία υπέρ της υπάρχουσας κατάστασης. Το εύρος αυτό δίνεται εδώ όπως το δίνουν οι πηγές της εργασίας, δηλαδή ως τάξη μεγέθους χωρίς αριθμητική παραπομπή, ακριβώς επειδή καμία από τις πηγές που ελέγχθηκαν δεν το στηρίζει με συγκεκριμένο αριθμό. Πέρα από τη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς, η μοντελοποίηση της αδράνειας εμποδίζει μια μη ρεαλιστική συνεχή μετακίνηση πελατών να κυριαρχήσει στη μετρική κατανομής φορτίου.

Πάνω σε αυτόν τον κανόνα, καθένα από τα τρία προφίλ συμπεριφοράς, ο ευαίσθητος στην τιμή, ο προσανατολισμένος στη σταθερότητα και ο έχων προτίμηση στο πράσινο, αξιολογεί τους παρόχους με λεξικογραφικό κανόνα προτεραιότητας αντί για μία σταθμισμένη αθροιστική συνάρτηση χρησιμότητας (D2). Ο ευαίσθητος στην τιμή ελαχιστοποιεί το αναμενόμενο κόστος και λύνει τις ισοπαλίες στη σταθερότητα, ο προσανατολισμένος στη σταθερότητα απορρίπτει πρώτα τους παρόχους των οποίων η πρόσφατη μεταβλητότητα τιμής ξεπερνά ένα κατώφλι και μόνο έπειτα ελαχιστοποιεί το κόστος, και ο έχων προτίμηση στο πράσινο απορρίπτει πρώτα τους παρόχους κάτω από ένα κατώφλι πρασινότητας. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι διπλός. Οι ταχείες και λιτές ευρετικές λεξικογραφικού τύπου είναι καλά τεκμηριωμένες στην επιστήμη της απόφασης ως μοντέλο του πώς επιλέγουν οι άνθρωποι υπό περιορισμένη προσοχή, και συγχρόνως αποφεύγουν την αυθαίρετη βαθμονόμηση των βαρών προτίμησης, η οποία δεν θα είχε δεδομένα να προσαρμοστεί πάνω τους και την οποία ο κανόνας μη ρύθμισης αποθαρρύνει. Ο λεξικογραφικός κανόνας δεν παρουσιάζεται εδώ ως νέος αλγόριθμος: είναι απλοποίηση μοντελοποίησης, και το στοιχείο που τη διαφοροποιεί είναι η χρήση της ως πρωτεύοντος κανόνα απόφασης του καταναλωτή σε αυτή την κατηγορία μοντέλων, εκεί όπου η σταθμισμένη χρησιμότητα κυριαρχεί στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε.

2.6 Διαχείριση αποθήκευσης παραγωγοκαταναλωτή

Η βιβλιογραφία της διαχείρισης μπαταριών παραγωγοκαταναλωτή που εξετάστηκε κυριαρχείται από τη βελτιστοποίηση, δηλαδή προβλεπτικό έλεγχο μοντέλου και μεικτά ακέραια γραμμικά προγράμματα που επιλύονται πάνω σε έναν ορίζοντα πρόβλεψης, και, πιο πρόσφατα, από την ενισχυτική μάθηση. Και οι δύο προσεγγίσεις τυπικά προϋποθέτουν κάποιου βαθμού πρόβλεψη ή μια προσαρμοσμένη συνάρτηση αξίας, και επιδιώκουν μια βέλτιστη πολιτική διαχείρισης αντί ενός εύλογου μοντέλου του τι πράγματι κάνει ένας εγκατεστημένος ελεγκτής. Μια σκοπίμως χωρίς πρόβλεψη ευρετική με στατικό απόθεμα σπάνια μελετάται ως αυτοτελής σχεδιαστική επιλογή, στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, ακριβώς επειδή οι περισσότερες εργασίες επιδιώκουν τη βέλτιστη και όχι την εύλογη συμπεριφορά.

Η εργασία δίνει σε κάθε παραγωγοκαταναλωτή έναν καθαρά αντιδραστικό κανόνα (D3): φόρτιση από το πλεόνασμα της φωτοβολταϊκής παραγωγής, εκφόρτιση για την κάλυψη της τοπικής ζήτησης, και παρακράτηση σταθερού κλάσματος της χωρητικότητας ως βραδινό απόθεμα μέχρι μια σταθερή ώρα της ημέρας. Καμία πρόβλεψη τιμής, καμία βελτιστοποίηση και καμία προνοητικότητα δεν χρησιμοποιείται πουθενά σε αυτόν τον κανόνα διαχείρισης. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι οι μαζικά διαθέσιμοι οικιακοί ελεγκτές μπαταρίας εκτελούν απλή λογική ιδιοκατανάλωσης αυτού ακριβώς του είδους και όχι βελτιστοποίηση σε επίπεδο νοικοκυριού με τέλεια πρόβλεψη. Η ευρετική σταθερού αποθέματος είναι επομένως το εγγύτερο ανάλογο της εγκατεστημένης συμπεριφοράς και κρατά το μοντέλο ελεύθερο από μια υπονοούμενη βελτιστοποίηση που θα απέδιδε στους πράκτορες μια ευφυΐα την οποία δεν διαθέτουν. Η επιλογή αυτή δεν ισχυρίζεται καλύτερη επίδοση από τη βελτιστοποίηση: είναι επιλογή ευλογοφάνειας και όχι επιδόσεων.

2.7 Απόκριση ζήτησης και χρεώσεις αιχμής ή χωρητικότητας

Οι χρεώσεις αιχμής και χωρητικότητας εμφανίζονται σε δύο αναγνωρίσιμα πλαίσια στη βιβλιογραφία των πρακτορο-κεντρικών μοντέλων μικροδικτύου που εξετάστηκε. Το πρώτο είναι η προσομοίωση ανταγωνιστικής πλατφόρμας με παρόχους μάθησης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το PowerTAC [1], όπου μια παράμετρος χρέωσης αιχμής είναι ένας από τους πολλούς μηχανισμούς που οι πάροχοι μαθαίνουν να διαχειρίζονται. Όπως σημειώθηκε στην Ενότητα 2.2, η αντιπαραβολή εδώ αφορά παρόχους μάθησης σε κλίμακα ανταγωνισμού έναντι του πλαισίου σταθερών κανόνων, μικρού πλήθους και ενός τροφοδότη που χρησιμοποιεί η παρούσα εργασία, καθώς και την παρουσία ή απουσία αφαιρετικής διαμόρφωσης δύο καναλιών που διαχωρίζει τη λογιστική επίδραση από το σήμα τιμής. Το δεύτερο πλαίσιο είναι η μοντελοποίηση απόκρισης ζήτησης σε χαμηλή τάση με έναν μόνο συγκεντρωτή, ο οποίος κατέχει έναν μοχλό διαμόρφωσης ολόκληρου του σχήματος του τιμολογίου για έναν ολόκληρο πληθυσμό, αντί για πολλούς ανεξάρτητα ανταγωνιζόμενους παρόχους λιανικής, καθέναν από τους οποίους βαρύνει ο δικός του επιμερισμός μιας κοινής χρέωσης.

Ο μηχανισμός χωρητικότητας της εργασίας είναι μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη, δηλαδή τιμολογιακό σήμα και όχι φυσική του δικτύου: δεν μοντελοποιείται ροή ισχύος, τάση ή όριο γραμμής. Η συνολική χρέωση επιμερίζεται στους παρόχους ανάλογα με τη συνεισφορά των δικών τους πελατών στο φορτίο του τροφοδότη εκείνου του βήματος, και τροφοδοτείται πίσω στο μοντέλο μέσω δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμων καναλιών: ενός λογιστικού καναλιού που χρεώνει το καθολικό του παρόχου, και ενός καναλιού τιμολόγησης που προσθέτει προσαύξηση στην επόμενη προσφερόμενη τιμή του (D6). Ο ανεξάρτητος λόγος του διαχωρισμού είναι μεθοδολογικός: ο χωρισμός του λογιστικού καναλιού από το κανάλι τιμολόγησης επιτρέπει στην ανάλυση να αποδώσει ποιο κανάλι πράγματι οδηγεί κάθε παρατηρούμενο αποτέλεσμα, αντί να τα δέσει μαζί και να αναφέρει έναν συγκεχυμένο αριθμό για έναν συνολικό μηχανισμό.

Το φυσικό κανάλι μέσω του οποίου το σήμα τιμής φτάνει στη μετρική ευστάθειας είναι η τιμοευαίσθητη αναβολή ζήτησης (D7): όταν ο πάροχός του βαρύνεται με προσαύξηση, κάθε πράκτορας αναβάλλει ένα κλάσμα της ωριαίας ζήτησής του σε μια δεξαμενή αναβλημένης ενέργειας και το αποπληρώνει αργότερα, με φραγμένο ρυθμό, σε ώρα χωρίς προσαύξηση. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι η τιμοευαίσθητη απόκριση ζήτησης είναι το καθιερωμένο κανάλι, χωρίς ενισχυτική μάθηση και χωρίς φυσική δικτύου, μέσω του οποίου μια τιμή σπανιότητας θεωρείται ότι βελτιώνει την ευστάθεια του τροφοδότη σε πραγματικά συστήματα χαμηλής τάσης, και ότι, σε αντίθεση με τη φραγμένη αποθήκευση, εφαρμόζεται σε ολόκληρο τον πληθυσμό. Η χρήση της ως φυσικού καναλιού είναι επομένως πιστή στην πρακτική και όχι επινοημένη ad hoc. Στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, η προσθήκη ρητής τιμοευαίσθητης ενδοημερήσιας μετατόπισης φορτίου σε προσαύξηση σπανιότητας κοινού τροφοδότη, σε οικιακή κλίμακα χαμηλής τάσης με ανταγωνιζόμενους παρόχους σταθερών κανόνων και αφαιρετική διαμόρφωση δύο καναλιών, δεν εντοπίστηκε: τα μοντέλα απόκρισης ζήτησης χρησιμοποιούν τυπικά έναν συγκεντρωτή και δεν διαχωρίζουν το λογιστικό κανάλι από το κανάλι τιμής. Ο πλήρης μηχανισμός περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.

2.8 Η στάθμη της τεχνολογίας και το κενό

Το κενό που η εργασία στοχεύει διατυπώνεται με την ακριβή περιχαράκωση των πηγών της. Εντός της βιβλιογραφίας των πρακτορο-κεντρικών μοντέλων μικροδικτύου περίπου από το 2015 έως το 2025 που εξετάστηκε, δεν εντοπίστηκε διάταξη μικρού πλήθους ανταγωνιζόμενων παρόχων σταθερών κανόνων, από δύο έως πέντε, σε οικιακή κλίμακα χαμηλής τάσης, στην οποία μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη να διασπάται σε δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμα κανάλια ανάδρασης, ένα λογιστικό κανάλι

καθολικού παρόχου και ένα κανάλι σήματος τιμής. Η διατύπωση είναι «δεν εντοπίστηκε» και όχι «δεν υπάρχει»: πρόκειται για φραγμένο ισχυρισμό επισκόπησης. Ο μηχανισμός χωρητικότητας του Κεφαλαίου 5 κατασκευάστηκε ειδικά για να ταιριάζει σε αυτή την περιγραφή.

Το κενό αυτό επεκτείνεται μεθοδολογικά σε τέσσερα σημεία. Το πρώτο αφορά τη σάρωση της παραμέτρου κατωφλίου. Στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε δεν βρέθηκε να αναφέρεται σάρωση της ευαισθησίας κατωφλίου μιας χρέωσης αιχμής πάνω σε πληθυσμό με ανταγωνιζόμενους παρόχους σταθερών κανόνων και μικρό πλήθος, με την αφαιρετική διαμόρφωση δύο καναλιών να κρατείται σταθερή σε όλη τη σάρωση (D8). Οι σαρώσεις χρέωσης αιχμής σε κλίμακα ανταγωνιστικής πλατφόρμας χρησιμοποιούν παρόχους μάθησης, ενώ οι σαρώσεις απόκρισης ζήτησης σε χαμηλή τάση χρησιμοποιούν έναν συγκεντρωτή και έναν μοχλό σχήματος τιμολογίου αντί για παράμετρο κατωφλίου. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι η παράμετρος κατωφλίου k ελέγχει άμεσα τον ρυθμό ενεργοποίησης, δηλαδή το κλάσμα των ωρών στις οποίες επιβάλλεται η προσαύξηση σπανιότητας, ώστε η σάρωση να χαρακτηρίζει μια περιβάλλουσα λειτουργίας αντί να αναζητά μια ευνοϊκή διαμόρφωση.

Το δεύτερο σημείο αφορά τους δομικούς συντελεστές της ίδιας της συνάρτησης απόκρισης (D9). Η ανάλυση ευαισθησίας στη βιβλιογραφία απόκρισης ζήτησης και μικροδικτύων που εξετάστηκε στοχεύει συντριπτικά σε εξωγενή ή πολιτικά μεγέθη, δηλαδή στο επίπεδο και το σχήμα του τιμολογίου, στη διείσδυση αποθήκευσης ή φωτοβολταϊκών, στο ποσοστό συμμετοχής, στο μέγεθος του σήματος τιμής ή στο μέγεθος του πληθυσμού. Οι δομικοί συντελεστές της συμπεριφορικής απόκρισης, δηλαδή πόσο φορτίο θεωρεί αναβλητό ο πράκτορας, η τιμή αναφοράς ως προς την οποία κλιμακώνει την απόκρισή του και ο ρυθμός με τον οποίο αποπληρώνει την αναβεβλημένη ενέργεια, τυπικά καθλώνονται σε μία βαθμονομημένη τιμή και αναφέρονται ως παραδοχή αντί να σαρώνονται. Πλήρες παραγοντικό σχέδιο πάνω σε αυτούς τους τρεις συντελεστές, κατά ζεύγη ανά σπόρο έναντι της βάσης αναφοράς με τον μηχανισμό απενεργοποιημένο και σε σταθερό σημείο λειτουργίας, δεν βρέθηκε να αναφέρεται. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι ο πιθανός τρόπος αποτυχίας είναι αλληλεπίδραση και όχι κύρια επίδραση, οπότε μια σάρωση μιας μεταβλητής τη φορά γύρω από το σημείο αποστολής θα προσπερνούσε ακριβώς τη γωνία όπου το αποτέλεσμα μπορεί να αντιστραφεί.

Τα δύο τελευταία σημεία γεννιούνται από τον ίδιο συγχυτικό παράγοντα, τον οποίο ο κανόνας επιμερισμού εισάγει εξ ορισμού: τα μερίδια συνεισφοράς αθροίζουν στη μονάδα, οπότε μεγαλύτερο πλήθος παρόχων σημαίνει μικρότερη προσαύξηση ανά πάροχο, άρα μικρότερη αναβολή ανά πράκτορα και μικρότερη συνολική αναβεβλημένη ενέργεια. Το πλήθος παρόχων μετακινεί επομένως ταυτόχρονα δύο πράγματα, τον αριθμό των ανεξάρτητων παρόχων και την ισχύ του σήματος, δηλαδή τη δόση. Το τρίτο σημείο είναι ένα σκέλος ελέγχου εξισωμένης συνολικής ισχύος σήματος, που διαχωρίζει τον χρονισμό της αναβολής από το μέγεθός της: στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε δεν αναφέρεται τέτοιος συγχρονισμένος έλεγχος σε πλαίσιο χρέωσης σπανιότητας με πολλούς παρόχους, καθώς οι μελέτες χρέωσης αιχμής σε κλίμακα πλατφόρμας μεταβάλλουν τη στρατηγική και το τιμολόγιο των παρόχων και όχι τον ίδιο τον κανόνα διανομής της χρέωσης, ενώ οι εργασίες χαμηλής τάσης με έναν συγκεντρωτή δεν μπορούν καν να θέσουν το ερώτημα (D10). Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι ένας αιτιακός ισχυρισμός για μηχανισμό χρονισμού δεν είναι διαψεύσιμος αν ο χρονισμός δεν μεταβληθεί ανεξάρτητα από το μέγεθος.

Το τέταρτο σημείο είναι ένα σκέλος ελέγχου μονοπωλίου εξισωμένης δόσης, δηλαδή ένας μοναδικός πάροχος που λαμβάνει το ανά πάροχο σήμα το οποίο θα παρέδιδε μια αγορά M παρόχων (D11). Στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, οι συγκρίσεις μονοπωλίου και ανταγωνισμού σε πρακτορο-κεντρικά μοντέλα λιανικής ενέργειας μεταβάλλουν τον αριθμό των παρόχων και αφήνουν την ανά πάροχο ισχύ σήματος να προκύψει από όποιον κανόνα επιμερισμού χρησιμοποιεί το μοντέλο, ενώ έλεγχος

μονοπωλίου εξισωμένης δόσης δεν αναφέρεται. Σε εργασίες τύπου PowerTAC [1] ένας τέτοιος έλεγχος δεν είναι καν κατασκευάσιμος, επειδή το σήμα είναι αποτέλεσμα ισορροπίας και όχι κανόνας επιμερισμού, ενώ στις εργασίες χαμηλής τάσης με έναν συγκεντρωτή η σύγκριση δεν μπορεί να προκύψει. Ο ανεξάρτητος λόγος είναι ότι ο ισχυρισμός πως ο ανταγωνισμός είναι αναγκαίος για ένα αποτέλεσμα είναι ισχυρισμός ότι το αποτέλεσμα δεν μπορεί να παραχθεί χωρίς αυτόν, και ελέγχεται μόνο αν επιχειρηθεί να παραχθεί χωρίς αυτόν. Χωρίς τέτοιο σκέλος, το «το μονοπώλιο απέτυχε» και το «το μονοπώλιο έλαβε υπερβολική δόση» είναι η ίδια παρατήρηση. Όπως και οι προηγούμενοι, και οι τέσσερις αυτοί ισχυρισμοί είναι φραγμένοι ισχυρισμοί επισκόπησης. Ο σχεδιασμός των αντίστοιχων σκελών περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.

2.9 Επίλογος

Το κεφάλαιο τοποθέτησε τις σχεδιαστικές επιλογές της εργασίας απέναντι σε ό,τι παρατηρήθηκε ως κοινή πρακτική στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε: επιλογή παρόχου με ικανοποιητική επιλογή και αδράνεια αντί για αντιτριβική διακριτή επιλογή ή πράκτορες μάθησης, λεξικογραφικοί κανόνες προφίλ αντί για σταθμισμένη αθροιστική χρησιμότητα, αντιδραστική διαχείριση αποθήκευσης χωρίς πρόβλεψη αντί για βελτιστοποίηση με ορίζοντα, ετερογένεια δειγματοληπτημένη ανά πράκτορα αντί για λίγους αντιπροσωπευτικούς πράκτορες και καινοτομίες τιμής με βαριές ουρές για τον έναν από τους τρεις παρόχους. Παρουσιάστηκαν επίσης τα δύο πλαίσια στα οποία εμφανίζονται οι χρεώσεις αιχμής και χωρητικότητας, η ανταγωνιστική πλατφόρμα με παρόχους μάθησης και η απόκριση ζήτησης χαμηλής τάσης με έναν συγκεντρωτή, καθώς και ο λόγος για τον οποίο η τιμοευαίσθητη απόκριση ζήτησης είναι το κατάλληλο φυσικό κανάλι εντός του πλαισίου της εργασίας. Το κενό που περιγράφηκε, μαζί με τις τέσσερις μεθοδολογικές του επεκτάσεις, είναι αυτό που ο μηχανισμός των Κεφαλαίων 5 και 6 κατασκευάστηκε για να καλύψει.

Κεφάλαιο 3ο: Εργαλεία και τεχνολογίες

3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό καταγράφει το σύνολο των εργαλείων με τα οποία κατασκευάστηκε, εκτελέστηκε και ελέγχθηκε η προσομοίωση, με τη σειρά με την οποία τα συναντά κανείς όταν στήνει το έργο από την αρχή: η γλώσσα και το περιβάλλον εκτέλεσης, το πρακτορο-κεντρικό πλαίσιο και ο συγκεκριμένος τρόπος χρήσης του, η επιστημονική στοίβα βιβλιοθηκών, η υποδομή ελέγχου, οι πηγές δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως εργαλεία, ο μηχανισμός των αρχείων παραμετροποίησης, τα εργαλεία εκτέλεσης και ανάλυσης των σαρώσεων και, τέλος, η διαδικασία ανάπτυξης. Κάθε πρόταση εδώ αντιστοιχεί σε κάτι που υπάρχει στο αποθετήριο και μπορεί να επαληθευτεί σε αυτό. Το λογισμικό αναφέρεται με όνομα και έκδοση· βιβλιογραφική αναφορά συνοδεύει μόνο το πλαίσιο προσομοίωσης, τις δύο βιβλιοθήκες της αριθμητικής και στατιστικής υποδομής και τις κανονικές πηγές των στατιστικών μεθόδων που υλοποιούνται στο ίδιο το έργο.

3.2 Γλώσσα και περιβάλλον εκτέλεσης

Ο κώδικας είναι γραμμένος σε Python και το αρχείο μεταδεδομένων του έργου απαιτεί Python 3.12 ή νεότερη. Το έργο είναι κανονικό πακέτο Python με δικό του όνομα και έκδοση 0.1.0. Στο ίδιο αρχείο ορίζονται και οι δύο ρυθμίσεις της σουίτας ελέγχων, δηλαδή η διαδρομή του πηγαίου κώδικα, που επιτρέπει στους ελέγχους να τρέχουν χωρίς εγκατάσταση του πακέτου, και ο προεπιλεγμένος κατάλογος των ελέγχων.

Η εγκατάσταση, όπως την περιγράφει ο οδηγός του αποθετηρίου, είναι ένα εικονικό περιβάλλον και μία εγκατάσταση των καθηλωμένων εξαρτήσεων. Κάθε έκδοση στο αρχείο εξαρτήσεων είναι καθηλωμένη σε αυτήν με την οποία παρήχθησαν τα αποτελέσματα, ώστε μια επανεκτέλεση να μη μετακινεί αριθμούς λόγω αναβάθμισης βιβλιοθήκης. Μία από τις εξαρτήσεις χρειάζεται ρητή εξήγηση: το αρχείο εξαρτήσεων περιλαμβάνει τη `networkx 3.6.1` παρότι ο κώδικας του έργου δεν την εισάγει πουθενά. Ο λόγος είναι ότι τα μεταδεδομένα της ίδιας της Mesa παραλείπουν αυτή την εξάρτηση, ενώ η εισαγωγή της Mesa την απαιτεί, οπότε μια καθαρή εγκατάσταση χωρίς αυτήν αποτυγχάνει. Η καθήλωση δεν είναι διακοσμητική: οι αριθμοί που αναφέρει η εργασία είναι δεσμευμένοι σε αρχεία χρυσού προτύπου, και μια σιωπηλή αναβάθμιση αριθμητικής βιβλιοθήκης θα μπορούσε να τους μετακινήσει χωρίς καμία αλλαγή στον κώδικα του μοντέλου.

3.3 Το πλαίσιο Mesa 3.5.1 και ο τρόπος χρήσης του

Το πρακτορο-κεντρικό πλαίσιο είναι η Mesa 3.5.1, πλαίσιο πρακτορο-κεντρικής μοντελοποίησης σε Python [2]. Το μοντέλο του μικροδικτύου κληρονομεί από την κλάση μοντέλου της Mesa και της παραδίδει τον σπόρο τυχαιότητας κατά την κατασκευή, οπότε η ίδια η γεννήτρια τυχαιών αριθμών του μοντέλου είναι η γεννήτρια της Mesa, αρχικοποιημένη από τον σπόρο τυχαιότητας του σεναρίου. Ο καταναλωτής κληρονομεί από την κλάση πράκτορα της Mesa, ενώ ο παραγωγοκαταναλωτής κληρονομεί από τον καταναλωτή. Οι πράκτορες εγγράφονται έτσι αυτόματα στο μοντέλο κατά την κατασκευή τους, χωρίς ξεχωριστό βήμα προσθήκης.

Πουθενά στον κώδικα δεν χρησιμοποιείται κλάση χρονοπρογραμματιστή. Η Mesa 3.x κατήργησε το API των χρονοπρογραμματιστών της σειράς 2.x, και η ενεργοποίηση των πρακτόρων γίνεται με μία κλήση μέσα στο βήμα του μοντέλου: το σύνολο πρακτόρων της Mesa ανακατεύεται με τη γεννήτρια του ίδιου του μοντέλου και καλείται το βήμα σε κάθε πράκτορα. Η μετρική 4, η αυτάρκεια

παραγωγοκαταναλωτών, διαβάζει τους παραγωγοκαταναλωτές μέσω της όψης του συνόλου πρακτόρων που η Mesa 3.x δεικτοδοτεί ανά κλάση.

Οι πάροχοι δεν είναι, σκόπιμα, πράκτορες της Mesa: είναι απλά αντικείμενα Python που κρατούνται σε λεξικό πάνω στο μοντέλο. Έτσι το σύνολο πρακτόρων του μοντέλου περιέχει ακριβώς τους 200 πράκτορες του πληθυσμού και τίποτε άλλο, και κάθε άθροισμα πάνω σε αυτό είναι εξ ορισμού άθροισμα πληθυσμού. Ούτε χρησιμοποιείται ο συλλέκτης δεδομένων του πλαισίου: η χρονοσειρά της καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη τηρείται από το ίδιο το μοντέλο σε δική του λίστα, όπου προστίθεται μία τιμή ανά ώρα και από την οποία υπολογίζεται στη συνέχεια η μετρική 3.

Μία τελευταία λεπτομέρεια του πλαισίου καταγράφεται στο αρχείο μεταδεδομένων του έργου: εκεί σιγάται μια προειδοποίηση μελλοντικής αλλαγής της Mesa που αφορά τον τρόπο παράδοσης του σπόρου. Ο τρόπος αυτός είναι το τεκμηριωμένο API που στοχεύει η εργασία και, σύμφωνα με το ίδιο το μήνυμα της Mesa, είναι λειτουργικά ταυτόσημος με τον νεότερο.

Η ίδια η γεννήτρια του μοντέλου χρησιμοποιείται και για ό,τι χτίζεται γύρω από αυτό. Οι πάροχοι κατασκευάζονται από το λεξικό κατασκευαστών, με κλειδί τον τύπο που δηλώνει το αρχείο παραμετροποίησης, και ο μεταβλητός χαμηλού κόστους πάροχος παίρνει δική του γεννήτρια NumPy, αρχικοποιημένη με ακέραιο που αντλείται από τη γεννήτρια του μοντέλου. Έτσι η διαδικασία των διαταραχών του είναι αναπαραγώγιμη από τον σπόρο τυχαιότητας του μοντέλου, χωρίς να αντλείται τυχαιότητα από κάποια καθολική, μη αρχικοποιημένη πηγή.

3.4 Επιστημονική στοίβα

Η αριθμητική και στατιστική υποδομή είναι καθηλωμένη στο αρχείο εξαρτήσεων και συνοψίζεται στο Πίνακα 3.1. Η NumPy [3] χρησιμοποιείται για κάθε πράξη πάνω σε χρονοσειρές, για τη ροή διαταραχών του μεταβλητού χαμηλού κόστους παρόχου μέσω της δικής της γεννήτριας τυχαίων αριθμών, και για την αναδειγματοληψία του bootstrap. Η pandas κρατά τις γραμμές των σαρώσεων, τα CSV των σημείων ελέγχου και τα συγκεντρωτικά CSV. Η SciPy [4] παρέχει τους κατά ζεύγη ελέγχους t και τις συσχετίσεις Spearman των σεναρίων ανάλυσης. Η pyarrow γράφει τα έξι αρχεία αποτελεσμάτων parquet των σαρώσεων. Η Matplotlib παράγει τα δέκα σχήματα αποτελεσμάτων του αποθετηρίου. Η PyYAML υλοποιεί την ανάγνωση των αρχείων παραμετροποίησης, η requests τις δύο ανακτήσεις δεδομένων από το διαδίκτυο, και η psutil τη μετρημένη αιχμή μνήμης που καταγράφει κάθε γραμμή σάρωσης. Η statsmodels είναι προαιρετική: τη χρησιμοποιούν μόνο ένας διασταυρωτικός έλεγχος και ένα διαγνωστικό, και η απουσία της παράγει παραλειπόμενους ελέγχους, ποτέ αποτυχία συλλογής. Η επιλογή του parquet ως μορφής εξόδου των σαρώσεων εξυπηρετεί το μέγεθος και τη σταθερότητα των τύπων: οι σαρώσεις παράγουν συνολικά χιλιάδες γραμμές με σταθερό σχήμα στηλών, τις οποίες τα σενάρια ανάλυσης ξαναδιαβάζουν αυτούσιες κάθε φορά που αναπαράγονται οι πίνακες και τα σχήματα. Η αιχμή μνήμης της psutil καταγράφεται ανά εκτέλεση για τον ίδιο λόγο για τον οποίο καταγράφεται και ο χρόνος: για να είναι μετρημένο, και όχι εκτιμώμενο, το κόστος μιας πολύωρης σάρωσης.

Οι διορθώσεις πολλαπλών συγκρίσεων Holm-Bonferroni [5] και Benjamini-Hochberg [6], καθώς και το bootstrap [7], δεν προέρχονται από κάποια βιβλιοθήκη: είναι υλοποιημένες απευθείας στο κύριο σενάριο ανάλυσης της σάρωσης, σε τρεις δικές του συναρτήσεις (Παράρτημα Δ).

Πακέτο	Έκδοση	Χρήση
Python	>= 3.12	Γλώσσα και περιβάλλον εκτέλεσης
Mesa	3.5.1	Πρακτορο-κεντρικό πλαίσιο: μοντέλο, πράκτορες, σύνολο πρακτόρων

Πακέτο	Έκδοση	Χρήση
networkx	3.6.1	Δεν εισάγεται από το έργο, απαιτείται από την εισαγωγή της Mesa
NumPy	2.4.3	Πράξεις χρονοσειρών, ροή διαταραχών, bootstrap
pandas	2.3.3	Γραμμές σαρώσεων, σημεία ελέγχου, συγκεντρωτικά CSV
SciPy	1.16.2	Κατά ζεύγη έλεγχοι t, συσχετίσεις Spearman
PyYAML	6.0.3	Ανάγνωση των αρχείων παραμετροποίησης
requests	2.32.5	Ανάκτηση των σειρών PVGIS και OPSD
psutil	7.2.2	Μετρημένη αιχμή μνήμης ανά εκτέλεση
pyarrow	20.0.0	Εγγραφή των αρχείων αποτελεσμάτων parquet
Matplotlib	3.10.7	Τα σχήματα αποτελεσμάτων
pytest	8.4.2	Σουίτα ελέγχων
pytest-xdist	3.8.0	Παράλληλη εκτέλεση των ελέγχων
statsmodels	0.14.5	Προαιρετικό: ένας διασταυρωτικός έλεγχος και ένα διαγνωστικό

Πίνακας 3.1: Οι καθηλωμένες εκδόσεις των εξαρτήσεων και η χρήση τους.

3.5 Έλεγχος: pytest και pytest-xdist

Οι έλεγχοι τρέχουν με pytest 8.4.2 και pytest-xdist 3.8.0. Η τεκμηριωμένη κλήση δίνεται στον οδηγό του αποθετηρίου και στο Παράρτημα Δ. Μετά τη Φάση 21 η σουίτα αποτελείται από 461 επιτυχείς ελέγχους και 3 παραλειπόμενους. Οι τρεις παραλειπόμενοι είναι οι εκτελέσεις των στατιστικών τροφοδότη σε ορίζοντα 8760 ωρών, οι οποίες ελέγχονται από μια μεταβλητή περιβάλλοντος αργών ελέγχων και περνούν κανονικά όταν αυτή τεθεί. Με δεκαέξι πυρήνες και ζεστό ενδιάμεσο κώδικα η πλήρης σουίτα ολοκληρώνεται σε περίπου ένα λεπτό, ενώ σε ένα φρέσκο περιβάλλον η πρώτη εκτέλεση χρειάζεται μερικά λεπτά. Τα δεκαπέντε αρχεία ελέγχων του αποθετηρίου καλύπτουν τους πράκτορες, τους παρόχους, τον μηχανισμό χωρητικότητας, τον φορτωτή παραμετροποίησης, τους φορτωτές δεδομένων, τις μετρικές, τα στατιστικά του τροφοδότη, το μοντέλο, την ολοκλήρωση, το χρυσό πρότυπο, τη συνέχιση σάρωσης, την ανάλυση της δομικής σάρωσης, τους τρόπους κατανομής της προσαύξης, τον διαιρέτη και τις διορθώσεις πολλαπλών συγκρίσεων. Το τι ακριβώς δεσμεύει η σουίτα αναλύεται στο Παράρτημα Β.

3.6 Πηγές δεδομένων ως εργαλεία

Δύο εξωτερικές πηγές δεδομένων λειτουργούν εδώ ως εργαλεία, με την έννοια ότι η ανάκτησή τους είναι μέρος της υποδομής και όχι χειροκίνητο βήμα. Η πρώτη είναι το API ωριαίων σειρών του PVGIS [8], από το οποίο ανακτάται η ωριαία ηλιακή σειρά για γεωγραφικό πλάτος 40.64 και μήκος 22.95, με σταθερή κλίση 30 μοιρών, νότιο προσανατολισμό, σύστημα αναφοράς 1 kWp και απώλειες συστήματος 14 τοις εκατό. Ζητείται το έτος 2020, επειδή το API δέχεται μόνο έτη από 2005 έως 2020. Η απόκριση αποθηκεύεται τοπικά σε αρχείο δείγματος του αποθετηρίου, με δείκτη προέλευσης στην πρώτη γραμμή.

Η δεύτερη είναι το πακέτο δεδομένων οικιακού φορτίου των Open Power System Data [9], έκδοση 2020-04-15, με το ωριαίο ενιαίο αρχείο νοικοκυριών της διανομής τους. Μια συνάρτηση του αρθρώματος φόρτωσης δεδομένων, μαζί με το αντίστοιχο σενάριο ανάκτησης, το κατεβάζει και το αναλύει σταδιακά, μένοντας εντός περίπου 123 MB μνήμης, και αποθηκεύει το αποτέλεσμα σε δικό του αρχείο δείγματος, με δικό του δείκτη προέλευσης. Και οι δύο σειρές φορτώνονται από τον ίδιο φορτωτή προφίλ, ο οποίος δέχεται σημαία που επιτρέπει ή όχι την ανάκτηση από το δίκτυο: όταν το τοπικό αντίγραφο υπάρχει, διαβάζεται αυτό, ώστε μια εκτέλεση χωρίς δίκτυο να παράγει ακριβώς τα ίδια δεδομένα εισόδου με μια εκτέλεση που έχει πρόσβαση στα δύο API. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν σε

κάθε μεταγενέστερη εκτέλεση να διακρίνει μια πραγματική ανάκτηση από μια τοπικά παραγόμενη σειρά. Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται η σειρά OPSD περιγράφεται στην Ενότητα 4.7.

3.7 Ο μηχανισμός αρχείων παραμετροποίησης

Το παραδιδόμενο αρχείο διαμόρφωσης κρατά ολόκληρη τη διαμόρφωση με την οποία εκτελείται η εργασία. Ένα αρχείο σεναρίου δεν την επαναλαμβάνει: δηλώνει ότι το επεκτείνει και υπερισχύει μόνο σε ό,τι αλλάζει. Η επίλυση γίνεται με βαθιά συγχώνευση στον φορτωτή παραμετροποίησης, και το αποτέλεσμα επικυρώνεται πριν φτάσει στο μοντέλο. Έξι επικαλύψεις σεναρίων συνοδεύουν τη διανομή: οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις (βάση αναφοράς, μόνο λογιστικό κανάλι, μόνο κανάλι τιμολόγησης, πλήρης μηχανισμός), το σενάριο μονοπωλίου που αφήνει έναν μόνο ρυθμιζόμενο πάροχο και απενεργοποιεί την αλλαγή παρόχου, και το σενάριο μετρημένης ζήτησης που επιλέγει τη σειρά OPSD. Η βαθιά συγχώνευση έχει μια συγκεκριμένη συνέπεια που διευκολύνει την ερμηνεία των πειραμάτων: μια επικάλυψη αλλάζει μόνο τα κλειδιά που ονομάζει, οπότε οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις διαφέρουν μεταξύ τους, μετά τη συγχώνευση, σε ακριβώς τρεις σημαίες και, πέρα από το όνομα του σεναρίου, σε τίποτε άλλο, ενώ το σενάριο μονοπωλίου αντικαθιστά ολόκληρη τη λίστα των παρόχων με έναν. Το παραδιδόμενο αρχείο διαμόρφωσης αφήνει σκόπιμα αδήλωτο το κλειδί της πηγής ζήτησης, γραμμένο μόνο ως σχόλιο, ώστε η προεπιλεγμένη συμπεριφορά να είναι ακριβώς η συνθετική σειρά, είτε το κλειδί απουσιάζει είτε δηλώνεται ρητά. Οι πλήρεις πίνακες παραμέτρων παρατίθενται (βλ. Παράρτημα Γ).

3.8 Εργαλεία πειραμάτων και ανάλυσης

Τα κύρια πειράματα εκτελούνται από πέντε σενάρια: το σενάριο της βασικής εκτέλεσης, που εκτελεί μία ντετερμινιστική βασική εκτέλεση 8760 ωρών και τυπώνει τις τέσσερις μετρικές, και τους τέσσερις εκτελεστές σαρώσεων (Παράρτημα Δ). Οι τέσσερις σαρώσεις είναι πολύωρες, οπότε ο εκτελεστής τους κατανέμει τα κελιά σε δεξαμενή διεργασιών με προεπιλογή 16 εργάτες και γράφει αυξητικό CSV σημείου ελέγχου καθώς προχωρά. Η εκτέλεση είναι έτσι με δυνατότητα συνέχισης: μια επανεκτέλεση παρακάμπτει κάθε κελί (διαμόρφωση, σπόρος τυχαιότητας) που υπάρχει ήδη στο σημείο ελέγχου, οπότε μια διακοπή σε σάρωση συνεχίζει από εκεί που σταμάτησε αντί να ξεκινά από την αρχή. Το τελικό αποτέλεσμα γράφεται σε αρχείο parquet, με εφεδρική εγγραφή CSV αν αποτύχει ο γραφέας parquet.

Η ανάλυση γίνεται από τέσσερα σενάρια ανάλυσης, τα οποία διαβάζουν τα parquet και παράγουν τα συγκεντρωτικά CSV και τα σχήματα των δεσμευμένων αποτελεσμάτων. Ένα χωριστό εργαλείο ευαισθησίας οικογένειας διαβάζει τα συγκεντρωτικά CSV και γράφει το δικό του δεσμευμένο αρχείο, ενώ το σενάριο σύγκρισης πηγών ζήτησης εκτελεί τη σάρωση των 120 εκτελέσεων του κελιού αναφοράς υπό τη σειρά OPSD και γράφει το δικό του αρχείο αποτελεσμάτων μαζί με το συγκριτικό CSV. Συμπληρωματικά υπάρχουν τρία εργαλεία μέτρησης, για τα στατιστικά του τροφοδότη, τον χρονισμό της προσαύξεσης και τα σχήματα τιμών των παρόχων, και δύο εργαλεία επαλήθευσης, ο έλεγχος μεταλλάξεων και ο αναπαραγωγέας του χρυσού προτύπου. Ο έλεγχος μεταλλάξεων είναι μια οριοθετημένη και ντετερμινιστική υποδομή ελέγχου μεταλλάξεων: παράγει συντακτικές μεταλλάξεις της επιφάνειας που φέρει ισχυρισμούς, τις εφαρμόζει πάντα σε πρόχειρο αντίγραφο του αποθετηρίου εκτός του πραγματικού δέντρου, και συγκρίνει ένα αποτύπωμα sha256 όλων των αρχείων πηγαίου κώδικα και σεναρίων στην αρχή και στο τέλος, ματαιώνοντας την εκτέλεση αν τα δύο δεν ταυτίζονται.

3.9 Διαδικασία: git και ανταγωνιστική επιθεώρηση ανά φάση

Ο έλεγχος εκδόσεων γίνεται με git, με έναν κλάδο ανά φάση εργασίας, και κάθε φάση υλοποίησης συγχωνεύεται μόνο αφού περάσει από ανταγωνιστική επιθεώρηση. Οι σχεδιαστικές αποφάσεις

καταγράφονται στο ημερολόγιο αποφάσεων του αποθετηρίου με σταθερά αναγνωριστικά, ώστε κάθε επιλογή του μοντέλου να έχει μια μοναδική διεύθυνση στην οποία παραπέμπει το κείμενο. Τα αποτελέσματα των σαρώσεων και τα αρχεία του χρυσού προτύπου είναι δεσμευμένα στο αποθετήριο, οπότε μια αναπαραγωγή της ανάλυσης που μετακινεί έναν από τους αριθμούς που φέρουν ισχυρισμούς αποτυγχάνει σε έλεγχο αντί να τον αντικαταστήσει σιωπηλά. Τα δεσμευμένα αρχεία αποτελεσμάτων είναι, με αυτή την έννοια, τα καθηλωμένα αποτελέσματα πάνω στα οποία στηρίζεται η ανάλυση των επόμενων κεφαλαίων.

3.10 Επίλογος

Η αλυσίδα εργαλείων είναι, συνολικά, μια εγκατάσταση Python 3.12 ή νεότερης με καθηλωμένες εκδόσεις, το πλαίσιο Mesa 3.5.1 χωρίς χρονοπρογραμματιστή και χωρίς συλλέκτη δεδομένων του πλαισίου, μια κλασική επιστημονική στοίβα για την αριθμητική και τη στατιστική, δύο ανακτήσεις πραγματικών δεδομένων με τοπική προσωρινή αποθήκευση, ένα σύστημα παραμετροποίησης με επικαλύψεις, σενάρια σάρωσης με δυνατότητα συνέχισης και μια σουίτα ελέγχων που καθηλώνει τους αριθμούς που φέρουν ισχυρισμούς. Η αρχιτεκτονική που χτίζεται πάνω σε αυτά περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 4ο: Αρχιτεκτονική συστήματος και μοντέλο προσομοίωσης

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφω το μοντέλο προσομοίωσης πάνω στο οποίο εκτελείται κάθε πείραμα της εργασίας, σε τρία επίπεδα: το ίδιο το μοντέλο με τον ωριαίο βρόχο βήματός του, τον πληθυσμό των πρακτόρων με τους σταθερούς κανόνες απόφασης που τους διέπουν, και τις τέσσερις μετρικές που ανάγουν την κατάσταση μιας εκτέλεσης σε αριθμούς. Ξεκινώ από όσα το μοντέλο δεν κάνει, επειδή αυτά ορίζουν την εμβέλεια κάθε ισχυρισμού που ακολουθεί. Δεν υπάρχει πουθενά στην προσομοίωση ροή ισχύος, περιορισμός τάσης ή όριο ικανότητας γραμμής, και κανένας πράκτορας δεν μαθαίνει πολιτική από ανταμοιβή. Κάθε τιμή και κάθε απόφαση διαχείρισης είναι σταθερός κανόνας τον οποίο αποτιμά ο πράκτορας που τον κατέχει, και καμία μέθοδος ενισχυτικής μάθησης δεν χρησιμοποιείται σε κανένα σημείο του κώδικα. Ο μηχανισμός χωρητικότητας, που αποτελεί την κεντρική συνεισφορά της εργασίας, κάθετα πάνω σε αυτό ακριβώς το μοντέλο και περιγράφεται χωριστά στο Κεφάλαιο 5. Εδώ εμφανίζεται μόνο ως τα τρία βήματα του βρόχου που δεσμεύει.

4.2 Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής

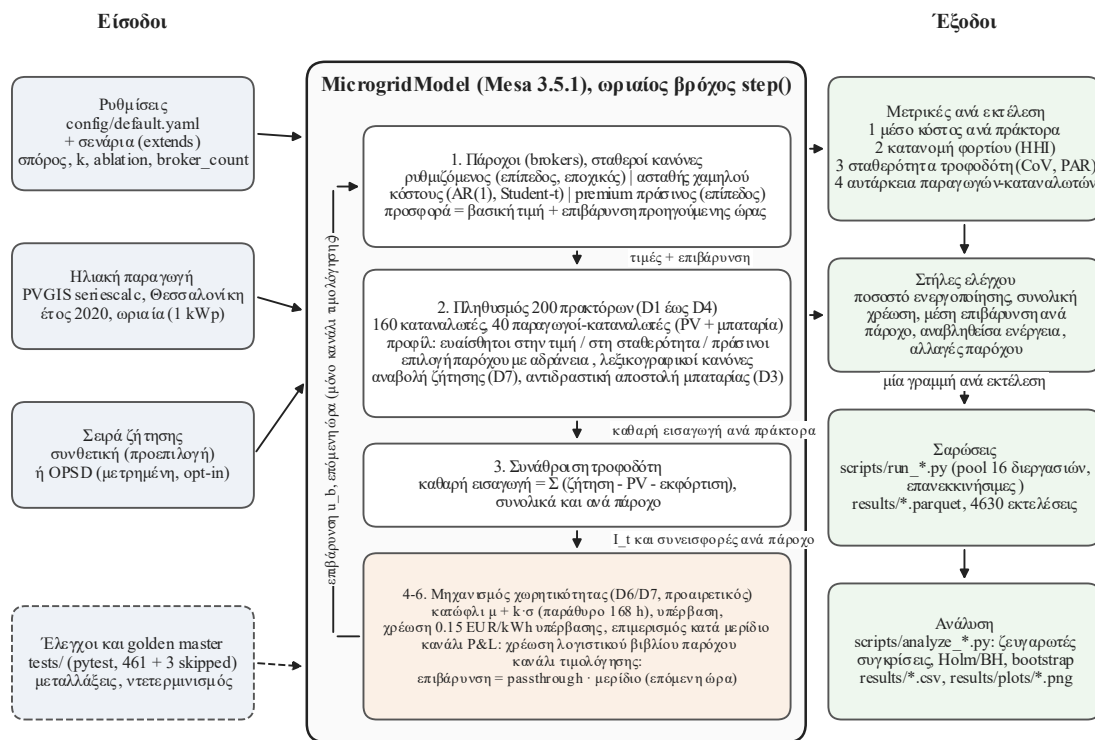
Η αρχιτεκτονική διαβάζεται καλύτερα ως ροή δεδομένων παρά ως κατάλογος αρχείων, και με αυτή τη μορφή αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.1. Το διάγραμμα αυτό είναι σχεδιασμένο, αποτυπωμένο από τον πηγαίο κώδικα του πακέτου όπως τον ορίζει το αποθετήριο, και όχι παραγόμενο από δεδομένα. Στην είσοδο βρίσκονται τρεις πηγές. Η πρώτη είναι τα αρχεία παραμετροποίησης: το παραδιδόμενο αρχείο διαμόρφωσης κρατά την πλήρη διαμόρφωση, ενώ κάθε αρχείο σεναρίου δηλώνει ποιο αρχείο επεκτείνει και υπερισχύει μόνο στα κλειδιά που αλλάζει, με τη συγχώνευση και την επικύρωση να γίνονται στον φορτωτή παραμετροποίησης. Η δεύτερη και η τρίτη είναι οι δύο ωριαίες σειρές, η ηλιακή παραγωγή και η ζήτηση, τις οποίες προμηθεύει το άρθρωμα φόρτωσης δεδομένων από τα τοπικά αποθηκευμένα αρχεία δειγμάτων του αποθετηρίου.

Ο φορτωτής παραμετροποίησης τροφοδοτεί το μοντέλο του μικροδικτύου, που είναι η μοναδική οντότητα με καθολική εικόνα της εκτέλεσης. Κατά την κατασκευή του, το μοντέλο χτίζει τους παρόχους μέσα από ένα λεξικό κατασκευαστών, το οποίο αντιστοιχίζει τον δηλωμένο τύπο κάθε εγγραφής παρόχου σε έναν κατασκευαστή, και στη συνέχεια δημιουργεί τον πληθυσμό των 200 πρακτόρων. Οι πάροχοι είναι απλά αντικείμενα Python που κρατούνται σε λεξικό πάνω στο μοντέλο και όχι πράκτορες του πλαισίου, ώστε το σύνολο πρακτόρων του μοντέλου να περιέχει ακριβώς τον πληθυσμό και τίποτε άλλο. Δεν υπάρχει χρονοπρογραμματιστής, δεν υπάρχει συλλέκτης δεδομένων του πλαισίου, δεν υπάρχει βάση δεδομένων ούτε υπηρεσία δικτύου: η ενεργοποίηση των πρακτόρων και η καταγραφή της κατάστασης γίνονται ρητά μέσα στον βρόχο βήματος.

Ο βρόχος βήματος, που περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 4.3, συσσωρεύει ένα μέγεθος σε επίπεδο τροφοδότη, το ιστορικό της ωριαίας καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη, δίπλα στη συσσωρευμένη κατάσταση των παρόχων, των πρακτόρων και των βοηθητικών μετρητών ελέγχου του μηχανισμού. Το ιστορικό του τροφοδότη είναι το άθροισμα της καθαρής εισαγωγής όλων των πρακτόρων για κάθε ώρα του ορίζοντα, δηλαδή ζήτηση μείον φωτοβολταϊκή παραγωγή μείον εκφόρτιση μπαταρίας, αθροισμένα σε ολόκληρο τον πληθυσμό. Στο τέλος της εκτέλεσης το άρθρωμα μετρικών ανάγει το ιστορικό αυτό, μαζί με τη συσσωρευμένη κατάσταση των παρόχων και των πρακτόρων, σε ένα αντικείμενο

αποτελεσμάτων που φέρει τις τέσσερις μετρικές της εργασίας και τα βοηθητικά μεγέθη ελέγχου του μηχανισμού.

Από εκεί και πέρα η διαδρομή είναι πειραματική. Οι εκτελεστές σαρώσεων γράφουν μία γραμμή ανά κελί της σάρωσης, πρώτα σε ένα σημείο ελέγχου σε μορφή CSV και έπειτα σε ένα αρχείο αποτελεσμάτων parquet. Στην κύρια σάρωση κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μία πραγματική εκτέλεση ανά ζεύγος διαμόρφωσης και σπόρου τυχαιότητας. Στη δομική σάρωση της απόφασης D9 αυτό δεν ισχύει για ολόκληρο τον πίνακα: το σκέλος με τον μηχανισμό απενεργοποιημένο είναι αποδεδειγμένα αμετάβλητο ως προς τους τρεις συντελεστές που σαρώνονται, οπότε 1400 από τις 2880 γραμμές αντιγράφονται από την κανονική εκτέλεση του ίδιου σπόρου αντί να προσομοιωθούν ξανά, και κάθε γραμμή φέρει μια στήλη προέλευσης που το δηλώνει. Επειδή το σημείο ελέγχου κρατεί μία γραμμή ανά κελί, μια σάρωση που διακόπηκε συνεχίζεται παραλείποντας κάθε κελί που υπάρχει ήδη. Τα σενάρια ανάλυσης διαβάζουν τα parquet και τα ανάγουν στα συνοπτικά CSV και στα σχήματα που αναφέρει το Κεφάλαιο 7. Καμία ροή ισχύος, τάση ή όριο γραμμής δεν μοντελοποιείται σε κανένα σημείο αυτής της αλυσίδας.



Σχήμα 4.1: Η αρχιτεκτονική του συστήματος.

4.3 Ο ωριαίος βρόχος βήματος

Η προσομοίωση προχωρά σε διακριτά ωριαία βήματα, με προεπιλεγμένο ορίζοντα ένα έτος, δηλαδή 8760 ώρες. Κάθε κλήση του βήματος του μοντέλου εκτελεί έξι στάδια με σταθερή σειρά, και η σειρά αυτή είναι ουσιώδης για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο στάδιο οι πάροχοι δίνουν προσφερόμενη τιμή. Κάθε πάροχος αποτιμά τον δικό του κανόνα προσφερόμενης τιμής για την τρέχουσα ώρα, και πάνω στη βασική αυτή τιμή προστίθεται η προσαύξηση που ο ίδιος πάροχος κληρονόμησε από το προηγούμενο βήμα. Η πρόσθεση γίνεται πάντοτε

έξω από τον κανόνα αυτόν και ποτέ μέσα του, ώστε ο κανόνας τιμολόγησης του αρχετύπου να παραμένει ανέπαφος και διακριτός από το τιμολογιακό σήμα του μηχανισμού. Ο μεταβλητός πάροχος τραβά ακριβώς μία διαταραχή ανά ώρα, ανεξάρτητα από το ποια αφαιρετική διαμόρφωση τρέχει, και γι' αυτό και οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις σε έναν δεδομένο σπόρο μοιράζονται την ίδια ακολουθία τυχαίων αριθμών.

Στο δεύτερο στάδιο δρουν οι πράκτορες, με μία κλήση που ανακατεύει το σύνολο πρακτόρων με τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών του μοντέλου και καλεί το βήμα του καθενός. Μέσα σε αυτό το στάδιο κάθε πράκτορας, καταναλωτής και παραγωγοκαταναλωτής χωρίς εξαίρεση, διαβάζει την τρέχουσα προσαύξηση του δικού του παρόχου και εκτελεί πρώτα τον κανόνα αναβολής ζήτησης, και μόνο μετά ο παραγωγοκαταναλωτής εκτελεί τη δική του διαχείριση φωτοβολταϊκών και μπαταρίας.

Στο τρίτο στάδιο αθροίζεται η πραγματική, μετά την αναβολή, καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη για την ώρα αυτή και προσαρτάται στο ιστορικό καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη. Η μετρική 3 υπολογίζεται από αυτό ακριβώς το ιστορικό.

Τα τρία τελευταία στάδια εκτελούνται μόνο όταν ο μηχανισμός χωρητικότητας είναι ενεργός. Στο τέταρτο στάδιο ο μηχανισμός υπολογίζει το κατώφλι, την υπέρβαση, τη συνολική χρέωση και τον επιμερισμό της ανά πάροχο. Στο πέμπτο στάδιο το λογιστικό κανάλι, εφόσον είναι ενεργοποιημένο, χρεώνει το καθολικό κάθε παρόχου με τον επιμερισμό που του αναλογεί. Στο έκτο στάδιο το κανάλι τιμολόγησης, εφόσον είναι ενεργοποιημένο, γράφει τις προσαυξήσεις του επόμενου βήματος, ενώ διαφορετικά τις μηδενίζει ρητά. Τα δύο κανάλια είναι ανεξάρτητα ενεργοποιήσιμα και σε αυτό ακριβώς το σημείο στηρίζεται ολόκληρη η αφαιρετική μελέτη του Κεφαλαίου 6.

Από τη σειρά αυτή προκύπτει άμεσα η υστέρηση ενός βήματος: μια προσαύξηση που υπολογίζεται στο βήμα t δεν επηρεάζει καμία τιμή στο ίδιο βήμα, αλλά μπαίνει στην προσφερόμενη τιμή του βήματος $t+1$. Ο πράκτορας επομένως δεν αντιδρά ποτέ στη χρέωση της ώρας που ο ίδιος μόλις προκάλεσε, αλλά σε εκείνη της προηγούμενης ώρας, κάτι που μπορεί να διαβαστεί ως τιμολογιακό σήμα γνωστό ήδη στην αρχή της περιόδου στην οποία ισχύει, χωρίς αυτό να μοντελοποιεί κάποιον συγκεκριμένο μηχανισμό ανακοίνωσης πραγματικής αγοράς.

4.4 Τα τρία αρχέτυπα παρόχων

Στην προεπιλεγμένη διαμόρφωση ανταγωνίζονται για πελάτες τρία αρχέτυπα παρόχων (βλ. Πίνακας 4.1). Η σάρωση ευαισθησίας εκτελεί επιπλέον μια παραλλαγή δύο και μια παραλλαγή πέντε παρόχων του ίδιου συνόλου. Κάθε τιμή σε EUR/kWh που ακολουθεί είναι αντιπροσωπευτική πρόσφατη αγκύρωση σε κατονομασμένη δημόσια πηγή και όχι προσαρμοσμένη παράμετρος: η βάση της ρυθμιζόμενης επιχείρησης στο τιμολόγιο Γ1 της ΔΕΗ και στη σειρά τιμών ηλεκτρικής ενέργειας νοικοκυριών της Eurostat, η βάση του μεταβλητού παρόχου στην τάξη μεγέθους των μέσων τιμών επόμενης ημέρας του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας, και η προσαύξηση του πράσινου παρόχου σε τυπικά πράσινα ασφάλιστρα λιανικής της ΕΕ. Μία δηλωμένη εξαίρεση: η κλίμακα διαταραχής του μεταβλητού παρόχου επαναβαθμονομήθηκε (F4) από σάρωση υποψήφιων τιμών αποκλειστικά έναντι του στόχου σπανιότητας του δαπέδου τιμής, όχι έναντι καμίας μετρικής αποτελέσματος ή μεριδίου φορτίου.

Η ρυθμιζόμενη επιχείρηση κοινής ωφέλειας εφαρμόζει σταθερό εποχικό τιμολόγιο, με βασική τιμή 0.19 EUR/kWh και εποχικό πλάτος 0.02 EUR/kWh, με αιχμή γύρω από την ημέρα 15 του έτους, δηλαδή μια αντιπροσωπευτική αιχμή μέσων Ιανουαρίου της περιόδου θέρμανσης. Η πρασινότητά της είναι 0.30, που αντιστοιχεί σε τυπικό μείγμα παραγωγής δικτύου και όχι σε προϊόν που διαφημίζεται ως πράσινο.

Η τιμή δίνεται από τη σχέση (4.1), όπου b η βασική τιμή, A το εποχικό πλάτος, $d(t)$ η ημέρα του έτους στην οποία ανήκει η ώρα t και d_{peak} η ημέρα αιχμής.

$$p_{reg}(t) = b + A \cdot \cos\left(\frac{2\pi(d(t)-d_{peak})}{365}\right) \quad (4.1)$$

Ο μεταβλητός πάροχος χαμηλού κόστους συνδυάζει φθηνή βάση 0.12 EUR/kWh με μια διαταραχή που επανέρχεται στον μέσο, μοντελοποιημένη ως αυτοπαλίνδρομη διαδικασία πρώτης τάξης AR(1) με εμμονή 0.85 και καινοτομίες με βαριές ουρές από κατανομή Student-t με 3 βαθμούς ελευθερίας, σύμφωνα με την απόφαση D5. Ένα δάπεδο τιμής στα 0.03 EUR/kWh και μια ήπια οροφή στο τετραπλάσιο της βάσης κρατούν τη σειρά φυσικά εύλογη. Η πρασινότητά του είναι 0.10. Η σχέση (4.2) δίνει τη λανθάνουσα κατάσταση s_t και την τιμή, με ϕ την εμμονή, σ την κλίμακα της καινοτομίας, ε_t την τυπική μεταβλητή Student-t με ν βαθμούς ελευθερίας, της οποίας η διακύμανση είναι $\nu/(\nu-2)$ και όχι μονάδα, c τη βάση, p_{min} το δάπεδο και m τον πολλαπλασιαστή οροφής.

$$s_t = \phi \cdot s_{t-1} + \sigma \cdot \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim t_\nu, \quad p_{vol}(t) = \min(\max(c + s_t, p_{min}), m \cdot c) \quad (4.2)$$

Στη διαδικασία αυτή προστίθεται ένας κανόνας αντι-κορεσμού ολοκληρωτή (anti-windup): μετά την αποκοπή, η λανθάνουσα κατάσταση s_t δεν κρατά την τιμή που είχε πριν από την αποκοπή, αλλά επαναφέρεται σε εκείνη που υπονοεί η αποκομμένη τιμή. Χωρίς αυτόν, μια βαθιά εκδρομή άφηνε την κατάσταση να αποσβένει γεωμετρικά ενώ η ορατή τιμή έμενε καθηλωμένη στο δάπεδο για πολλές ώρες, παράγοντας μακρά επίπεδα οροπέδια που ήταν τεχνούργημα της αποκοπής και όχι της επιδιωκόμενης αιχμηρής δυναμικής. Οι μετρημένοι ρυθμοί, σε πλήρες έτος με τη διαμόρφωση που παραδίδεται, δείχνουν ότι το δάπεδο ενεργοποιείται στο 1.63 τοις εκατό των ωρών και η οροφή στο 0.011 τοις εκατό, ενώ η μεγαλύτερη συνεχής παραμονή στο δάπεδο είναι 4 ώρες. Σε πλήρες έτος η πραγματοποιημένη τιμή του παρόχου αυτού κυμαίνεται από 0.03 έως 0.48 EUR/kWh, με μέση τιμή κοντά στο 0.123 και τυπική απόκλιση κοντά στο 0.045 EUR/kWh, ενώ η μετρημένη μεταβλητότητά του σε κυλιόμενο παράθυρο 720 ωρών βρίσκεται στο διάστημα από 0.037 έως 0.054 EUR/kWh, το οποίο επικαλύπτει μερικώς την κορυφή του διαστήματος ανοχής μεταβλητότητας [0.01, 0.05] των πρακτόρων: για ανοχή έως 0.037 ο πάροχος αυτός παραμένει πάντοτε μη αποδεκτός, ενώ ψηλότερα γίνεται αποδεκτός σε μέρος των ημερών του έτους. Πρόκειται για μετρημένη παρενέργεια της αναβαθμονόμησης της κλίμακας της διαταραχής, που αναφέρεται όπως μετρήθηκε και δεν επαναρυθμίστηκε.

Ο πράσινος πάροχος υψηλής χρέωσης εφαρμόζει σταθερή τιμή ίση με τη βασική τιμή της ρυθμιζόμενης επιχείρησης συν προσαύξηση 0.04 EUR/kWh, όπως δίνει η σχέση (4.3), όπου μ η προσαύξηση. Η πρασινότητά του είναι 0.95.

$$p_{green} = b + \mu \quad (4.3)$$

Η τιμή αυτή υπολογίζεται μία φορά κατά την κατασκευή του παρόχου και επιστρέφεται αμετάβλητη από κάθε αποτίμηση του κανόνα τιμής του, οπότε η πραγματοποιημένη μεταβλητότητά της είναι ακριβώς μηδέν για κάθε ώρα μιας εκτέλεσης. Πρόκειται για ισχυρότερη ιδιότητα από το να είναι απλώς χαμηλής διακύμανσης, και έχει μια συγκεκριμένη συνέπεια: ο πάροχος αυτός περνά αυτομάτως το φίλτρο μεταβλητότητας κάθε πράκτορα προσανατολισμένου στη σταθερότητα, ανεξάρτητα από την ανοχή που ο συγκεκριμένος πράκτορας έχει δειγματοληπτηθεί να έχει. Αυτό είναι σκόπιμη απλοποίηση του μοντέλου, την οποία δηλώνω ρητά εδώ ώστε να μην εκληφθεί ως αναδυόμενο αποτέλεσμα του ίδιου του φίλτρου.

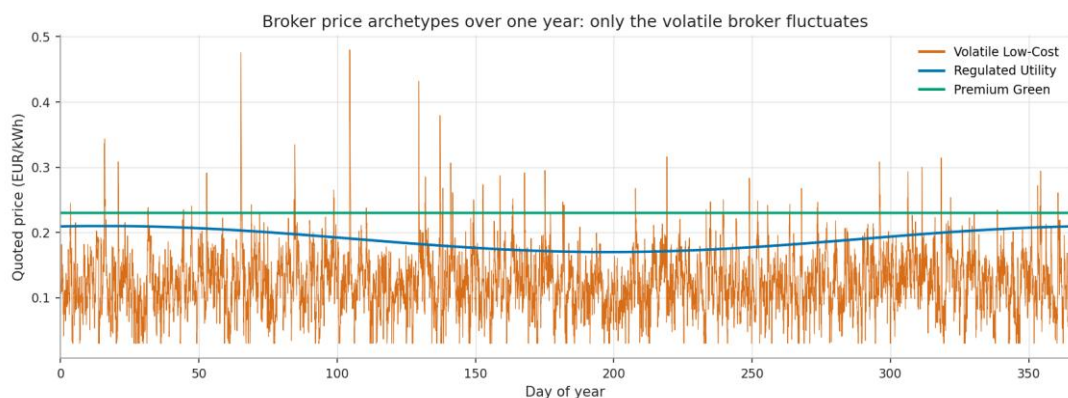
Η ασυμμετρία του θορύβου ανάμεσα στα τρία αρχέτυπα δεν είναι ασυνέπεια αλλά συνέπεια των ίδιων των ορισμών τους: η ρυθμιζόμενη επιχείρηση ορίζεται ως σταθερή με εποχική διακύμανση, ο πράσινος πάροχος ως σταθερή προσαύξηση, και μόνο ο μεταβλητός πάροχος αντιπροσωπεύει πάροχο εκτεθειμένο στη χονδρική. Η υποκείμενη επιλογή είναι οι καινοτομίες Student-t αντί για κανονικές,

επειδή οι πραγματικές τιμές που συνδέονται με τη χονδρική έχουν βαριές ουρές και μια κανονική διαταραχή θα υποεκτιμούσε ακριβώς τον κίνδυνο ουράς στον οποίο υποτίθεται ότι αντιδρά το προφίλ που είναι προσανατολισμένο στη σταθερότητα.

Στο σκέλος των δύο παρόχων ο πράσινος πάροχος αφαιρείται και ανταγωνίζονται μόνο ο ρυθμιζόμενος και ο μεταβλητός. Στο σκέλος των πέντε παρόχων τα αρχέτυπα του μεταβλητού και του πράσινου διπλασιάζονται, με μικρή διατάραξη παραμέτρων που εξαρτάται ντετερμινιστικά από τον σπόρο και προέρχεται από σταθερή συνάρτηση ακέραιου κατακερματισμού και όχι από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών του μοντέλου, ώστε τα δύο αντίγραφα ενός αρχετύπου να είναι σχεδόν υποκατάστατα και όχι πανομοιότυπα κλώνοι. Η μετρημένη συνέπεια, που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 7, είναι ότι το σκέλος αυτό λειτουργεί με 3 έως 4 ενεργούς παρόχους, δηλαδή παρόχους με θετικό μερίδιο φορτίου, κατά μέσο όρο 3.625 και με διάμεσο 4, και όχι με πέντε.

Πάροχος	Πρασινότητα	Κανόνας τιμής	Βασικές παράμετροι	Πραγματοποιημένο εύρος
ρυθμιζόμενη επιχείρηση	0.30	εποχικό σταθερό τιμολόγιο, (4.1)	βάση 0.19 EUR/kWh, εποχικό πλάτος 0.02 EUR/kWh, ημέρα αιχμής 15	περίπου 0.17 έως 0.21 EUR/kWh
μεταβλητός χαμηλού κόστους	0.10	AR(1) με καινοτομίες Student-t, δάπεδο και οροφή, (4.2)	βάση 0.12 EUR/kWh, εμμονή 0.85, κλίμακα καινοτομίας 0.015 EUR/kWh, 3 βαθμοί ελευθερίας, δάπεδο 0.03 EUR/kWh, οροφή 4.0 φορές τη βάση	0.03 έως 0.48 EUR/kWh, μέση τιμή κοντά στο 0.123, τυπική απόκλιση κοντά στο 0.045 EUR/kWh
πράσινος υψηλής χρέωσης	0.95	σταθερή τιμή υπολογισμένη μία φορά, (4.3)	προσαύξηση 0.04 EUR/kWh πάνω από τη ρυθμιζόμενη βάση	σταθερά 0.23 EUR/kWh, μεταβλητότητα ακριβώς μηδέν

Πίνακας 4.1: Τα τρία αρχέτυπα παρόχων της προεπιλεγμένης διαμόρφωσης.



Σχήμα 4.2: Οι ωριαίες τιμές των τριών παρόχων σε έναν χρόνο.

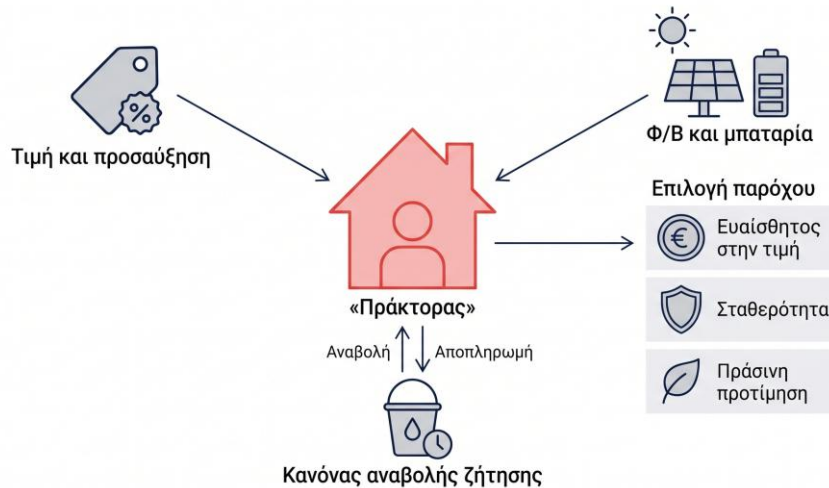


Σχήμα 4.3: Ο μεταβλητός πάροχος: ημερήσιες κηροπήγιες, κατανομή καινοτομιών και κανονικά ποσοστημόρια.

Το Σχήμα 4.2 δείχνει τις τρεις σειρές τιμών σε έναν χρόνο και καθιστά ορατό ότι μόνο ο μεταβλητός πάροχος διακυμαίνεται, με τη ρυθμιζόμενη τιμή να διαγράφει αργό εποχικό συνημίτονο και την πράσινη τιμή να είναι ευθεία γραμμή. Το Σχήμα 4.3 εστιάζει στον μεταβλητό πάροχο, με ημερήσιες κηροπήγιες ανοίγματος, μεγίστου, ελαχίστου και κλεισίματος σε αντιπροσωπευτικό παράθυρο και σημειωμένα το δάπεδο, τη βάση και την οροφή: η κατανομή των ωριαίων καινοτομιών του, σε λογαριθμικό άξονα πλήθους απέναντι σε κανονική κατανομή ίδιας τυπικής απόκλισης, έχει πολύ βαρύτερες ουρές από την κανονική και τα σημεία του διαγράμματος ποσοστημορίων αποκλίνουν από τη γραμμή αναφοράς και στα δύο άκρα, που είναι η υπογραφή του σχήματος Student-t, με δειγματική περίσσεια κύρτωσης κοντά στο 30. Και τα δύο σχήματα παράγονται από την ίδια διαμόρφωση και τον ίδιο σπόρο με τις μετρήσεις που παρατέθηκαν παραπάνω, ώστε οι πραγματοποιημένες ροπές που αναφέρω να είναι ακριβώς αυτές που απεικονίζονται.

4.5 Ο πληθυσμός: καταναλωτές, παραγωγοκαταναλωτές και οι κανόνες τους

Ο προεπιλεγμένος πληθυσμός είναι 200 πράκτορες, από τους οποίους το 20 τοις εκατό είναι παραγωγοκαταναλωτές με μικρά φωτοβολταϊκά και περιορισμένη μπαταρία και οι υπόλοιποι καθαροί καταναλωτές. Ο πληθυσμός μοιράζεται σε τρία προφίλ συμπεριφοράς: 40 τοις εκατό ευαίσθητοι στην τιμή, 30 τοις εκατό προσανατολισμένοι στη σταθερότητα και 30 τοις εκατό με προτίμηση στο πράσινο. Τη δομή απόφασης ενός πράκτορα, δηλαδή την ανάγνωση της τιμής και της προσαύξησης του δικού του παρόχου, τον κανόνα αναβολής ζήτησης και τους κανόνες επιλογής παρόχου που περιγράφονται παρακάτω, συνοψίζει σχηματικά το Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ο πράκτορας και οι κανόνες απόφασής του.

Η επιλογή παρόχου ακολουθεί την απόφαση D1, δηλαδή ικανοποιητική επιλογή (satisficing) με αδράνεια αλλαγής παρόχου. Οι καταναλωτές δεν επαναβεβαιτοποιούν την επιλογή τους κάθε ώρα. Καθένας κρατά τον τρέχοντα πάροχό του έως ότου ένα προσωπικό σήμα ικανοποίησης, ένα ανά προφίλ, παραβιάσει μια προσωπική ανοχή για παρατεταμένο αριθμό ωρών: η τρέχουσα τιμή του παρόχου για τους ευαίσθητους στην τιμή, η πραγματοποιημένη μεταβλητότητα τιμής για τους προσανατολισμένους στη σταθερότητα και η πρασινότητα του παρόχου για όσους έχουν προτίμηση στο πράσινο. Μόνο τότε ο πράκτορας επανεξετάζει, και η αλλαγή φέρει μικρή ποινή χρησιμότητας, δηλαδή μεροληψία υπέρ της υπάρχουσας κατάστασης. Η επιλογή παρόχου είναι επομένως υστερητική και όχι απόφαση χωρίς τριβές ανά περίοδο. Η ίδια η ζήτηση βάσης κάθε πράκτορα δεν εξαρτάται από την τιμή ούτε από την επιλογή παρόχου: προκύπτει μόνο από το ωριαίο προφίλ επί το δικό του πλάτος ζήτησης, και ο μόνος δίαυλος μέσω του οποίου μια τιμή μπορεί να μετακινήσει ζήτηση είναι ο κανόνας αναβολής ζήτησης του μηχανισμού χωρητικότητας.

Οι κανόνες αξιολόγησης των υποψήφιων παρόχων ακολουθούν την απόφαση D2 και είναι λεξικογραφικοί, δηλαδή ιεραρχημένοι κατά προτεραιότητα, αντί για σταθμισμένη αθροιστική χρησιμότητα. Οι ευαίσθητοι στην τιμή ελαχιστοποιούν το αναμενόμενο κόστος και λύνουν τις ισοπαλίες με βάση τη σταθερότητα. Οι προσανατολισμένοι στη σταθερότητα απορρίπτουν πρώτα κάθε πάροχο του οποίου η πρόσφατη πραγματοποιημένη μεταβλητότητα τιμής ξεπερνά την προσωπική τους ανοχή και έπειτα ελαχιστοποιούν το κόστος ανάμεσα σε όσους απομένουν. Οι πράκτορες με προτίμηση στο πράσινο απορρίπτουν πρώτα κάθε πάροχο κάτω από το προσωπικό τους κατώφλι πρασινότητας και έπειτα ελαχιστοποιούν το κόστος ανάμεσα σε όσους απομένουν. Ο λόγος για τον οποίο επέλεξα λεξικογραφικούς κανόνες είναι ότι μια σταθμισμένη χρησιμότητα θα απαιτούσε βάρη προτίμησης βαθμονομημένα σε δεδομένα που εδώ δεν υπάρχουν, ενώ οι ταχείες και λιτές ευρετικές αποφεύγουν αυτή την αυθαίρετη επιλογή. Πρόκειται για απλοποίηση μοντελοποίησης και όχι για νέο αλγόριθμο.

Η ετερογένεια του πληθυσμού ακολουθεί την απόφαση D4: αντί για λίγους πανομοιότυπους αντιπροσωπευτικούς πράκτορες ανά προφίλ, οι παράμετροι κάθε πράκτορα δειγματοληπτούνται ανεξάρτητα από φραγμένα διαστήματα με τη σπαρμένη γεννήτρια τυχαίων αριθμών του μοντέλου. Ο Πίνακας 4.2 συγκεντρώνει τα οκτώ αυτά διαστήματα. Πανομοιότυποι πράκτορες θα συνέπτυσαν τη διακύμανση και θα έκαναν τον πληθυσμό των 200 να συμπεριφέρεται σαν τρεις ή τέσσερις μακρο-πράκτορες, με αποτέλεσμα η μετρική κατανομής φορτίου και η μετρική αυτάρκειας να μην έχουν τίποτε να αναφέρουν. Τα ίδια τα όρια των διαστημάτων παραμένουν επιλογή του συγγραφέα και δεν

προσαρμόστηκαν σε μετρημένα δεδομένα πληθυσμού, και αυτό το δηλώνω ως περιορισμό αντί να το αποσιωπήσω.

Παράμετρος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδα
κλίμακα ζήτησης	0.6	1.6	αδιάστατο
ανοχή τιμής	0.18	0.32	EUR/kWh
ανοχή μεταβλητότητας τιμής	0.01	0.05	EUR/kWh
κατώφλι πρασινότητας	0.20	0.55	αδιάστατο
ποινή αλλαγής παρόχου	0.02	0.06	EUR/kWh
διάρκεια παρατεταμένης παραβίασης	12	96	ώρες (ακέραιες)
ισχύς φωτοβολταϊκών παραγωγοκαταναλωτή	1.5	4.5	kWp
χωρητικότητα μπαταρίας παραγωγοκαταναλωτή	4.0	12.0	kWh

Πίνακας 4.2: Τα οκτώ διαστήματα δειγματοληψίας των παραμέτρων των πρακτόρων.

Δύο μετρημένες συνέπειες αυτής της παραμετροποίησης χρειάζεται να δηλωθούν εδώ, ώστε ο αναγνώστης να μην ξαφνιαστεί από τους αριθμούς του Κεφαλαίου 7. Η πρώτη αφορά την αρχική ανάθεση παρόχου. Κατά την κατασκευή του πληθυσμού δεν υπάρχει ακόμη ιστορικό τιμών, οπότε η ανάθεση επιλέγει τον φθηνότερο πάροχο ανάμεσα σε όσους περνούν το κατηγορικό φίλτρο του προφίλ του πράκτορα, χρησιμοποιώντας μια τιμή αναφοράς που δεν μεταβάλλει την κατάσταση του παρόχου και, για το φίλτρο σταθερότητας, την αναλυτικά παραγόμενη στάσιμη τυπική απόκλιση της διαδικασίας διαταραχής του μεταβλητού παρόχου. Αυτό αντικατέστησε την ομοιόμορφα τυχαία αρχική ανάθεση και αφαίρεσε ένα τεχνητό μεταβατικό φαινόμενο καθίζησης, στο οποίο πράκτορες γεννιούνταν σε λάθος πάροχο και έφευγαν αμέσως. Ο μετρημένος ρυθμός αλλαγής παρόχου σε πλήρες έτος μετά τη διόρθωση, στον κανονικό σπόρο τυχαιότητας 20260704, είναι 0.0 τοις εκατό των 200 πρακτόρων, με 1 επανεξέταση να μπλοκάρεται από την ποινή αλλαγής· στους 30 σπόρους της σάρωσης ο ρυθμός στη βάση αναφοράς με τρεις παρόχους κυμαίνεται από 0.00 έως 2.00 τοις εκατό, με μέσο όρο 0.58 τοις εκατό (Κεφάλαιο 7). Ο αριθμός αυτός βρίσκεται κάτω από το ίδιο το πραγματικό σημείο αναφοράς που επικαλείται η απόφαση D1 και αναφέρεται ως παρατηρούμενος, όχι ως επιτυχής επικύρωση και όχι ρυθμισμένος ώστε να πέσει εντός εύρους. Ο μηχανισμός αλλαγής παρόχου λειτουργεί και ελέγχεται άμεσα από τη σουίτα ελέγχων, και η ποινή αποδεδειγμένα δεσμεύει τουλάχιστον μία φορά, αλλά υπό τη συγκεκριμένη παραμετροποίηση η αλλαγή παρόχου δεν είναι σημαντικός συντελεστής της δυναμικής της μετρικής 2 και δεν υπονοώ καμία συνεχιζόμενη κινητικότητα πελατών.

Η δεύτερη συνέπεια αφορά την ετερογένεια των πρακτόρων με προτίμηση στο πράσινο. Το διάστημα δειγματοληψίας του κατωφλίου πρασινότητας διευρύνθηκε στο [0.20, 0.55], ώστε να περιλαμβάνει εκατέρωθεν την πρασινότητα 0.30 της ρυθμιζόμενης επιχείρησης. Σε πλήρες έτος με τη διαμόρφωση που παραδίδεται, από τους 200 πράκτορες οι 54 δειγματολήφθηκαν ως πράκτορες με προτίμηση στο πράσινο. Από αυτούς, 11 δέχονται τόσο τον ρυθμιζόμενο όσο και τον πράσινο πάροχο και 43 δέχονται μόνο τον πράσινο, οπότε η ομάδα αυτή χωρίζεται πράγματι σε δύο συμπεριφορικές υποομάδες αντί για μία. Ο μεταβλητός πάροχος, με πρασινότητα 0.10, παραμένει απορριπτέος από κάθε πράκτορα με προτίμηση στο πράσινο, αφού το 0.20 του νέου ελαχίστου εξακολουθεί να βρίσκεται πάνω από αυτόν. Αυτό είναι επιδιωκόμενο και όχι υπολειπόμενο σφάλμα.

4.6 Διαχείριση φωτοβολταϊκών και μπαταρίας του παραγωγοκαταναλωτή

Οι μπαταρίες των παραγωγοκαταναλωτών εκτελούν καθαρά αντιδραστική διαχείριση, σύμφωνα με την απόφαση D3, μέσα στη μέθοδο υπολογισμού της καθαρής εισαγωγής του παραγωγοκαταναλωτή. Ο

κανόνας έχει τρία σκέλη: φόρτιση από το πλεόνασμα της φωτοβολταϊκής παραγωγής, εκφόρτιση για την κάλυψη της τοπικής ζήτησης, και παρακράτηση σταθερού κλάσματος της χωρητικότητας ως βραδινό απόθεμα. Το κλάσμα αυτό είναι 0.2 και το απόθεμα δεσμεύεται μέχρι τη σταθερή ώρα 18. Καμία πρόβλεψη τιμής, καμία βελτιστοποίηση και καμία προνοητικότητα δεν χρησιμοποιείται πουθενά σε αυτόν τον κανόνα.

Η στάθμη φόρτισης ξεκινά ακριβώς στο επίπεδο του αποθέματος: αυθαίρετη αλλά ντετερμινιστική και ουδέτερη αρχική συνθήκη, ούτε άδεια ούτε γεμάτη. Η εκφόρτιση φράσσεται από το ίδιο το έλλειμμα του παραγωγοκαταναλωτή, οπότε ο κανόνας οδηγεί προς ιδιοκατανάλωση με στόχο μηδενική καθαρή εισαγωγή και ποτέ προς εξαγωγή για πίστωση ή αρμπιτράζ.

Η επιλογή είναι σκόπιμα ταπεινή. Στη βιβλιογραφία που επισκοπήθηκε για την εργασία αυτή, χωρίς αξίωση συστηματικής ανασκόπησης, η διαχείριση παραγωγοκαταναλωτών κυριαρχείται από βελτιστοποίηση και, πιο πρόσφατα, από ενισχυτική μάθηση, ενώ οι ελεγκτές οικιακών μπαταριών μαζικής αγοράς εκτελούν απλή λογική ιδιοκατανάλωσης και όχι βελτιστοποίηση σε επίπεδο νοικοκυριού με τέλεια πρόβλεψη. Ένας κανόνας με στατικό απόθεμα είναι πλησιέστερο ανάλογο της συμπεριφοράς που έχει όντως εγκατασταθεί και κρατά το μοντέλο ελεύθερο από υπόρρητη βελτιστοποίηση, την οποία θα μπορούσε κανείς να εκλάβει ως ευφυΐα που οι πράκτορες δεν διαθέτουν. Δεν ισχυρίζομαι ότι ο αντιδραστικός κανόνας αποδίδει καλύτερα από τη βελτιστοποίηση: είναι επιλογή ευλογοφάνειας.

4.7 Δεδομένα εισόδου

Η ηλιακή παραγωγή είναι πραγματική ανάκτηση από το API ωριαίων σειρών του PVGIS για τη Θεσσαλονίκη [8], με γεωγραφικό πλάτος 40.64 και μήκος 22.95, σταθερή κλίση 30 μοιρών, νότιο προσανατολισμό, σύστημα αναφοράς 1 kWp και 14 τοις εκατό απώλειες συστήματος. Το API δέχεται έτη αιτήματος μόνο από το 2005 έως το 2020, οπότε ζητήθηκε το έτος 2020, δίσεκτο, με 8784 ωριαίες γραμμές. Ο φορτωτής επαναλαμβάνει ή περικόπτει αυτό το ένα ανακτημένο έτος στον ορίζοντα που ζητά κάθε εκτέλεση. Για τον ορίζοντα των 8760 ωρών που ορίζει το πλαίσιο της εργασίας, αυτό μόνο περικόπτει τις τελευταίες 24 ώρες του ανακτημένου έτους και δεν επαναλαμβάνει τίποτε. Πρόκειται για πραγματική φωτοβολταϊκή παραγωγή προερχόμενη από δορυφορική επανάλυση, αποθηκευμένη τοπικά, όχι για συνθετικό δείγμα. Παραμένει όμως ένα και μόνο επαναλαμβανόμενο μετεωρολογικό έτος, οπότε οποιοσδήποτε μελλοντικός ορίζοντας μεγαλύτερος του έτους θα επαναλάμβανε αυτούσιο τον ίδιο καιρό αντί να καλύπτει διαφορετικά πραγματικά έτη.

Η προεπιλεγμένη σειρά οικιακής ζήτησης είναι αντιπροσωπευτικό συνθετικό προφίλ ζήτησης και όχι μετρημένη ζήτηση. Είναι ντετερμινιστικά παραγόμενο προφίλ με πρωινή και βραδινή γκαουσιανή καμπούρα, ενίσχυση των ωρών του σαββατοκύριακου και εποχικό πολλαπλασιαστή με χειμερινή αιχμή πάνω σε σταθερό φορτίο αναμονής, κανονικοποιημένο σε αντιπροσωπευτικό ετήσιο σύνολο 4000 kWh για ένα νοικοκυριό αναφοράς.

Μια προηγούμενη διατύπωση αυτής της τεκμηρίωσης δικαιολογούσε τη συνθετική επιλογή λέγοντας ότι καμία φραγμένη ανάκτηση πραγματικού ωριαίου συνόλου οικιακής ζήτησης δεν ήταν πρακτικά εφικτή. Η δικαιολογία αυτή ελέγχθηκε αργότερα και βρέθηκε λανθασμένη, οπότε αποσύρεται εδώ αντί να αφηθεί να στέκει: το πακέτο οικιακού φορτίου του Open Power System Data [9] διαβάζεται σταδιακά χωρίς δυσκολία, με μέγεθος αρχείου 15.7 MB και φραγή περίπου στα 123 MB μνήμης. Μια πραγματική μετρημένη σειρά που παράγεται από αυτό παραδίδεται πλέον μαζί με τη συνθετική σε δικό της αρχείο δείγματος και επιλέγεται με ένα κλειδί της παραμετροποίησης (Παράρτημα Γ). Είναι χτισμένη από τα δύο οικιακά νοικοκυριά του OPSD που δεν έχουν στήλη επιτόπιας παραγωγής, ώστε η εισαγωγή τους

από το δίκτυο να είναι κατανάλωση και όχι κατανάλωση ήδη συμψηφισμένη με ιδιοκαταναλωμένη ηλιακή ενέργεια, προκύπτει από διαφόριση συσσωρευτικών μετρητών, καλύπτει 463 ημέρες χωρίς κενά και κανονικοποιείται στο ίδιο ετήσιο σύνολο με τη συνθετική, ώστε οι δύο σειρές να διαφέρουν σε σχήμα και όχι σε επίπεδο.

Δύο σφάλματα ευθυγράμμισης στον αγωγό αυτόν εντοπίστηκαν σε επιθεώρηση πριν η σειρά χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εκτέλεση, και κανένα αποτέλεσμα δεν υπολογίστηκε πάνω στην εσφαλμένη σειρά. Το πρώτο ήταν ότι η πρώτη κατασκευή δεν επέβαλλε τη σύμβαση ώρας του μοντέλου, το οποίο δεικτοδοτεί κάθε ωριαίο προφίλ με ώρα ημέρας ίση με τον δείκτη modulo 24 και του οποίου η ηλιακή σειρά ξεκινά ήδη στις 00:00 UTC. Ο δείκτης 0 έπεφτε απλώς όπου τύχαινε να ξεκινά το παράθυρο κάλυψης, μετατοπίζοντας τη φάση της ζήτησης έναντι της ηλιακής παραγωγής και έναντι του κανόνα του βραδινού αποθέματος. Η διόρθωση περικλύπτει τη σειρά ώστε ο δείκτης 0 να πέφτει στην πρώτη χρονοσφραγίδα μεσονυκτίου UTC και το τελικό μήκος να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών, δηλαδή 11112 ώρες ή 463 πλήρεις ημέρες. Το δεύτερο ήταν σφάλμα μίας ώρας στην ίδια διαδρομή: το OPSD τεκμηριώνει τη χρονοσφραγίδα ως αρχή της περιόδου που καλύπτει μια γραμμή, ενώ ο κώδικας ετικετοποιούσε κάθε διαφορισμένη τιμή με τη χρονοσφραγίδα της επόμενης γραμμής, δηλαδή με το τέλος του διαστήματος. Επειδή το βήμα ευθυγράμμισης εμπιστευόταν τις ίδιες αυτές ετικέτες για να εντοπίσει το όριο των 00:00 UTC, η σειρά έμενε εκτός φάσης κατά μία ώρα ακόμη και μετά την πρώτη διόρθωση. Η πραγματική πρώτη ακατέργαστη γραμμή που χρησιμοποιείται ξεκινά στις 2015-10-26T11:00Z και η μετατόπιση ευθυγράμμισης της σειράς που παραδίδεται είναι 13 ώρες, όχι 12.

Ο λόγος για τον οποίο δεν άλλαξα απλώς την προεπιλογή είναι ότι τα νοικοκυριά του OPSD είναι γερμανικά, οπότε η αντικατάσταση ανταλλάσσει μια αναντιστοιχία, ένα κατασκευασμένο σχήμα, με μια άλλη, μετρημένη συμπεριφορά από διαφορετική χώρα και κλίμα μεταφυτευμένη πάνω σε ένα ηλιακό έτος Θεσσαλονίκης. Καμία από τις δύο δεν είναι σαφώς η καλύτερη αγκύρωση, οπότε παραδίδονται και οι δύο και η σύγκριση αναφέρεται αντί να δηλωθεί εκ των προτέρων. Η συνθετική σειρά παραμένει η προεπιλογή και κάθε αριθμός των κεφαλαίων αποτελεσμάτων υπολογίζεται πάνω της, με μοναδική εξαίρεση τη σύγκριση των δύο πηγών ζήτησης, η οποία είναι έλεγχος ευρωστόιας σε ένα κελί της σάρωσης και όχι επανεκτέλεση της εργασίας πάνω σε μετρημένα δεδομένα. Η σειρά OPSD δεν διορθώνει τον συντελεστή ταυτοχρονισμού: το μοντέλο εξακολουθεί να εφαρμόζει μία κοινή σειρά σε όλους τους 200 πράκτορες, κλιμακωμένη μόνο κατά το δικό του πλάτος ζήτησης καθενός, οπότε η διαφοροποίηση χρονισμού μεταξύ πρακτόρων παραμένει αμετάβλητη. Ο περιορισμός αυτός ανήκει στην απόφαση D4 και όχι στην επιλογή της πηγής ζήτησης.

4.8 Οι τέσσερις μετρικές της εργασίας

Οι τέσσερις μετρικές υπολογίζονται στο άρθρωμα μετρικών από τη συσσωρευμένη κατάσταση στο τέλος της εκτέλεσης. Ο Πίνακας 4.3 συνοψίζει, και η αντιστοίχιση κάθε μεγέθους στη στήλη των αρχείων αποτελεσμάτων δίνεται στο Παράρτημα Δ.

Η μετρική 1, το μέσο κόστος, καταγράφεται ως δύο μεγέθη. Το πρώτο, το μέσο κόστος ανά πράκτορα, είναι το συνολικό καθαρό έσοδο των παρόχων, δηλαδή οι χρεώσεις εισαγωγής μείον οι πιστώσεις εξαγωγής αθροισμένες σε όλους τους παρόχους, διαιρεμένο με το πλήθος των πρακτόρων, όπως δίνει η σχέση (4.4), με R_b το καθαρό έσοδο του παρόχου b , B το σύνολο των παρόχων και N το πλήθος των πρακτόρων.

$$C_{\text{agent}} = \frac{\sum_{b \in B} R_b}{N} \quad (4.4)$$

Το δεύτερο, το μέσο κόστος ανά kWh, είναι το ίδιο συνολικό καθαρό έσοδο διαιρεμένο με τη συνολική καθαρή ενέργεια, δηλαδή εισαγωγές μείον εξαγωγές αθροισμένες σε όλους τους παρόχους, όπως δίνει η σχέση (4.5), με E_b την καθαρή ενέργεια του παρόχου b .

$$C_{\text{kWh}} = \frac{\sum_{b \in B} R_b}{\sum_{b \in B} E_b} \quad (4.5)$$

Ο κανόνας εμβέλειας εδώ είναι ρητός και προέκυψε ως διόρθωση: αριθμητής και παρονομαστής μοιράζονται μία και μόνη προσημασμένη ενεργειακή εμβέλεια. Το χωριστό μέγεθος της συσσωρευμένης εξυπηρετούμενης ενέργειας παραμένει μόνο για εισαγωγές και χωρίς πρόσημο, και χρησιμοποιείται αποκλειστικά στη μετρική 2, όπου το εξυπηρετούμενο φορτίο είναι πράγματι η σωστή, μη προσημασμένη έννοια.

Η μετρική 2, η κατανομή φορτίου, στηρίζεται στα μερίδια φορτίου των παρόχων. Το μερίδιο ενός παρόχου είναι η συσσωρευμένη ενέργεια που εξυπηρετήσε προς τη συνολική ενέργεια που εξυπηρετήθηκε από όλους. Ο δείκτης συγκέντρωσης φορτίου HHI είναι το άθροισμα των τετραγώνων αυτών των μεριδίων, όπως δίνει η σχέση (4.6) με S_b την εξυπηρετούμενη ενέργεια του παρόχου b και s_b το μερίδιό του. Χαμηλότερη τιμή σημαίνει ότι το φορτίο απλώνεται πιο ομοιόμορφα στους παρόχους. Η σάρωση ευαισθησίας καταγράφει επιπλέον τον συντελεστή Gini του διανύσματος των μεριδίων ως δευτερεύον μέτρο συγκέντρωσης.

$$HHI = \sum_{b \in B} s_b^2, \quad s_b = \frac{S_b}{\sum_{b' \in B} S_{b'}} \quad (4.6)$$

Η μετρική 3, η ευστάθεια δικτύου, είναι τρεις υπομετρικές μιας και μόνο σειράς: του ιστορικού $F = (F_1, \dots, F_T)$ της ωριαίας καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη, με T τον αριθμό των ωρών του ορίζοντα, $\mu(F)$ τον μέσο της και $\sigma(F)$ την τυπική της απόκλιση. Ο συντελεστής μεταβλητότητας δίνεται από τη σχέση (4.7), ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο από τη σχέση (4.8) και η μέση ωριαία μεταβολή από τη σχέση (4.9).

$$\text{CoV} = \frac{\sigma(F)}{\mu(F)} \quad (4.7)$$

$$\text{PAR} = \frac{\max_t F_t}{\mu(F)} \quad (4.8)$$

$$\text{Ramp} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=2}^T |F_t - F_{t-1}| \quad (4.9)$$

Δηλώνω εδώ μία φορά τη σύμβαση προσήμου, στην οποία παραπέμπω από το Κεφάλαιο 7: τόσο για τον συντελεστή μεταβλητότητας όσο και για τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, χαμηλότερη τιμή σημαίνει πιο σταθερός τροφοδότης, άρα αρνητική ποσοστιαία μεταβολή έναντι της βάσης αναφοράς είναι βελτίωση. Δύο διευκρινίσεις συνοδεύουν τον ορισμό. Πρώτον, η μετρική 3 δεν μετρά ευστάθεια συστήματος ισχύος. Είναι το στατιστικό σχήμα μιας υπολογισμένης σειράς καθαρής εισαγωγής τροφοδότη, δηλαδή αποτέλεσμα μετατόπισης φορτίου που οδηγείται από τιμολογιακό σήμα, και όχι αποτέλεσμα επίλυσης ροής φορτίου. Δεύτερον, οι δύο πρώτες υπομετρικές δεν είναι εναλλάξιμες: ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο εξαρτάται από μία και μόνη ώρα ολόκληρου του έτους, εκείνη του μεγίστου, ενώ ο συντελεστής μεταβλητότητας συνοψίζει τη διασπορά ολόκληρης της σειράς. Η διαφορά αυτή είναι το ένα από τα δύο σκέλη της ασυμμετρίας που εμφανίζεται ανάμεσα στα δύο μεγέθη στα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 7. Το δεύτερο, ο ρυθμός ενεργοποίησης της χρέωσης και η φραγμένη αποπληρωμή του αναβληθέντος όγκου, δίνεται εκεί, και ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν είναι απρόσβλητος από αυτήν.

Η μετρική 4, η αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών, είναι ο μέσος όρος, πάνω σε όλους τους παραγωγοκαταναλωτές, του λόγου αυτάρκειας του καθενός, δηλαδή του κλάσματος της ζήτησής του που καλύπτεται από τη δική του φωτοβολταϊκή παραγωγή και εκφόρτιση μπαταρίας αντί να εισαχθεί από πάροχο. Ο ανά πράκτορα τύπος βρίσκεται στη μέθοδο λόγου αυτάρκειας του παραγωγοκαταναλωτή και συγκεντρώνεται όπως δίνει η σχέση (4.10), με P το σύνολο των παραγωγοκαταναλωτών, G_i τη συνολική εισαγωγή του i από το δίκτυο και D_i τη συνολική του ζήτηση.

$$SSR = \frac{1}{|P|} \sum_{i \in P} \left(1 - \frac{G_i}{D_i}\right) \quad (4.10)$$

Μετρική	Μέγεθος	Κατεύθυνση
μετρική 1, μέσο κόστος	μέσο κόστος ανά πράκτορα	χαμηλότερο σημαίνει φθηνότερο για τους πράκτορες
μετρική 1, μέσο κόστος	μέσο κόστος ανά kWh, ενιαία προσημασμένη εμβέλεια	χαμηλότερο σημαίνει φθηνότερο ανά kWh
μετρική 2, κατανομή φορτίου	δείκτης συγκέντρωσης φορτίου HHI	χαμηλότερο σημαίνει πιο ομοιόμορφη κατανομή
μετρική 3, ευστάθεια δικτύου	συντελεστής μεταβλητότητας	χαμηλότερο σημαίνει πιο σταθερός τροφοδότης
μετρική 3, ευστάθεια δικτύου	λόγος αιχμής προς μέσο όρο	χαμηλότερο σημαίνει πιο σταθερός τροφοδότης
μετρική 3, ευστάθεια δικτύου	μέση ωριαία μεταβολή	τρίτη υπομετρική, χωρίς δηλωμένη κατεύθυνση στην πηγή
μετρική 4, αυτάρκεια	μέσος λόγος αυτάρκειας παραγωγοκαταναλωτών	υψηλότερο σημαίνει μεγαλύτερη αυτάρκεια

Πίνακας 4.3: Οι τέσσερις μετρικές της εργασίας και οι υπομετρικές τους.

4.9 Επίλογος

Το κεφάλαιο περιέγραψε το μοντέλο πάνω στο οποίο τρέχει κάθε πείραμα της εργασίας. Η αρχιτεκτονική είναι μια ευθεία ροή: η παραμετροποίηση και δύο ωριαίες σειρές δεδομένων μπαίνουν στο μοντέλο, ο ωριαίος βρόχος έξι σταδίων παράγει το ιστορικό καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη, ο αναγωγέας μετρικών το μετατρέπει σε τέσσερις μετρικές, και οι εκτελεστές σαρώσεων με τα σενάρια ανάλυσης το ανάγουν σε γραμμές αποτελεσμάτων. Τρία αρχέτυπα παρόχων ανταγωνίζονται με σταθερούς κανόνες τιμολόγησης, από τους οποίους μόνο ο μεταβλητός φέρει διαταραχή με βαριές ουρές, ενώ ο πράσινος έχει μεταβλητότητα ακριβώς μηδέν εκ κατασκευής. Ο πληθυσμός των 200 ετερογενών πρακτόρων αποφασίζει με αδράνεια και λεξικογραφικούς κανόνες, με μετρημένη συνέπεια, στον κανονικό σπόρο της προεπιλεγμένης διαμόρφωσης των τριών παρόχων, έναν ρυθμό αλλαγής παρόχου 0.0 τοις εκατό σε πλήρες έτος και δύο πραγματικές υποομάδες μεταξύ των πρακτόρων με προτίμηση στο πράσινο. Η ηλιακή είσοδος είναι πραγματική αλλά ένα και μόνο επαναλαμβανόμενο μετεωρολογικό έτος, ενώ η προεπιλεγμένη ζήτηση είναι αντιπροσωπευτικό συνθετικό προφίλ με μια μετρημένη εναλλακτική να παραδίδεται δίπλα της. Για τη μετρική 3, χαμηλότερη τιμή σημαίνει πιο σταθερός τροφοδότης. Πάνω σε αυτό ακριβώς το μοντέλο τοποθετείται ο μηχανισμός χωρητικότητας που περιγράφει το Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση: ο μηχανισμός χωρητικότητας και οι σχεδιαστικές αποφάσεις

5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει την υλοποίηση του μηχανισμού χωρητικότητας, δηλαδή της κοινής για τον τροφοδότη χρέωσης σπανιότητας που αποτελεί την κεντρική συνεισφορά της παρούσας εργασίας, μαζί με τις σχεδιαστικές αποφάσεις που την καθόρισαν. Παρουσιάζονται με τη σειρά: ο σκοπός και η εμβέλεια του μηχανισμού ως τιμολογιακού σήματος, η κατασκευή της χρέωσης από το κυλιόμενο παράθυρο έως το κατώφλι, την υπέρβαση και τη συνολική χρέωση, ο επιμερισμός της στους παρόχους, τα δύο ανεξάρτητα κανάλια ανάδρασης, οι τρεις τρόποι κατανομής της προσαύξησης και ο διαιρέτης που τους συνοδεύει, το φυσικό κανάλι της τιμοευαίσθητης αναβολής ζήτησης, οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις και ο λόγος για τον οποίο η κατασκευή απομονώνει τα κανάλια μεταξύ τους. Το κεφάλαιο κλείνει με το ιστορικό της σχεδίασης, δηλαδή τη μετάβαση από το αρχικό φυσικό κανάλι της απόφασης D6 στο κανάλι της απόφασης D7, και με δύο τεκμηριωμένα σφάλματα που εντοπίστηκαν κατά την ανάπτυξη και τις διορθώσεις τους. Ο ίδιος ο κώδικας δεν παρατίθεται μέσα στο κεφάλαιο αλλά στο Παράρτημα Γ, αυτούσιος από το αποθετήριο: ολόκληρο το άρθρωμα του μηχανισμού, ο ωριαίος βρόχος βήματος του μοντέλου και ο κανόνας απόκρισης του καταναλωτή.

5.2 Σκοπός και εμβέλεια του μηχανισμού

Ο μηχανισμός χωρητικότητας εισάγει μια χρέωση αιχμής και σπανιότητας πάνω από την αγορά παρόχων του Κεφαλαίου 4. Είναι ένα τιμολογιακό σήμα και όχι μοντέλο φυσικής του δικτύου: σε κανένα σημείο ο μηχανισμός, ούτε οποιοδήποτε άλλο τμήμα της προσομοίωσης, δεν υπολογίζει ροή ισχύος, τάση ή θερμικό όριο γραμμής. Η χρέωση δεν αναπαριστά φυσική χωρητικότητα δικτύου και δεν πρέπει να διαβαστεί έτσι.

Η είσοδος του μηχανισμού είναι ένα μόνο βαθμωτό μέγεθος ανά ώρα, η καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη, που έχει ήδη υπολογιστεί αλλού ως ζήτηση μείον φωτοβολταϊκή παραγωγή μείον εκφόρτιση μπαταρίας, συνοδευόμενη από την ανάλυση του ίδιου αυτού μεγέθους ανά πάροχο. Η έξοδος του είναι η χρέωση σε ευρώ, ο επιμερισμός ανά πάροχο σε ευρώ και η προσαύξηση ανά πάροχο σε ευρώ ανά kWh, μαζί με το κατώφλι και την υπέρβαση σε kWh και τους μετρητές ελέγχου του ρυθμού ενεργοποίησης. Καμία άλλη είσοδος δεν διαβάζεται. Η στενότητα αυτής της διεπαφής είναι σχεδιαστική επιλογή: όσο ο μηχανισμός βλέπει μόνο ένα βαθμωτό μέγεθος και την ανάλυσή του ανά πάροχο, κάθε ισχυρισμός για την επίδρασή του, μέσα στο πεδίο του ίδιου του μοντέλου, μπορεί να ελεγχθεί χωρίς να χρειάζεται να επαληθευτεί ταυτόχρονα και ένα μοντέλο δικτύου.

Ο μηχανισμός διέπεται από μια κύρια σημαία, ανενεργή στην προεπιλογή. Με τη σημαία απενεργοποιημένη το μοντέλο αναπαράγει ανά byte τη βάση αναφοράς χωρίς μηχανισμό χωρητικότητας, δηλαδή δεν υπολογίζεται καμία χρέωση. Ολόκληρος ο μηχανισμός, δηλαδή η χρέωση σπανιότητας, τα δύο κανάλια ανάδρασης και ο κανόνας αναβολής ζήτησης, στα αρθρώματα του μηχανισμού και του καταναλωτή, δεν αντλεί κανέναν τυχαίο αριθμό. Επομένως η ενεργοποίηση του μηχανισμού, ή η αλλαγή της κατάστασης οποιουδήποτε από τα δύο κανάλια ανάδρασης, δεν διαταράσσει ποτέ τη ροή τυχαίων αριθμών που καταναλώνεται αλλού στο μοντέλο, δηλαδή τις διαταραχές τιμών των παρόχων και τη δειγματοληψία του πληθυσμού. Και οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις μοιράζονται έτσι, για δεδομένο σπόρο τυχαιότητας, μία ταυτόσημη ακολουθία

κληρώσεων, και κάθε μετρημένη διαφορά ανάμεσά τους αποδίδεται στον μηχανισμό και όχι σε αποκλίνουσα τυχαιότητα.

5.3 Η χρέωση σπανιότητας

Σε κάθε ωριαίο βήμα t η καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη προστίθεται σε ένα κυλιόμενο παράθυρο W ωρών. Στην εργασία αυτή $W = 168$ ώρες, δηλαδή μία εβδομάδα, και η τιμή αυτή διατηρείται σταθερή σε κάθε πείραμα. Όσπου να γεμίσει το παράθυρο δεν μπορεί να επιβληθεί καμία χρέωση, οπότε οι πρώτες ώρες κάθε εκτέλεσης είναι εξ ορισμού ώρες χωρίς ενεργοποίηση και προσμετρώνται ως τέτοιες στον ρυθμό ενεργοποίησης. Μόλις γεμίσει, ο μηχανισμός υπολογίζει τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση πληθυσμού της καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη πάνω στο παράθυρο και θέτει το κατώφλι. Γράφοντας x_t για την καθαρή εισαγωγή στο βήμα t , μ_t για τον μέσο όρο και σ_t για την τυπική απόκλιση πληθυσμού των W τελευταίων δειγμάτων, και k για την παράμετρο κατωφλίου, η σχέση (5.1) δίνει το κατώφλι θ_t :

$$\theta_t = \mu_t + k \cdot \sigma_t \quad (5.1)$$

Η τυπική απόκλιση είναι πράγματι η τυπική απόκλιση πληθυσμού και όχι δείγματος: ο κώδικας υπολογίζει ρητά την τυπική απόκλιση πληθυσμού. Το παράθυρο που αποτιμάται είναι οι W τελευταίες ώρες που λήγουν στο τρέχον βήμα και το περιλαμβάνουν, επειδή το τρέχον δείγμα προστίθεται στο παράθυρο πριν υπολογιστεί το κατώφλι. Η υπέρβαση πάνω από το κατώφλι δίνεται από τη σχέση (5.2):

$$E_t = \max(0, x_t - \theta_t) \quad (5.2)$$

και η συνολική χρέωση σπανιότητας του βήματος από τη σχέση (5.3), όπου r είναι ο συντελεστής χρέωσης:

$$C_t = r \cdot E_t \quad (5.3)$$

Ο συντελεστής χρέωσης έχει τιμή 0.15 στην εργασία αυτή και διατηρείται σταθερός σε ολόκληρη τη σάρωση. Εκφράζεται σε ευρώ ανά kWh υπέρβασης και καθορίζει το μέγεθος της ίδιας της χρέωσης. Είναι διαφορετικό μέγεθος από τον συντελεστή μετακύλισης της Ενότητας 5.5, και τα δύο δεν πρέπει να συγχέονται. Αν η υπέρβαση είναι μηδενική, η συνολική χρέωση είναι μηδενική: κάτω από το κατώφλι δεν υπάρχει καμία προσθήκη. Η παράμετρος k είναι έτσι το μέγεθος που καθορίζει πόσο συχνά ενεργοποιείται ο μηχανισμός, και η σάρωσή της είναι ο τρόπος με τον οποίο η εργασία χαρτογραφεί την περιβάλλουσα λειτουργίας του αντί να επιδείξει ένα ευνοϊκό σημείο.

Επειδή το κατώφλι υπολογίζεται πάνω στο κυλιόμενο παράθυρο και όχι πάνω σε κάποιο σταθερό όριο ορισμένο εκ των προτέρων, ακολουθεί το ίδιο το πρόσφατο επίπεδο του τροφοδότη. Εκείνο που χρεώνεται δεν είναι επομένως ένα απόλυτο επίπεδο κατανάλωσης αλλά μια απόκλιση σε σχέση με την τελευταία εβδομάδα, μετρημένη σε μονάδες της τυπικής απόκλισης της ίδιας εκείνης εβδομάδας. Η μορφή αυτή σημαίνει ότι το επίπεδο αναφοράς επαναπροσδιορίζεται σε κάθε βήμα και ότι η ίδια τιμή του k αντιστοιχεί πάντοτε στην ίδια απόσταση από τον τρέχοντα μέσο όρο, μετρημένη σε τυπικές αποκλίσεις του τρέχοντος παραθύρου.

Η διαδρομή αυτή, από την προσθήκη του δείγματος στο παράθυρο έως τη συνολική χρέωση και το άθροισμα των θετικών συνεισφορών, υλοποιείται αυτούσια στο βήμα του μηχανισμού, στον κώδικα του αποθετηρίου που παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.

5.4 Επιμερισμός στους παρόχους

Η συνολική χρέωση επιμερίζεται στους παρόχους ανάλογα με τη συνεισφορά των δικών τους τρεχόντων πελατών στην καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη εκείνου του βήματος. Γράφοντας $c_{b,t}$ για τη

συνεισφορά του παρόχου b , δηλαδή για το προσημασμένο άθροισμα της καθαρής εισαγωγής των πελατών του στο βήμα t αποκομμένο στο μηδέν αν είναι αρνητικό, και S_t για το άθροισμα όλων των θετικών συνεισφορών, ο επιμερισμός δίνεται από τη σχέση (5.4):

$$A_{b,t} = C_t \cdot \frac{c_{b,t}}{S_t} \quad (5.4)$$

Η αποκοπή στο μηδέν σημαίνει ότι ένας πάροχος του οποίου οι πελάτες είχαν καθαρή εξαγωγή εκείνο το βήμα δεν συνεισφέρει τίποτε στη χρέωση. Ένας πάροχος του οποίου οι πελάτες οδήγησαν μεγαλύτερο μέρος της αιχμής του βήματος πληρώνει μεγαλύτερο μερίδιο της χρέωσης. Αν η συνολική χρέωση είναι μηδενική, ή αν κανένας πάροχος δεν έχει θετική συνεισφορά, ο επιμερισμός κάθε παρόχου είναι ακριβώς 0.0. Ο κανόνας αυτός είναι που δίνει στη χρέωση το νόημα ενός σήματος σπανιότητας: το κόστος της υπέρβασης βαρύνει εκείνον του οποίου η πελατεία δημιούργησε την υπέρβαση, και όχι τον τροφοδότη ως αδιαφοροποίητο σύνολο.

Στην κατασκευή αυτή στηρίζεται μια αναλλοίωτη ιδιότητα που χρησιμοποιούν τα επόμενα κεφάλαια: ο επιμερισμός παραμένει αυστηρά αναλογικός στο μερίδιο συνεισφοράς κάτω από κάθε ρύθμιση του κανόνα κατανομής της προσαύξησης και κάθε ρύθμιση του διαιρέτη προσαύξησης. Τα δύο αυτά κλειδιά, που περιγράφονται στην Ενότητα 5.6, μεταβάλλουν μόνο το κανάλι τιμολόγησης. Το λογιστικό σκέλος της χρέωσης, δηλαδή το ποιος χρεώνεται τι στο καθολικό του, δεν αλλάζει ποτέ.

Η διάκριση αυτή έχει σημασία για τον τρόπο με τον οποίο διαβάζονται τα σκέλη ελέγχου των Κεφαλαίων 6 και 7. Όταν ένα από τα δύο κλειδιά μεταβληθεί, ό,τι αλλάζει είναι αποκλειστικά η προσαύξηση που φτάνει στην προσφερόμενη τιμή του επόμενου βήματος, και επομένως το σήμα που βλέπει ο κανόνας αναβολής ζήτησης. Ο επιμερισμός της σχέσης (5.4), η συνολική χρέωση της σχέσης (5.3) και το κατώφλι της σχέσης (5.1) μένουν και τα τρία ακριβώς όπως ήταν, οπότε καμία σύγκριση ανάμεσα σε τρόπους ή σε τιμές του διαιρέτη δεν συγγέεται με μεταβολή του λογιστικού καναλιού.

5.5 Τα δύο κανάλια ανάδρασης

Ο επιμερισμός της Ενότητας 5.4 μπορεί να επιστρέψει στο μοντέλο μέσα από δύο κανάλια, καθένα από τα οποία ελέγχεται από μια χωριστή δυαδική σημαία που μπορεί να αλλάξει ανεξάρτητα από την άλλη. Η συνολική διαδρομή του σήματος, από την καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη έως την εξυπηρετούμενη ζήτηση και πίσω στον τροφοδότη, αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής (βλ. Σχήμα 5.1). Το διάγραμμα αυτό είναι σχεδιασμένο, αποτυπωμένο από τα αρθρώματα του μηχανισμού και του καταναλωτή της υλοποίησης, και όχι παραγόμενο από δεδομένα.

Το λογιστικό κανάλι χρεώνει το καθολικό του παρόχου b με τον επιμερισμό $A_{b,t}$. Πρόκειται για καθαρή λογιστική εγγραφή: μεταβάλλει το καταγεγραμμένο κέρδος ή ζημία του παρόχου και, κατάντη, το ελεγκτικό μέγεθος της συνολικής χρέωσης, αλλά δεν γράφει τίποτε σε καμία προσφερόμενη τιμή και δεν μπορεί, εξ κατασκευής, να μετακινήσει κανένα φυσικό μέγεθος ούτε τον λογαριασμό κανενός καταναλωτή.

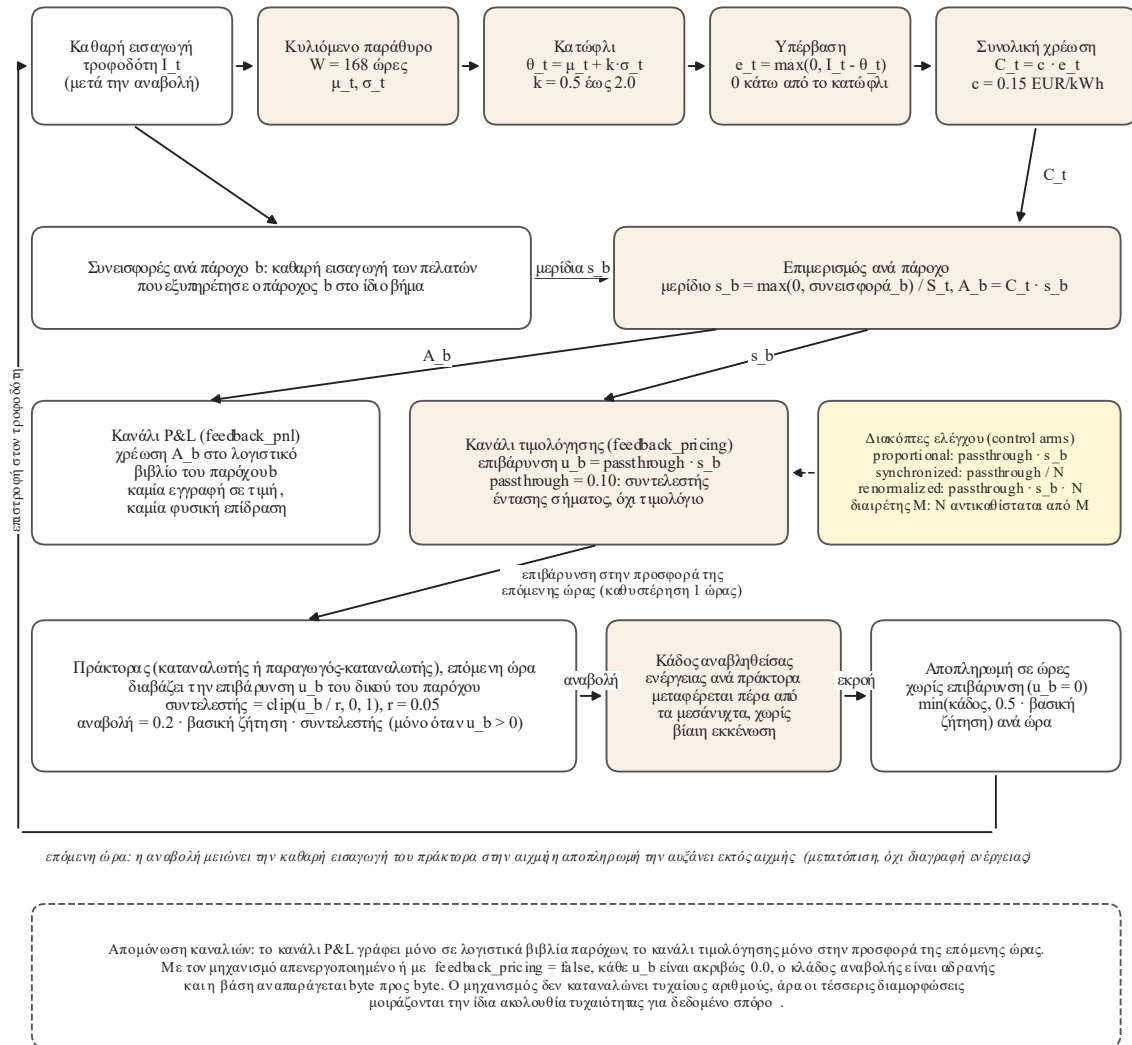
Το κανάλι τιμολόγησης μετατρέπει τον ίδιο επιμερισμό σε προσαύξηση ανά πάροχο, σε ευρώ ανά kWh, που προστίθεται στην προσφερόμενη τιμή του παρόχου b για το επόμενο βήμα. Με p τον συντελεστή μετακύλισης, η προσαύξηση κάτω από τον προεπιλεγμένο αναλογικό κανόνα δίνεται από τη σχέση (5.5):

$$s_{b,t} = p \cdot \frac{c_{b,t}}{s_t} \quad (5.5)$$

Η προσαύξηση προσγειώνεται στην προσφερόμενη τιμή του επόμενου βήματος, δηλαδή με υστέρηση ενός βήματος, και είναι η μοναδική διαδρομή μέσω της οποίας ο κανόνας απόκρισης ζήτησης οποιουδήποτε πράκτορα μπορεί να δει μη μηδενικό σήμα τιμής.

Ο συντελεστής μετακύλισης έχει τιμή 0.10 στην εργασία αυτή. Είναι συντελεστής ισχύος σήματος και όχι τιμολογιακός συντελεστής σε ευρώ ανά kWh. Διαστατικά ο συντελεστής όντως φέρει ευρώ ανά kWh, και αυτό το μισό της παρατήρησης γίνεται δεκτό χωρίς επιφύλαξη: ο κώδικας πολλαπλασιάζει έναν αδιάστατο αριθμό από 0 έως 1, το μερίδιο συνεισφοράς, ώστε να παραχθεί μια προσθήκη τιμής σε ευρώ ανά kWh, άρα ο πολλαπλασιαστής πρέπει να φέρει ο ίδιος αυτές τις μονάδες. Εκείνο που δεν είναι, είναι τιμολογιακός συντελεστής: δεν έχει βαθμονομηθεί έναντι καμίας τιμής εμπορεύματος ή τιμολογίου, επιλέχθηκε ως σταθερός δομικός συντελεστής που κρατήθηκε αμετάβλητος σε ολόκληρη τη σάρωση, και είναι εντελώς χωριστό μέγεθος από τον συντελεστή χρέωσης ανά kWh υπέρβασης. Κάτω από τον αναλογικό κανόνα και με περισσότερους από έναν παρόχους: κανείς δεν χρεώνεται ποτέ 0.10 ευρώ ανά kWh. Αυτή είναι η προσθήκη που θα αντιμετώπιζε ένας πάροχος ο οποίος θα κατείχε το 100 τοις εκατό της συνεισφοράς στην αιχμή εκείνης της ώρας, και τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα, οπότε κάθε πραγματικός πάροχος αντιμετωπίζει ένα κλάσμα της, καθορισμένο από το δικό του μερίδιο συνεισφοράς.

Επειδή η προσαύξηση είναι γραμμική στο μερίδιο συνεισφοράς, ισχύει ο ακόλουθος κανόνας, πάντοτε με τους δύο προσδιορισμούς του: κάτω από τον αναλογικό κανόνα που χρησιμοποιείται στη βασική διαμόρφωση, και σε μια ώρα κατά την οποία η χρέωση όντως ενεργοποιείται, ένας πάροχος με αυστηρά μεγαλύτερο μερίδιο συνεισφοράς λαμβάνει αυστηρά μεγαλύτερη προσαύξηση από έναν πάροχο με μικρότερο μερίδιο, οπότε η ετερογένεια μεταξύ παρόχων διατηρείται αντί να εξομαλυνθεί. Και οι δύο προσδιορισμοί είναι απαραίτητοι. Σε μια ώρα κατά την οποία η χρέωση δεν ενεργοποιείται, η προσαύξηση κάθε παρόχου είναι ακριβώς 0.0 και καμία αυστηρή ανισότητα δεν ισχύει. Ο συγχρονισμένος κανόνας που εισάγεται στην Ενότητα 5.6 δίνει σε κάθε πάροχο την ίδια ακριβώς προσαύξηση ανεξάρτητα από το μερίδιό του, πράγμα που είναι ακριβώς το ζητούμενο εκείνου του κανόνα.



Σχήμα 5.1: Η ροή σήματος του μηχανισμού χωρητικότητας.

5.6 Τρόποι κατανομής της προσαύξεσης και ο διαιρέτης

Δύο ακόμη κλειδιά της παραμετροποίησης του μηχανισμού υπάρχουν αποκλειστικά για τα σκέλη ελέγχου και αγγίζουν μόνο το κανάλι τιμολόγησης. Και τα δύο έχουν ως προεπιλογή τη συμπεριφορά που περιγράφηκε παραπάνω, δεν μεταβάλλονται πουθενά μέσα στην κύρια σάρωση των 1440 εκτελέσεων, και δεν επηρεάζουν καθόλου τους επιμερισμούς της Ενότητας 5.4, οι οποίοι παραμένουν ανστηρά αναλογικοί στο μερίδιο συνεισφοράς κάτω από κάθε ρύθμιση και των δύο. Ο Πίνακας 5.1 τα συνοψίζει.

Κλειδί	Τιμές	Προεπιλογή	Σκέλος που το χρησιμοποιεί
κανόνας κατανομής της προσαύξεσης	αναλογικός, συγχρονισμένος, επανακανονικοποιημένος	αναλογικός	Σκέλος ελέγχου κατανομής της προσαύξεσης D10 (Ενότητα 6.9)
διαιρέτης προσαύξεσης	ακέραιος τουλάχιστον 1, ή άδειος	άδειος	Σκέλος μονοπωλίου εξισωμένης δόσης D11 (Ενότητα 6.10)

Πίνακας 5.1: Τα δύο κλειδιά ελέγχου του μηχανισμού χωρητικότητας.

Ο κανόνας κατανομής της προσαύξεσης παίρνει μία από τρεις τιμές και αλλάζει μόνο τον τρόπο με τον οποίο η ίδια συνολική ισχύς σήματος απλώνεται στους παρόχους. Ο αναλογικός τρόπος είναι η προεπιλογή και ο κανόνας που περιγράφει η σχέση (5.5). Ο συγχρονισμένος τρόπος δίνει σε κάθε πάροχο την ποσότητα της σχέσης (5.6), όπου N είναι το πλήθος των παρόχων της εκτέλεσης, σε κάθε ώρα που επιβάλλει χρέωση και στην οποία τουλάχιστον ένας πάροχος έχει θετική συνεισφορά:

$$s_{b,t} = \frac{p}{N} \quad (5.6)$$

Την ίδια προσαύξεση λαμβάνουν και οι πάροχοι των οποίων η δική τους συνεισφορά είναι μηδενική ή αρνητική. Το άθροισμα στους παρόχους είναι τότε p , ακριβώς όσο διανέμει συνολικά ο αναλογικός κανόνας μέχρι τον θόρυβο κινητής υποδιαστολής που καταγράφεται παρακάτω, οπότε η συνολική ισχύς σήματος διατηρείται ενώ η μεταβλητότητα μεταξύ παρόχων αφαιρείται εντελώς. Ο επανακανονικοποιημένος τρόπος ορίζεται από τη σχέση (5.7):

$$s_{b,t} = p \cdot \frac{c_{b,t}}{s_t} \cdot N \quad (5.7)$$

και κρατά τον μη σταθμισμένο μέσο όρο των προσαυξήσεων στους παρόχους ίσο με p ανεξάρτητα από το N . Το δικό του άθροισμα στους παρόχους είναι επομένως p επί N , όχι p . Σε κάθε τρόπο, μια ώρα που δεν επιβάλλει χρέωση, ή στην οποία κανένας πάροχος δεν έχει θετική συνεισφορά, δίνει σε κάθε πάροχο προσαύξεση ακριβώς 0.0.

Ο διαιρέτης προσαύξεσης είναι ακέραιος τουλάχιστον ίσος με 1 ή μένει άδειος, και η προεπιλογή τον αφήνει άδειο. Όταν τεθεί σε τιμή M , αντικαθιστά ένα ενεργό πλήθος παρόχων στη θέση του πραγματικού, οπουδήποτε ο τύπος του καναλιού τιμολόγησης εξαρτάται από το N . Η σχέση (5.8) δίνει τις δύο περιπτώσεις που επηρεάζονται, με την πρώτη μορφή να αφορά τον αναλογικό τρόπο και τη δεύτερη τον συγχρονισμένο:

$$s_{b,t} = p \cdot \frac{c_{b,t}}{s_t} \cdot \frac{N}{M} \quad s_{b,t} = \frac{p}{M} \quad (5.8)$$

Ο επανακανονικοποιημένος τρόπος μένει ανέπαφος, επειδή το αντικατεστημένο πλήθος διαιρεί και πολλαπλασιάζει πίσω μέσα στην ίδια παράσταση και απαλείφεται ακριβώς, κάτι που δεν είναι παρά επαναδιατύπωση του σχεδιαστικού στόχου εκείνου του τρόπου, δηλαδή ενός μέσου όρου προσαύξεσης καθηλωμένου στο p όποιο και αν είναι το πλήθος των παρόχων.

Δύο σημειώσεις ακρίβειας καταγράφονται εδώ αντί να παρακαμφθούν. Πρώτον, η αντιστοιχία του συγχρονισμένου τρόπου με τον αναλογικό στο συνολικό άθροισμα είναι αναλυτική, όχι ακριβής σε επίπεδο bit κατά το πρότυπο IEEE 754: ένας τυχαιοποιημένος έλεγχος 3000 δοκιμών βρήκε τα δύο αθροίσματα να διαφέρουν σε 420 δοκιμές, με χειρότερη περίπτωση $5.55e-17$, δηλαδή περίπου δεκαπέντε τάξεις μεγέθους κάτω από τις ίδιες τις προσαυξήσεις, ποσότητα που δεν μπορεί να μετακινήσει καμία απόφαση αναβολής. Δεύτερον, και η αντιστοιχία του διαιρέτη είναι αναλυτική: στο σκέλος με έναν μόνο πάροχο, όπου το μερίδιο συνεισφοράς είναι 1, ο κώδικας υπολογίζει τον

συντελεστή μετακύλισης επί 1.0 επί (1/M) και όχι τον συντελεστή μετακύλισης διά M, και στην τιμή 0.10 που χρησιμοποιείται οι δύο αυτές εκφράσεις συμφωνούν ανά bit για M = 2 και M = 3 και διαφέρουν κατά μία μονάδα στο τελευταίο ψηφίο για M = 5, δηλαδή σχετικό κενό 1.7e-16.

Υπάρχει επίσης μια εγγύηση μη επίδρασης. Όταν ο διαιρέτης είναι null, ο κώδικας αποτιμά κατά γράμμα την προϋπάρχουσα παράσταση χωρίς καμία επιπλέον αριθμητική πράξη, αντί για εκείνη την παράσταση πολλαπλασιασμένη με ένα υπολογισμένο 1.0. Έτσι η απουσία του κλειδιού είναι αποδεδειγμένα ουδέτερη μέχρι το επίπεδο του bit, και κάθε υπάρχον αποτέλεσμα και κάθε καθήλωση χρυσού προτύπου μένει ανέπαφο από την ύπαρξή του.

Ο διαιρέτης δεν είναι εργαλείο πολιτικής, ούτε σχεδίαση τιμολογίου, ούτε κάτι που θα μπορούσε να εφαρμόσει ένας ρυθμιστής. Είναι τεχνητό μέσο ελέγχου, αποκλειστικά για τους σκοπούς της ανάλυσης, χωρίς ερμηνεία αγοράς: κάτω από τον κανόνα επιμερισμού που χρησιμοποιείται, ένας πάροχος δεν μπορεί να επιλέξει να λάβει p διά M , αφού τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα και το μερίδιο ενός μοναδικού παρόχου είναι πάντοτε 1 εξ κατασκευής. Ο μοναδικός του σκοπός είναι το σκέλος του μονοπωλίου εξισωμένης δόσης, το οποίο πρέπει να κρατήσει το πλήθος παρόχων στο 1 ενώ ρυθμίζει χωριστά τη δόση ανά πάροχο, κάτι που η βασική σχεδίαση δεν μπορεί να κάνει επειδή το πλήθος παρόχων μετακινεί ταυτόχρονα το πλήθος των παρόχων και την ισχύ σήματος ανά πάροχο.

5.7 Το φυσικό κανάλι: τιμοευαίσθητη αναβολή ζήτησης

Μια χρέωση ή μια προσαύξηση δεν μπορεί από μόνη της να μετακινήσει ένα φυσικό μέγεθος όπως ο συντελεστής μεταβλητότητας του τροφοδότη. Στο μοντέλο αυτό η ζήτηση των καταναλωτών είναι κατά τα άλλα ανελαστική ως προς την τιμή και η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι εξωγενής, οπότε ο μόνος τρόπος με τον οποίο ένα σήμα τιμής μπορεί να ψαλιδίσει την καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη είναι να αποκριθεί σε αυτό κάποια πραγματική συμπεριφορά πράκτορα. Η εργασία χρησιμοποιεί για τον σκοπό αυτό τιμοευαίσθητη, χωρίς πρόβλεψη και με διατήρηση ενέργειας ενδοημερήσια αναβολή ζήτησης, η οποία εφαρμόζεται κάτω από το κανάλι τιμολόγησης σε κάθε πράκτορα, καταναλωτή και παραγωγοκαταναλωτή, και όχι μόνο στη μειοψηφία των παραγωγοκαταναλωτών.

Κάθε πράκτορας διατηρεί μια δεξαμενή αναβεβλημένης ενέργειας, αρχικοποιημένη στο μηδέν. Κάθε ώρα διαβάζει την προσαύξηση του δικού του τρέχοντος παρόχου, δηλαδή την τιμή που μεταφέρθηκε από το προηγούμενο βήμα, η οποία είναι πανομοιότυπα μηδενική όποτε το κανάλι τιμολόγησης είναι ανενεργό. Αν η προσαύξηση s είναι θετική, ο πράκτορας υπολογίζει πρώτα έναν συντελεστή απόκρισης με αποκοπή στο διάστημα από 0 έως 1, σύμφωνα με τη σχέση (5.9), όπου ρ είναι η τιμή αναφοράς απόκρισης:

$$f = \min(\max(\frac{s}{\rho}, 0), 1) \quad (5.9)$$

Στη συνέχεια, με q τη βασική ζήτηση της ώρας και φ το αναβλητό κλάσμα, η σχέση (5.10) δίνει την αναβαλλόμενη ποσότητα d και την εξυπηρετούμενη ζήτηση y :

$$d = \varphi \cdot q \cdot f \quad y = q - d \quad (5.10)$$

και η ποσότητα d προστίθεται στη δεξαμενή. Αν η προσαύξηση είναι μηδενική και η δεξαμενή δεν είναι άδεια, ο πράκτορας αποπληρώνει αποθηκευμένη αναβολή με φραγμένο ρυθμό, σύμφωνα με τη σχέση (5.11), όπου B είναι το περιεχόμενο της δεξαμενής και γ το όριο αποπληρωμής:

$$u = \min(B, \gamma \cdot q) \quad y = q + u \quad (5.11)$$

Σε κάθε άλλη περίπτωση η εξυπηρετούμενη ζήτηση ισούται με τη βασική ζήτηση, αμετάβλητη. Οι τρεις συντελεστές, η τιμή αναφοράς απόκρισης με τιμή 0.05 ευρώ ανά kWh, το αναβλητό κλάσμα με τιμή

0.2 και το όριο αποπληρωμής με τιμή 0.5, είναι αντιπροσωπευτικοί δομικοί συντελεστές, τεκμηριωμένοι ως τέτοιοι, και διατηρούνται σταθεροί σε ολόκληρη την κύρια σάρωση. Το όριο αποπληρωμής φράσσει πόσο μέρος της βασικής ζήτησης μιας ώρας μπορεί να αποπληρωθεί μέσα σε μία ώρα. Ο κανόνας είναι χωρίς πρόβλεψη: αντιδρά αποκλειστικά στην τρέχουσα προσαύξηση και σε τίποτε άλλο, δεν διαβάζει μελλοντικές τιμές ούτε μελλοντική ζήτηση. Για έναν παραγωγοκαταναλωτή το βήμα της αναβολής εκτελείται πριν από την αμετάβλητη αντιδραστική διαχείριση φωτοβολταϊκών και μπαταρίας της απόφασης D3, ώστε η μπαταρία να βλέπει την ήδη αναβεβλημένη ή αποπληρωμένη ζήτηση και όχι την ακατέργαστη βασική ζήτηση.

Οι τρεις κλάδοι, της αναβολής, της αποπληρωμής και της αδράνειας, παρατίθενται αυτούσιοι στο Παράρτημα Γ.

Η δεξαμενή μεταφέρεται πέρα από το όριο της ημέρας και δεν εκκενώνεται ποτέ αναγκαστικά σε κάποια σταθερή ώρα του ρολογιού. Η διατήρηση της ενέργειας είναι επομένως ιδιότητα σε επίπεδο εκτέλεσης: η συνολική εξυπηρετούμενη ενέργεια ισούται με τη συνολική βασική ζήτηση μέχρι το υπόλοιπο που τυχόν βρίσκεται ακόμη στη δεξαμενή όταν τελειώνει η εκτέλεση. Δεν πρόκειται για ημερήσια διατήρηση ενέργειας, και αυτό είναι σκόπιμο. Η αναβολή μετατοπίζει φορτίο στον χρόνο, δεν το διαγράφει, και αυτό ακριβώς κρατά τη μετρική 1, το μέσο κόστος, και τη μετρική 4, την αυτάρκεια των παραγωγοκαταναλωτών, ειλικρινείς. Ο κανόνας δεν αντλεί κανέναν τυχαίο αριθμό και είναι αδρανής, δηλαδή η εξυπηρετούμενη ζήτηση ισούται με τη βασική κάθε ώρα, όποτε η προσαύξηση παραμένει πανομοιότυπα μηδενική για ολόκληρη την εκτέλεση, πράγμα που είναι ακριβώς η περίπτωση της βάσης αναφοράς και της διαμόρφωσης μόνο του λογιστικού καναλιού.

5.8 Οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις

Οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις προκύπτουν από τον συνδυασμό της κύριας σημαίας με τις δύο σημαίες ανάδρασης και υλοποιούνται ως τέσσερα αρχεία σεναρίου, καθένα από τα οποία επεκτείνει το παραδιδόμενο αρχείο διαμόρφωσης και υπερσχίζει μόνο των τριών αυτών σημαιών. Ο Πίνακας 5.2 τις συνοψίζει.

Διαμόρφωση	Μηχανισμός	Λογιστικό κανάλι	Κανάλι τιμολόγησης	Τι απομονώνει
βάση αναφοράς	ανενεργός	ανενεργό	ανενεργό	Τη βάση αναφοράς: δεν υπολογίζεται καμία χρέωση χωρητικότητας
μόνο λογιστικό κανάλι	ενεργός	ενεργό	ανενεργό	Μόνο τη λογιστική χρέωση: τα καθολικά χρεώνονται, καμία προσαύξηση δεν γράφεται σε προσφερόμενη τιμή, ο κανόνας αναβολής δεν ενεργοποιείται ποτέ
μόνο κανάλι τιμολόγησης	ενεργός	ανενεργό	ενεργό	Μόνο το σήμα τιμής: οι προσαυξήσεις γράφονται στις προσφερόμενες τιμές του επόμενου βήματος και οδηγούν την αναβολή, χωρίς χρέωση καθολικού
πλήρης μηχανισμός	ενεργός	ενεργό	ενεργό	Τη συνδυασμένη λειτουργία και των δύο καναλιών ταυτόχρονα

Πίνακας 5.2: Οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις και οι τρεις σημαίες τους.

Στη βάση αναφοράς η κύρια σημαία είναι ανενεργή και το μοντέλο αναπαράγει ακριβώς τη βάση αναφοράς. Στη διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού ο μηχανισμός λειτουργεί και τα καθολικά των παρόχων χρεώνονται σε κάθε βήμα που ενεργοποιείται η χρέωση, αλλά καμία προσαύξηση δεν γράφεται ποτέ σε προσφερόμενη τιμή, οπότε ο κανόνας αναβολής ζήτησης δεν βλέπει ποτέ μη μηδενική προσαύξηση και δεν ενεργοποιείται. Στη διαμόρφωση μόνο του καναλιού τιμολόγησης οι προσαυξήσεις γράφονται στις προσφερόμενες τιμές του επόμενου βήματος και οδηγούν την αναβολή ζήτησης, αλλά τα καθολικά των παρόχων δεν χρεώνονται ποτέ από την ίδια τη χρέωση σπανιότητας. Στον πλήρη μηχανισμό λειτουργούν και τα δύο κανάλια ταυτόχρονα.

5.9 Ιστορικό της σχεδίασης: από το D6 στο D7

Η αρχική σχεδίαση, η απόφαση D6, συνέδεε το κανάλι τιμολόγησης με μια απόκριση αποθήκευσης: ένας παραγωγοκαταναλωτής που αντιμετώπιζε θετική προσαύξηση χωρητικότητας στην τρέχουσα προσφερόμενη τιμή του παρόχου του αποδέσμευε το βραδινό απόθεμα της μπαταρίας του, δηλαδή το απόθεμα της απόφασης D3 που διαφορετικά θα κρατιόταν έως τη σταθερή βραδινή ώρα, ανάλογα με το μέγεθος της προσαύξησης και φραγμένα από την ενέργεια που πραγματικά υπήρχε στη μπαταρία.

Ο έλεγχος της Φάσης 4 επαλήθευσε ότι ο μηχανισμός εκείνος ήταν ορθός, ντετερμινιστικός, ουδέτερος ως προς τη ροή τυχαίων αριθμών, ότι διατηρούσε ανά byte τη βάση αναφοράς και ότι ήταν καθαρά αφαιρέσιμος. Στη συνέχεια απέδειξε ότι το φυσικό του κανάλι δεν μπορούσε να λειτουργήσει. Η αποδέσμευση του αποθέματος ενεργοποιείται μόνο πριν από τη σταθερή βραδινή ώρα αποθέματος, οπότε μια προσαύξηση σπανιότητας αποδέσμευε το βραδινό απόθεμα νωρίς το πρωί, ψαλίδιζε τη μικρότερη πρωινή μεταβολή και, εξαντλώντας τη μπαταρία, ανέβαζε ελαφρώς τη δεσμευτική βραδινή αιχμή. Επιπλέον, με φραγμένη αποθήκευση στο 20 τοις εκατό του πληθυσμού, ήδη δεσμευμένη για τη βραδινή αιχμή, ένα σήμα τιμής χωρίς πρόβλεψη δεν είχε περιθώριο να προσθέσει βραδινή χωρητικότητα. Η καθαρή επίδραση στη μετρική 3 ήταν αμελητέα και ανάμικτη ως προς το πρόσημο, ενίοτε δυσμενής.

Αυτό είναι εύρημα και όχι σφάλμα, και για τον λόγο αυτό καταγράφεται εδώ. Η υλοποίηση D6 έκανε ακριβώς ό,τι περιέγραφε η σχεδίασή της, και ο έλεγχος έδειξε ότι εκείνο που περιέγραφε η σχεδίαση δεν μπορούσε να παραγάγει το ζητούμενο αποτέλεσμα. Η απόφαση D7 αντικατέστησε την αποδέσμευση αποθέματος με την τιμοευαίσθητη αναβολή ζήτησης της Ενότητας 5.7, το καθιερωμένο κανάλι μέσω του οποίου μια τιμή σπανιότητας εξομαλύνει έναν τροφοδότη, και το οποίο εφαρμόζεται σε ολόκληρο τον πληθυσμό αντί μόνο στη μειοψηφία των παραγωγοκαταναλωτών που διαθέτουν μπαταρία. Οι μπαταρίες των παραγωγοκαταναλωτών επανήλθαν στην καθαρή διαχείριση D3 και η αντιπαραγωγική πρόωμη αποδέσμευση αφαιρέθηκε.

Η αλλαγή αυτή διέυρυνε ταυτόχρονα και το σύνολο των πρακτόρων που μπορούν να αποκριθούν. Στη σχεδίαση D6 μόνο οι παραγωγοκαταναλωτές διέθεταν τον μηχανισμό απόκρισης, δηλαδή το 20 τοις εκατό του πληθυσμού, και η απόκρισή τους ήταν φραγμένη από την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας τους και υπόκειτο σε υστέρηση ενός βήματος. Στη σχεδίαση D7 κάθε πράκτορας, καταναλωτής και παραγωγοκαταναλωτής, διαθέτει ένα αναβλητό κλάσμα της ωριαίας ζήτησής του, οπότε το φυσικό κανάλι παύει να εξαρτάται από τη διείσδυση των μπαταριών.

Η αντικατάσταση αφορά αποκλειστικά την επιλογή του φυσικού καναλιού μέσα στην D6. Η χρέωση σπανιότητας, ο επιμερισμός με βάση την αιχμή, η διπλή αφαιρέσιμη ανάδραση λογιστικού καναλιού και καναλιού τιμολόγησης, καθώς και ο κανόνας ότι ο συντελεστής μετακύλισης είναι συντελεστής ισχύος σήματος, παραμένουν όλα αμετάβλητα.

5.10 Δύο τεκμηριωμένα σφάλματα και οι διορθώσεις τους

Το πρώτο σφάλμα αφορούσε την αναγκαστική αποπληρωμή στην ώρα 23. Μια προηγούμενη εκδοχή του κανόνα αναβολής αποπλήρωνε αναγκαστικά κάθε υπόλοιπο της δεξαμενής στην ώρα 23 κάθε ημέρας, ώστε να εξασφαλίζεται ακριβής ημερήσια διατήρηση ενέργειας. Μια μεταγενέστερη επιθεώρηση διαπίστωσε ότι αυτό άδειαζε το υπόλοιπο ολόκληρης της αναβολής μιας βραδινής αιχμής μέσα σε μία και μόνη ώρα ώμου, κατασκευάζοντας μια τεχνητή αιχμή που γινόταν η ίδια η ολική αιχμή της εκτέλεσης και αντέστρεφε το πρόσημο του αποτελέσματος της μετρικής 3 για τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο. Η αφαίρεση της εκκένωσης σε σταθερή ώρα, ώστε η δεξαμενή να αδειάζει στην πραγματική νυχτερινή κοιλάδα περνώντας τα μεσάνυχτα, εξάλειψε το τεχνούργημα. Η διατήρηση της ενέργειας έγινε έτσι ιδιότητα σε επίπεδο εκτέλεσης, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 5.7. Το ελάττωμα αυτό αξίζει προσοχή επειδή δεν παρήγαγε καμία εμφανή αστοχία: ο κώδικας εκτελούνταν κανονικά, η ημερήσια διατήρηση ενέργειας ίσχυε ακριβώς όπως ζητούσε η προδιαγραφή, και το μόνο ορατό σύμπτωμα ήταν ένα αποτέλεσμα με αντίστροφο πρόσημο.

Το δεύτερο σφάλμα αφορούσε τη διατάραξη των διπλότυπων παρόχων στο σκέλος με πέντε παρόχους. Ο αρχικός μετασχηματισμός πολλαπλασίαζε τον σπόρο τυχαιότητας με 1000003 και έπαιρνε το υπόλοιπο του αποτελέσματος modulo 10000. Επειδή το 1000003 modulo 10000 ισούται με 3, η επίδραση του σπόρου κατέρρεε στο (σπόρος επί 3) modulo 10000, το οποίο για τους 30 διαδοχικούς σπόρους της σάρωσης κάλυπτε ζώνη μικρότερη από 1 τοις εκατό του επιδιωκόμενου εύρους από -3 έως +3 τοις εκατό και ήταν πάντοτε αρνητικό και για τα δύο διπλότυπα αρχέτυπα. Κάτω από τον ντετερμινιστικό κανόνα του μοντέλου, που επιλέγει τον φθηνότερο αποδεκτό πάροχο, το πάντοτε φθηνότερο διπλότυπο κατακτούσε ουσιαστικά ολόκληρη την πελατεία του αρχέτυπου του, οπότε το ονομαστικά πεντάδυμο σκέλος συμπεριφερόταν σαν αγορά τριών παρόχων με δύο μονίμως αδρανείς θέσεις διπλοτύπων. Ο αρχικός πράσινος πάροχος υψηλής χρέωσης είχε μηδενικό μερίδιο φορτίου σε 476 από τις 480 γραμμές του σκέλους.

Η διόρθωση αντικατέστησε τη διατάραξη με μια σταθερή ακέραια χιονοστιβάδα splitmix64 του ζεύγους σπόρου και άλατος. Δεν αντλεί καμία μη ελεγχόμενη τυχαιότητα και δεν αγγίζει ποτέ τη σπαρμένη ροή τυχαίων αριθμών του ίδιου του μοντέλου. Το σφάλμα περιοριζόταν στον κλάδο κατασκευής για το πλήθος παρόχων 5, και οι γραμμές με δύο και με τρεις παρόχους επαληθεύτηκαν ως ταυτόσημες ανά byte πριν και μετά τη διόρθωση, οπότε αναπαρήχθησαν μόνο οι 480 γραμμές του πεντάδυμου σκέλους. Η διόρθωση μετακίνησε τα συγκεντρωτικά μεγέθη ελάχιστα: ο μέσος δείκτης συγκέντρωσης φορτίου HHI του σκέλους πήγε από 0.3550 σε 0.3549 και το μέσο κόστος ανά πράκτορα από 611.67 σε 613.47 ευρώ ανά έτος.

Ούτε το ένα ούτε το άλλο εύρημα πρέπει να διαβαστεί ως εγγύηση. Πρόκειται για μία ανταγωνιστική επιθεώρηση πάνω σε ένα συστατικό, όχι για τυπική επαλήθευση ολόκληρου του κώδικα. Παρουσιάζονται εδώ ως τεκμήριο ότι η διαδικασία επιθεώρησης εντοπίζει πραγματικά ελαττώματα, όχι ως γενική διαβεβαίωση έναντι οποιουδήποτε άλλου μη ανακαλυφθέντος σφάλματος.

Στο ίδιο πνεύμα καταγράφεται και ο κανόνας μη ρύθμισης παραμέτρων, ο οποίος καθορίζει ποιοι συντελεστές είχαν καθηλωθεί πριν από ποια σάρωση. Στην κύρια σάρωση μεταβάλλονται μόνο το k , το πλήθος παρόχων και οι σημαίες των αφαιρετικών διαμορφώσεων. Κάθε δομικός συντελεστής του ίδιου του μηχανισμού, δηλαδή ο συντελεστής χρέωσης με τιμή 0.15, ο συντελεστής μετακύλισης με τιμή 0.10, η τιμή αναφοράς απόκρισης με τιμή 0.05, το αναβλητό κλάσμα με τιμή 0.2, το όριο αποπληρωμής με τιμή 0.5 και το παράθυρο των 168 ωρών, κρατείται σταθερός καθ' όλη τη διάρκειά της. Οι τρεις συντελεστές της αναβολής ζήτησης σαρώνονται χωριστά και αργότερα, αφού πρώτα υπήρξε το κύριο κελί αναφοράς πάνω στο οποίο μπορούσαν να σαρωθούν. Τα δύο κλειδιά ελέγχου του Πίνακα 5.1

προστέθηκαν επίσης αργότερα, με προεπιλογές που αναπαράγουν τη συμπεριφορά που είχε ήδη μετρηθεί, ώστε καμία υπάρχουσα μέτρηση να μην μετακινηθεί σιωπηλά από την προσθήκη τους.

5.11 Γιατί αυτή η κατασκευή απομονώνει τα κανάλια

Επειδή το λογιστικό κανάλι αγγίζει αποκλειστικά το καθολικό ενός παρόχου και το κανάλι τιμολόγησης αγγίζει αποκλειστικά την προσφερόμενη τιμή του επόμενου βήματος, δηλαδή τη μοναδική διαδρομή μέσω της οποίας ο κανόνας αναβολής ζήτησης μπορεί να δει μη μηδενική προσαύξηση, οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις σχηματίζουν έναν καθαρό σχεδιασμό δύο επί δύο με ξένους μεταξύ τους στόχους εγγραφής.

Οποιοδήποτε φυσικό μέγεθος ή μέγεθος κόστους διέφερε ανάμεσα στη διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού και τη βάση αναφοράς θα αποκάλυπτε διαρροή από το λογιστικό κανάλι προς τη φυσική συμπεριφορά ή προς τους λογαριασμούς των καταναλωτών, κάτι που η παραπάνω κατασκευή σχεδιάστηκε να αποτρέπει κρατώντας τους στόχους εγγραφής των δύο καναλιών ξένους μεταξύ τους. Αντίστροφα, οποιοδήποτε μέγεθος διαφέρει ανάμεσα στη διαμόρφωση μόνο του καναλιού τιμολόγησης και τη βάση αναφοράς αποδίδεται αποκλειστικά στο κανάλι τιμολόγησης και αναβολής. Η ίδια κατασκευή είναι που κάνει τη διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού σκέλος ελέγχου και όχι απλώς μια τέταρτη παραλλαγή: αν το λογιστικό κανάλι έγραφε οπουδήποτε αλλού εκτός από το καθολικό, η διαφορά θα εμφανιζόταν σε αυτή τη σύγκριση. Η απομόνωση δεν θεωρείται δεδομένη εδώ: το Κεφάλαιο 7 αναφέρει ότι διατηρείται μέχρι το επίπεδο θορύβου κινητής υποδιαστολής σε ολόκληρη τη σάρωση ευαισθησίας, και η μέτρηση παρατίθεται στην Ενότητα 7.2.

5.12 Επίλογος

Ο μηχανισμός χωρητικότητας που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό αποτελείται από μια χρέωση σπανιότητας πάνω σε κυλιόμενο παράθυρο 168 ωρών, με κατώφλι στον μέσο όρο συν k φορές την τυπική απόκλιση πληθυσμού και συντελεστή χρέωσης 0.15 ευρώ ανά kWh υπέρβασης, από έναν επιμερισμό αυστηρά αναλογικό στο μερίδιο θετικής συνεισφοράς κάθε παρόχου, και από δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμα κανάλια ανάδρασης, το λογιστικό κανάλι που χρεώνει μόνο καθολικά και το κανάλι τιμολόγησης που γράφει προσαύξηση στην προσφερόμενη τιμή του επόμενου βήματος με συντελεστή μετακύλισης 0.10. Δύο κλειδιά ελέγχου, ο τρόπος κατανομής της προσαύξησης, του οποίου οι δύο μη προεπιλεγμένες τιμές είναι αναλυτικά μέσα ελέγχου, και ο διαιρέτης, υπάρχουν για τα σκέλη ελέγχου και αγγίζουν μόνο το κανάλι τιμολόγησης, χωρίς ποτέ να μεταβάλλουν τον επιμερισμό. Το φυσικό κανάλι είναι ο κανόνας αναβολής ζήτησης, με συντελεστή απόκρισης υπό αποκοπή, δεξαμενή που μεταφέρεται πέρα από τα μεσάνυχτα και φραγμένη αποπληρωμή. Οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις προκύπτουν από τον συνδυασμό των τριών σημαιών και απομονώνουν το λογιστικό κανάλι από το κανάλι τιμολόγησης. Κατά την ανάπτυξη τεκμηριώθηκαν και διορθώθηκαν δύο ελαττώματα, η αναγκαστική αποπληρωμή στην ώρα 23 και η διατάραξη των διπλότυπων παρόχων στο πεντάδυμο σκέλος.

Κεφάλαιο 6ο: Πειραματική σχεδίαση και επικύρωση

6.1 Εισαγωγή

Ο μηχανισμός χωρητικότητας που περιγράφει το Κεφάλαιο 5 δεν επιδεικνύεται σε ένα ευνοϊκό σημείο λειτουργίας: χαρακτηρίζεται πάνω σε πλέγματα παραμέτρων, με έξι συμπληρωματικές σαρώσεις που εκτελέστηκαν διαδοχικά, καθώς κάθε επόμενο πέρασμα επιθεώρησης ζητούσε περισσότερα τεκμήρια. Οι έξι είναι η κύρια σάρωση ευαισθησίας, ένα συμπληρωματικό σκέλος μονοπωλίου με έναν πάροχο, μια σάρωση των δομικών συντελεστών της απόκρισης (D9), μια σύγκριση υπό μετρημένη ζήτηση (OPSD), ένα σκέλος ελέγχου για την κατανομή της προσαύξεσης (D10) και ένα σκέλος μονοπωλίου εξισωμένης δόσης (D11).

Το κεφάλαιο αυτό δίνει τη σχεδίαση των έξι σαρώσεων, τη στατιστική μεθοδολογία με την οποία διαβάζονται και τη σουίτα ελέγχων του ίδιου του λογισμικού ως τεκμήριο επικύρωσης. Δεν αναφέρει τα αποτελέσματα των σαρώσεων: αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7. Οι λίγες μετρημένες τιμές που εμφανίζονται εδώ είναι εκείνες που τεκμηριώνουν την ίδια τη σχεδίαση ή τη σουίτα ελέγχων: ο μετρημένος ρυθμός ενεργοποίησης που διορθώνει μια πρώιμη υπόθεση, το ενεργό πλήθος παρόχων στο σκέλος πλήθους παρόχων 5, η επαλήθευση της αναλλοιωσιμότητας και τα πλήθη των ελέγχων.

6.2 Επισκόπηση των έξι σαρώσεων

Η κύρια σάρωση ευαισθησίας των 1440 εκτελέσεων χαρακτηρίζει την περιβάλλουσα λειτουργίας ως προς το κατώφλι και τη δομή της αγοράς. Το συμπληρωματικό σκέλος μονοπωλίου των 480 εκτελέσεων απομονώνει την επίδραση του ίδιου του πλήθους παρόχων. Η σάρωση δομικών συντελεστών των 2880 γραμμών (1510 εκτελέσεις μοντέλου) ελέγχει τους τρεις συντελεστές της αναβολής ζήτησης που η κύρια σάρωση κρατούσε σταθερούς. Η σύγκριση μετρημένης ζήτησης των 120 εκτελέσεων ξανατρέχει το κύριο κελί της κύριας σάρωσης με μια πραγματική, μετρημένη σειρά ζήτησης στη θέση της συνθετικής. Το σκέλος ελέγχου κατανομής προσαύξεσης των 720 εκτελέσεων διαχωρίζει τον όγκο της αναβλημένης ενέργειας από τη διακύμανση του χρονισμού μεταξύ παρόχων. Το σκέλος μονοπωλίου εξισωμένης δόσης των 360 εκτελέσεων ρωτά αν η απουσία οφέλους στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο στο σκέλος του ενός παρόχου είναι ιδιότητα του μονοπωλίου ή της συγκεκριμένης, μη δοσομετρημένης ισχύος σήματος στην οποία έτυχε να τρέξει.

Σάρωση	Σκοπός	Γραμμές	Εκτελέσεις
Κύρια σάρωση ευαισθησίας	Ευαισθησία στο κατώφλι k και στη δομή της αγοράς	1440	1440
Σκέλος μονοπωλίου	Επίδραση του ίδιου του πλήθους παρόχων	480	480
Δομικοί συντελεστές (D9)	Επιρροή των τριών συντελεστών της αναβολής	2880	1510
Μετρημένη ζήτηση (OPSD)	Εξάρτηση από το συνθετικό προφίλ ζήτησης	120	120
Κατανομή προσαύξεσης (D10)	Χρονισμός έναντι όγκου αναβολής	720	720
Μονοπώλιο εξισωμένης δόσης (D11)	Μονοπώλιο στη δόση που δίνει αγορά M παρόχων	360	360
Σύνολο		6000	4630

Πίνακας 6.1: Οι έξι σαρώσεις της πειραματικής σχεδίασης.

Συνολικά οι έξι σαρώσεις (βλ. Πίνακας 6.1) δίνουν $1440 + 480 + 2880 + 120 + 720 + 360 = 6000$ αναλυόμενες γραμμές, από $1440 + 480 + 1510 + 120 + 720 + 360 = 4630$ εκτελέσεις μοντέλου. Τα δύο πλήθη διαφέρουν προς τις δύο κατευθύνσεις: 1400 από τις γραμμές της σάρωσης δομικών συντελεστών υλοποιούνται από την κανονική ανά σπόρο εκτέλεσή της αντί να εκτελεστούν απευθείας, ενώ οι 30 αυτές κανονικές εκτελέσεις εκτελούνται πράγματι και δεν συνεισφέρουν καμία δική τους αναλυόμενη γραμμή, οπότε το χάσμα είναι $1400 - 30 = 1370$. Η λογική της επαναχρησιμοποίησης και η εμπειρική της επαλήθευση περιγράφονται στην Ενότητα 6.7. Τα έξι αρχεία αποτελεσμάτων είναι δεσμευμένα στο αποθετήριο και οι εκτελεστές που τα παράγουν περιγράφονται στο Παράρτημα Δ. Την αλυσίδα από τις έξι σαρώσεις έως τα δεσμευμένα αρχεία αποτελεσμάτων και τα σχήματα του Κεφαλαίου 7 συνοψίζει σχηματικά το Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Η πειραματική αλυσίδα της εργασίας.

6.3 Η κύρια σάρωση ευαισθησίας

Το πλέγμα της κύριας σάρωσης είναι: κατώφλι k στο $\{0.5, 1.0, 1.5, 2.0\}$, πλήθος παρόχων στο $\{2, 3, 5\}$, και οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις (βάση αναφοράς, μόνο λογιστικό κανάλι, μόνο κανάλι τιμολόγησης, πλήρης μηχανισμός), με 30 σπόρους τυχαιότητας ανά διαμόρφωση. Το κυλιόμενο παράθυρο είναι σταθερό στις 168 ώρες και κάθε εκτέλεση καλύπτει τον πλήρη ορίζοντα του ενός έτους, δηλαδή 8760 ώρες. Σύνολο $4 (k) \times 3$ (πλήθος παρόχων) $\times 4$ (αφαιρετική διαμόρφωση) $\times 30$ (σπόροι) = 1440 εκτελέσεις. Κάθε εκτέλεση είναι πλήρως ντετερμινιστική δεδομένου του ζεύγους (διαμόρφωση, σπόρος), και καμία εκτέλεση δεν εξαρτάται από το αποτέλεσμα κάποιας άλλης, οπότε η σάρωση μπορεί να παραλληλοποιηθεί και να συνεχιστεί από σημείο ελέγχου, με τις ήδη ολοκληρωμένες εκτελέσεις να επαναχρησιμοποιούνται αντί να επαναληφθούν. Αυτό είναι επιχείρημα κατασκευής και όχι μέτρηση: καμία σάρωση δεν επανεκτελέστηκε από άκρο σε άκρο ώστε να συγκριθεί με μια συνεχισμένη (Παράρτημα Β).

Στη σάρωση αυτή μεταβάλλονται μόνο το k , το πλήθος παρόχων και οι σημαίες της αφαιρετικής διαμόρφωσης. Κάθε δομικός συντελεστής του ίδιου του μηχανισμού μένει καθηλωμένος στην τιμή που δίνει το Κεφάλαιο 5: συντελεστής χρέωσης 0.15, συντελεστής μετακύλισης 0.10, τιμή αναφοράς απόκρισης 0.05, αναβλητό κλάσμα 0.2, όριο αποπληρωμής 0.5 και παράθυρο 168 ώρες. Η επιλογή αυτή είναι μεθοδολογική και όχι πρακτική: το k ελέγχει άμεσα τον ρυθμό ενεργοποίησης, δηλαδή το κλάσμα

των ωρών στις οποίες το κυλιόμενο κατώφλι ξεπερνιέται και επιβάλλεται θετική χρέωση, οπότε η σάρωση του k χαρτογραφεί την περιβάλλουσα λειτουργίας του μηχανισμού αντί να αναζητά μια ευνοϊκή διαμόρφωση μέσα στους δικούς του συντελεστές. Οι τρεις συντελεστές της αναβολής ζήτησης σαρώνονται χωριστά και αργότερα (Ενότητα 6.7), αφού πρώτα υπάρξει το κύριο κελί ως προς το οποίο θα σαρωθούν.

Μια πρώιμη υπόθεση σχεδιασμού έλεγε ότι ο ρυθμός ενεργοποίησης στο $k = 1$ θα ήταν περίπου 3 έως 6 τοις εκατό. Η υπόθεση αυτή διορθώθηκε ρητά και δεν στηρίζει κανένα σημείο της εργασίας: η θεωρητική συχνότητα υπέρβασης ενός κατωφλίου «μέσος συν k τυπικές αποκλίσεις» πάνω σε κατά προσέγγιση κανονική κατανομή καθαρής εισαγωγής είναι περίπου 16 τοις εκατό στο $k = 1$, ενώ η μετρημένη τιμή στο κύριο κελί ($k = 1.0$, πλήθος παρόχων 3) είναι περίπου 20.3 τοις εκατό (Ενότητα 7.7). Η σάρωση αναφέρεται με τους πραγματικά μετρημένους ρυθμούς ενεργοποίησης.

6.4 Κατασκευή του πλήθους παρόχων και το εύρημα ονομαστικών έναντι ενεργών

Το πλήθος παρόχων 3 είναι η προεπιλεγμένη αγορά των τριών αρχετύπων του Κεφαλαίου 4. Το πλήθος παρόχων 2 αφαιρεί τον πράσινο υψηλής χρέωσης και αφήνει μόνο τη ρυθμιζόμενη επιχείρηση κοινής ωφέλειας και τον μεταβλητό χαμηλού κόστους: είναι η οριακή περίπτωση στην οποία κάθε πράκτορας με προτίμηση στο πράσινο αναγκάζεται να δεχθεί πάροχο εκτός της προτιμώμενης κατηγορίας του. Το πλήθος παρόχων 5 διπλασιάζει τον μεταβλητό και τον πράσινο, με μια ντετερμινιστική ως προς τον σπόρο διατάραξη παραμέτρων, ώστε τα δύο αντίγραφα ενός αρχετύπου να διαφέρουν ελαφρώς αντί να είναι πανομοιότυπα.

Η διατάραξη αυτή είχε αρχικά αριθμητικό σφάλμα, το οποίο εντοπίστηκε σε ανταγωνιστική επιθεώρηση, επαληθεύτηκε και διορθώθηκε. Το σφάλμα και η έκτασή του τεκμηριώνονται στην Ενότητα 5.10 και δεν επαναλαμβάνονται εδώ. Εκείνο που ανήκει στη σχεδίαση των πειραμάτων είναι η παρατήρηση μετά τη διόρθωση, η οποία αναφέρεται όπως παρατηρήθηκε και δεν ρυθμίστηκε: το σκέλος πλήθους παρόχων 5 τρέχει με 3 έως 4 ενεργούς παρόχους, δηλαδή παρόχους με θετικό μερίδιο φορτίου μέσα στο έτος, με μέσο όρο 3.625 και διάμεσο 4.

Ο λόγος είναι διαφορετικός για κάθε ζεύγος αντιγράφων. Τα δύο αντίγραφα του μεταβλητού συνυπάρχουν συχνά, επειδή η κυμαινόμενη τιμή του αρχετύπου δίνει σε καθένα περιόδους στις οποίες είναι το φθηνότερο, οπότε η πελατεία μοιράζεται μεταξύ τους μέσα στην εκτέλεση. Τα δύο αντίγραφα του πράσινου υψηλής χρέωσης είναι σχεδόν υποκατάστατα, με ίδια σταθερή πρασινότητα και σταθερή τιμή που διαφέρει μόνο κατά τη μικρή διατάραξη, οπότε μέσα σε μια εκτέλεση το φθηνότερο από τα δύο κερδίζει ολόκληρο το τμήμα με προτίμηση στο πράσινο και το άλλο μένει αδρανές, ενώ ποιο από τα δύο κερδίζει αλλάζει ανά σπόρο. Για τον λόγο αυτό, το σκέλος πλήθους παρόχων 5 αναφέρεται σε όλη την εργασία ως αγορά ονομαστικά πέντε και ενεργά τριών έως τεσσάρων παρόχων: η προσθήκη σχεδόν υποκατάστατων παρόχων δεν αυξάνει αναλογικά τον ενεργό ανταγωνισμό στο μοντέλο αυτό.

6.5 Τι καταγράφει κάθε εκτέλεση

Καθεμία από τις 1440 εκτελέσεις γράφει μία γραμμή. Η γραμμή περιέχει, πρώτον, τα κλειδιά της διαμόρφωσης (k , πλήθος παρόχων, αφαιρετική διαμόρφωση, σπόρος). Δεύτερον, τις τέσσερις μετρικές της εργασίας: μέσο κόστος ανά πράκτορα και ανά kWh, μερίδια φορτίου των παρόχων και δείκτη συγκέντρωσης φορτίου HHI, συντελεστή μεταβλητότητας, λόγο αιχμής προς μέσο όρο και μέση ωριαία μεταβολή του τροφοδότη, και λόγο αυτάρκειας των παραγωγοκαταναλωτών.

Τρίτον, μια ομάδα στηλών ελέγχου που δεν είναι μετρικές της εργασίας και δεν πρέπει να διαβάζονται ως τέτοιες: η συνολική χρέωση χωρητικότητας που επιβλήθηκε στη διάρκεια της εκτέλεσης, ο ρυθμός

ενεργοποίησης, η μέση προσαύξηση που εφαρμόστηκε πράγματι σε κάθε πάροχο, ο συντελεστής Gini του μεριδίου φορτίου, η συνολική αναβεβλημένη ενέργεια, το ονομαστικό πλήθος παρόχων της διαμόρφωσης και ο ετήσιος ρυθμός αλλαγής παρόχου. Ο ρυθμός ενεργοποίησης ειδικά αναφέρεται ανά διαμόρφωση ως διαγνωστικό της δραστηριότητας του μηχανισμού, όχι ως μετρική: καταγράφει πόσο συχνά ενεργοποιείται ο μηχανισμός, όχι πόσο καλά αποδίδει.

6.6 Στατιστική μεθοδολογία

Κάθε σύγκριση μιας αφαιρετικής διαμόρφωσης με τη βάση αναφοράς είναι κατά ζεύγη ανά σπόρο. Σε σταθερό κελί (k , πλήθος παρόχων) χρησιμοποιούνται οι ίδιοι 30 σπόροι και για τις τέσσερις διαμορφώσεις, οπότε μια διαφορά εντός του ίδιου σπόρου απομονώνει την επίδραση της διαμόρφωσης από τη διακύμανση μεταξύ σπόρων στη δειγματοληψία του πληθυσμού και στην ακολουθία διαταραχών του μεταβλητού παρόχου. Η ηλιακή σειρά και η σειρά ζήτησης δεν κληρώνονται ανά σπόρο: είναι οι ίδιες σε κάθε εκτέλεση. Η ζεύξη αυτή είναι και ο λόγος για τον οποίο 30 σπόροι δίνουν μεγάλα μεγέθη επίδρασης στις κατά ζεύγη συγκρίσεις: ο κοινός πληθυσμός και η κοινή ακολουθία διαταραχών απαλείφονται από τη σύγκριση, ενώ μια σύγκριση ανεξάρτητων δειγμάτων θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερο πλήθος για την ίδια ισχύ. Καμία τυπική ανάλυση ισχύος δεν εκτελέστηκε, και μια μη σημαντική κατά ζεύγη διαφορά σε 30 σπόρους δεν αποκλείει πραγματική διαφορά.

Τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95 τοις εκατό υπολογίζονται με την κατανομή t και 29 βαθμούς ελευθερίας (κρίσιμη τιμή κοντά στο 2.045), όχι με κανονική προσέγγιση, που είναι η σωστή επιλογή για δείγμα αυτού του μεγέθους. Τα μεγέθη επίδρασης αναφέρονται ως κατά ζεύγη Cohen's d_z , δηλαδή ως η μέση κατά ζεύγη διαφορά προς την τυπική απόκλιση των κατά ζεύγη διαφορών, μαζί με την τιμή p ενός κατά ζεύγη ελέγχου t .

Πάνω από τους επιμέρους ελέγχους εφαρμόζεται διόρθωση πολλαπλών συγκρίσεων. Πρωτεύουσα είναι η διόρθωση Holm-Bonferroni και δίπλα της αναφέρεται, ως δευτερεύουσα όψη, η διόρθωση Benjamini-Hochberg με έλεγχο του ρυθμού ψευδών ανακαλύψεων. Παράλληλα με κάθε διάστημα βασισμένο στην κατανομή t αναφέρεται και ένα κατά ζεύγη διάστημα bootstrap 95 τοις εκατό σε επίπεδο σπόρου, με 10000 αναδειγματοληψίες και γεννήτρια NumPy σπαρμένη στο 20260704. Η αναδειγματοληψία γίνεται στο επίπεδο των 30 κατά ζεύγη διαφορών ανά σπόρο και όχι στα δύο σκέλη ανεξάρτητα, γιατί η ανεξάρτητη αναδειγματοληψία των σκελών θα κατέστρεφε ακριβώς τη ζεύξη που δίνει στη σχεδίαση την ισχύ της.

Η οικογένεια ελέγχων ορίζεται εδώ ως σχεδιαστική απόφαση και όχι ως αποτέλεσμα. Πρωτεύουσα οικογένεια είναι οι 120 πραγματικοί, υπολογισμένοι κατά ζεύγη έλεγχοι t της κύριας σάρωσης: 2 αφαιρετικές διαμορφώσεις (μόνο κανάλι τιμολόγησης και πλήρης μηχανισμός, έναντι της βάσης αναφοράς) $\times$ 5 μετρικές $\times$ 4 τιμές $k \times 3$ πλήθη παρόχων. Εξαιρούνται οι 60 συγκρίσεις της διαμόρφωσης μόνο του λογιστικού καναλιού, επειδή είναι ντετερμινιστικές ταυτότητες που το μοντέλο εγγυάται εκ κατασκευής και όχι εκτιμώμενοι έλεγχοι υποθέσεων: η τιμή $p = 1.0$ που φέρουν είναι αναφερόμενη σύμβαση, όχι υπολογισμένο στατιστικό. Για δυνατότητα ελέγχου από τρίτους αναφέρεται και το εναλλακτικό μέγεθος οικογένειας 180, με τις ταυτότητες ενσωματωμένες, ενώ ένα δεσμευμένο εργαλείο ανάλυσης (Παράρτημα Δ) επαναεφαρμόζει και τις δύο διορθώσεις κάτω από επτά διαφορετικούς ορισμούς οικογένειας, ώστε η επιλογή της οικογένειας να μπορεί να ελεγχθεί αντί να γίνει δεκτή επί λέξει. Ποιες συγκρίσεις επιβιώνουν των διορθώσεων αναφέρεται στην Ενότητα 7.11.

6.7 Σάρωση δομικών συντελεστών (D9) και η επαλήθευση της αναλλοιωσιμότητας

Οι τρεις δομικοί συντελεστές που διέπουν την τιμοευαίσθητη αναβολή ζήτησης του D7, δηλαδή το αναβλητό κλάσμα, η τιμή αναφοράς απόκρισης και το όριο αποπληρωμής, κρατήθηκαν σταθεροί σε όλη την κύρια σάρωση. Αυτό είναι υπόθεση, όχι εύρημα, και η μετρική 3 είναι ο κεντρικός εμπειρικός ισχυρισμός της εργασίας διαμεσολαβημένος εξ ολοκλήρου από αυτούς τους τρεις αριθμούς, οπότε η επιρροή τους έπρεπε να μετρηθεί και όχι να δηλωθεί. Το D9 δεσμεύεται σε μια αποκλειστική παραγοντική σάρωση στο κύριο σημείο λειτουργίας: αναβλητό κλάσμα στο {0.05, 0.10, 0.20, 0.30}, τιμή αναφοράς απόκρισης στο {0.0125, 0.025, 0.10, 0.20}, όριο αποπληρωμής στο {0.25, 0.5, 1.0}, αφαιρετικές διαμορφώσεις μόνο βάση αναφοράς και πλήρης μηχανισμός, οι ίδιοι 30 σπόροι, δηλαδή $4 \times 4 \times 3 \times 2 \times 30 = 2880$ γραμμές.

Δύο σημεία της σχεδίασης χρειάζονται ακρίβεια. Πρώτον, η τιμή αναφοράς απόκρισης σαρώνεται σε λογαριθμικό χώρο, στην τιμή αποστολής επί {1/4, 1/2, 2, 4}, ώστε τα τέσσερα σημεία του πλέγματος να περικλείουν συμμετρικά την τιμή αποστολής σε λογαριθμικό χώρο χωρίς η ίδια η τιμή αποστολής να είναι ένα από τα τέσσερα. Αυτό ταιριάζει με τον τρόπο που ο συντελεστής εισέρχεται στο μοντέλο, ως παρονομαστής μιας αποκοπής, οπότε ίσοι λόγοι και όχι ίσες διαφορές παράγουν συγκρίσιμες μεταβολές στον κορεσμό της απόκρισης. Το κελί αποστολής ανακτάται ως άγκυρα από την υπάρχουσα κύρια σάρωση, η οποία περιέχει ήδη ακριβώς αυτό το κελί.

Δεύτερον, η επαναχρησιμοποίηση του σκέλους της βάσης αναφοράς. Με τη γενική σημαία κλειστή, κάθε προσαύξηση ανά πάροχο είναι ταυτοτικά μηδέν εκ κατασκευής, οπότε ο όρος αναβολής είναι ταυτοτικά μηδέν ανεξάρτητα από τους δύο πρώτους συντελεστές, η δεξαμενή αναβλημένης ενέργειας δεν γεμίζει ποτέ ώστε να ενεργοποιηθεί ο τρίτος, και κανένας από τους τρεις δεν τραβά τυχαίο αριθμό. Το σκέλος τρέχει επομένως μία φορά ανά σπόρο και επαναχρησιμοποιείται ως κατά ζεύγη βάση αναφοράς για κάθε κελί συντελεστών. Η αναλλοιωσιμότητα όμως δεν θεωρήθηκε δεδομένη: επαληθεύτηκε εμπειρικά με 40 πραγματικές εκτελέσεις (8 γωνίες του πλέγματος συντελεστών $\times$ 5 σπόροι), οι οποίες συγκρίθηκαν με την κανονική ανά σπόρο γραμμή και έδωσαν μέγιστη απόλυτη απόκλιση ακριβώς 0.0 και στις 13 συγκρινόμενες στήλες, καταγεγραμμένη σε δεσμευμένο αρχείο ελέγχου αναλλοιωσιμότητας (Παράρτημα Δ).

Αυτή είναι η πρώτη από τις δύο μορφές επικύρωσης που φέρει το κεφάλαιο: ένα επιχείρημα κατασκευής μετατρέπεται σε μέτρηση. Αν οποιαδήποτε από τις εκτελέσεις επαλήθευσης δεν αναπαρήγαγε την κανονική της γραμμή, η επαναχρησιμοποίηση θα εγκαταλειπόταν και θα εκτελούνταν ολόκληρο το σκέλος των 48 κελιών, και το ίδιο αυτό γεγονός θα αναφερόταν ως εύρημα. Η στατιστική μεταχείριση ακολουθεί την Ενότητα 6.6 και τα ευρήματα της σάρωσης αναφέρονται στην Ενότητα 7.12.

6.8 Σύγκριση μετρημένης ζήτησης (OPSD)

Κάθε αριθμός των υπόλοιπων πέντε σαρώσεων, και επομένως κάθε αριθμός που αναφέρει το Κεφάλαιο 7 εκτός της Ενότητας 7.13, υπολογίζεται πάνω στο συνθετικό προφίλ ζήτησης. Η σάρωση αυτή υπάρχει για να ελεγχθεί η εξάρτηση αυτή απευθείας αντί να μείνει ανέλεγκτη υπόθεση. Το πλέγμα είναι μόνο το κύριο κελί της κύριας σάρωσης: $k = 1.0$, πλήθος παρόχων 3, και οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις, οι ίδιοι 30 σπόροι, παράθυρο 168 ωρών και ορίζοντας 8760 ωρών, με την πηγή ζήτησης ρυθμισμένη στη μετρημένη σειρά OPSD αντί για τη συνθετική. Προκύπτουν $4 \times 30 = 120$ εκτελέσεις, οι οποίες ζευγαρώνονται σπόρο προς σπόρο με τις συνθετικές γραμμές του ίδιου κελιού που υπάρχουν ήδη στο αρχείο της κύριας σάρωσης.

Ο περιορισμός εμβέλειας είναι μέρος της σχεδίασης και δηλώνεται μαζί της: πρόκειται για έλεγχο ανθεκτικότητας ενός κελιού, όχι για επανεκτέλεση της σάρωσης. Απαντά αν το κύριο εύρημα της μετρικής 3 εξαρτάται ειδικά από το συνθετικό προφίλ ζήτησης. Το αν ο χαρακτηρισμός της περιβάλλουσας ως προς το k ή ως προς το πλήθος παρόχων θα φαινόταν διαφορετικός υπό μετρημένη ζήτηση σε κάθε άλλο σημείο του πλέγματος παραμένει ανέλεγκτο.

6.9 Σκέλος ελέγχου κατανομής προσαύξησης (D10)

Κάτω από τον παραδιδόμενο κανόνα επιμερισμού, το πλήθος παρόχων μετακινεί ταυτόχρονα δύο υποψήφιες εξηγήσεις της βαθμίδας του λόγου αιχμής προς μέσο όρο: τον αποσυγχρονισμένο χρονισμό της αναβολής μεταξύ παρόχων και μια απλή πτώση του όγκου αναβεβλημένης ενέργειας καθώς περισσότεροι πάροχοι μοιράζονται την ίδια συνολική χρέωση. Το D10 προσθέτει στον κανόνα κατανομής της προσαύξησης δύο τρόπους ελέγχου δίπλα στον παραδιδόμενο αναλογικό: ο συγχρονισμένος αφαιρεί εντελώς τη διακύμανση της προσαύξησης μεταξύ παρόχων ενώ διατηρεί την ίδια συνολική ισχύ σήματος, και ο επανακανονικοποιημένος κρατά σταθερή τη μέση ανά πάροχο προσαύξηση αφήνοντας τη διακύμανση να μεγαλώσει. Η ποσότητα που κρατά σταθερή ο επανακανονικοποιημένος είναι μέσος όρος πάνω στους παρόχους και όχι πάνω στους πράκτορες, και δηλώνεται έτσι.

Το πλέγμα είναι: k στο $\{0.5, 1.0\}$, πλήθος παρόχων στο $\{2, 3, 5\}$, αφαιρετικές διαμορφώσεις βάση αναφοράς και πλήρης μηχανισμός, και οι δύο νέοι τρόποι, 30 σπόροι, δηλαδή $2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 30 = 720$ γραμμές. Το αναλογικό σκέλος δεν ξανατρέχει: επαναχρησιμοποιείται, ώστε η σύγκριση να γίνεται με τις ίδιες ακριβώς γραμμές που αναφέρει ήδη η εργασία αλλού.

Η μεθοδολογική ουσία δεν είναι το πλέγμα αλλά ο κανόνας ανάγνωσης, ο οποίος καταγράφηκε προδηλωμένος, πριν από τις εκτελέσεις. Αν η βαθμίδα ως προς το πλήθος παρόχων επιμένει υπό τον συγχρονισμένο κανόνα, το κανάλι είναι ο όγκος αναβεβλημένης ενέργειας, γιατί ο συγχρονισμένος δεν αφήνει καμία διακύμανση μεταξύ παρόχων για να αποσυγχρονίσει οτιδήποτε. Αν εξασθενήσει ή εξαφανιστεί υπό τον συγχρονισμένο ενώ επιβιώνει υπό τον επανακανονικοποιημένο, το κανάλι είναι ο αποσυγχρονισμός. Οποιοδήποτε άλλο μοτίβο αναφέρεται όπως παρατηρήθηκε και ο ισχυρισμός του αποσυγχρονισμού υποβαθμίζεται αναλόγως.

6.10 Σκέλος μονοπωλίου εξισωμένης δόσης (D11)

Κάτω από τον παραδιδόμενο κανόνα, η προσαύξηση ενός παρόχου είναι ο συντελεστής μετακύλισης επί το μερίδιο συνεισφοράς του, και τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα. Το μερίδιο ενός μοναδικού παρόχου είναι πάντα 1, οπότε το σκέλος του ενός παρόχου έτρεξε αναγκαστικά σε πλήρη μετακύλιση, στη μεγαλύτερη δόση που μπορεί να δώσει ο μηχανισμός, και όχι στη μικρότερη δόση που δίνει μια αγορά πολλών παρόχων. Το D11 ρωτά αυτό που η παραδιδόμενη σχεδίαση δεν μπορεί να απαντήσει μόνη της, και εισάγει τον διαιρέτη προσαύξησης: όταν τεθεί σε ακέραιο M , το κανάλι τιμολόγησης αποτιμάται σαν το ενεργό πλήθος παρόχων να ήταν M , ενώ ο πληθυσμός των παρόχων μένει αμετάβλητος. Ο διαιρέτης είναι τεχνητό, αποκλειστικά αναλυτικό μέσο ελέγχου χωρίς ερμηνεία αγοράς, και κανένας ισχυρισμός δεν τον μεταχειρίζεται ως εργαλείο πολιτικής.

Το πλέγμα είναι: πλήθος παρόχων καθηλωμένο στο 1, διαιρέτης προσαύξησης στο $\{2, 3, 5\}$, k στο $\{0.5, 1.0\}$, αφαιρετικές διαμορφώσεις βάση αναφοράς και πλήρης μηχανισμός, κανόνας κατανομής καθηλωμένος στον αναλογικό, 30 σπόροι, δηλαδή $3 \times 2 \times 2 \times 30 = 360$ εκτελέσεις. Ο διαιρέτης 1 είναι το υπάρχον σκέλος μονοπωλίου και επαναχρησιμοποιείται, όπως επαναχρησιμοποιούνται και οι ανταγωνιστικοί συγκριτές, δηλαδή οι υπάρχουσες αναλογικές γραμμές για πλήθος παρόχων 2, 3 και 5.

Οι 180 γραμμές της βάσης αναφοράς όμως εκτελούνται αντί να επαναχρησιμοποιηθούν, ώστε η δικλείδα ασφαλείας να είναι μέτρηση και όχι μόνο επιχείρημα κατασκευής.

Ο κανόνας ανάγνωσης καθορίστηκε και εδώ εκ των προτέρων, πάνω σε ένα και μόνο ζευγάρι αντί για αναζήτηση μεταξύ διαιρετών: αν το μονοπώλιο στον διαιρέτη 3 ταιριάζει με το πλήθος παρόχων 3 στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο εντός της ζώνης θορύβου σε επίπεδο σπόρου και σε συγκρίσιμο πραγματοποιημένο όγκο αναβεβλημένης ενέργειας, τότε ο ανταγωνισμός είναι ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη για το αποτέλεσμα, και ο ισχυρισμός στενεύει ακριβώς σε αυτό. Οποιοδήποτε άλλο μοτίβο αναφέρεται όπως παρατηρήθηκε και ο ισχυρισμός υποβαθμίζεται αναλόγως.

6.11 Η σουίτα ελέγχων ως τεκμήριο επικύρωσης

Η δεύτερη μορφή επικύρωσης δεν αφορά τη σχεδίαση των πειραμάτων αλλά το ίδιο το λογισμικό που τα παράγει. Η σουίτα ελέγχων περνά με 461 επιτυχείς ελέγχους και 3 παραλειπόμενους. Οι 3 παραλειπόμενοι είναι οι εκτελέσεις στατιστικών τροφοδότη πλήρους ορίζοντα 8760 ωρών, που είναι κλειδωμένες πίσω από μια σημαία αργών ελέγχων λόγω κόστους χρόνου, και περνούν όταν η σημαία τεθεί.

Η επικύρωση εδώ σημαίνει τρία συγκλίνοντα είδη τεκμηρίων, τα οποία αναφέρονται χωριστά επειδή κανένα δεν υποκαθιστά τα άλλα δύο. Το πρώτο είναι η κάλυψη: μια γραμμή εκτελέστηκε κάτω από έλεγχο, πράγμα που δεν λέει τίποτα για το αν εκτελέστηκε σωστά. Το δεύτερο είναι ο έλεγχος μεταλλάξεων: ένα σκόπιμα εισαγόμενο σφάλμα σε καλυμμένη γραμμή εντοπίστηκε, πράγμα που είναι τεκμήριο ότι η αριθμητική της γραμμής είναι πράγματι δεσμευμένη από κάποιον έλεγχο. Το τρίτο είναι οι άμεσοι έλεγχοι από άκρο σε άκρο: συγκρίσεις ανά byte κατά την αναπαραγωγή των αρχείων αποτελεσμάτων, επανεκτελέσεις ντετερμινισμού με σταθερή διαμόρφωση και σπόρο, και εγκατάσταση από το μηδέν, που ρωτούν αν συμπεριφέρεται όπως τεκμηριώνεται ολόκληρος ο αγωγός και όχι μια μονάδα.

Τα τρία αυτά είδη δεν εφαρμόζονται παντού με την ίδια ένταση. Στοχεύουν την επιφάνεια που φέρει ισχυρισμούς, δηλαδή το σύνολο των αρχείων και των συγκεκριμένων περιοχών γραμμών που επιτρέπεται να αλλάξουν έναν αριθμό ο οποίος καταλήγει στο κείμενο της εργασίας, σε ένα αρχείο αποτελεσμάτων ή σε ένα σχήμα. Τα αρχεία χρυσού προτύπου και τα παράγωγα αρχεία ανάλυσης είναι δεσμευμένα στο αποθετήριο ως καθηλώσεις παλινδρόμησης, οπότε μια αναπαραγωγή της ανάλυσης πάνω στα ίδια αρχεία σάρωσης που θα μετακινούσε έναν αριθμό αποτυγχάνει σε έλεγχο αντί να αντικαταστήσει σιωπηλά τον αριθμό. Τα ίδια τα αρχεία των σαρώσεων είναι δεσμευμένα και κατακερματισμένα στο μανιφέστο, αλλά η αναπαραγωγή τους από νέα εκτέλεση σάρωσης παραμένει ανεπαλήθευτη (Παράρτημα Β). Τα πλήθη της κάλυψης και των μεταλλάξεων, μαζί με τους επιζώντες που τεκμηριώθηκαν αντί να εξουδετερωθούν, δίνονται στο Παράρτημα Β.

6.12 Επίλογος

Η σχεδίαση των πειραμάτων στηρίζεται σε έξι σαρώσεις που δίνουν 6000 αναλυόμενες γραμμές από 4630 εκτελέσεις μοντέλου, με τη διαφορά των δύο πληθών να εξηγείται πλήρως από την επαναχρησιμοποίηση του αναλλοίωτου σκέλους της βάσης αναφοράς στη σάρωση δομικών συντελεστών. Η κύρια σάρωση μεταβάλλει μόνο το κατώφλι, το πλήθος παρόχων και τις σημαίες των καναλιών, κρατώντας κάθε δομικό συντελεστή καθηλωμένο, ώστε να χαρτογραφεί περιβάλλουσα λειτουργίας αντί να αναζητά ευνοϊκό σημείο. Οι συγκρίσεις είναι κατά ζεύγη ανά σπόρο, με διαστήματα εμπιστοσύνης βασισμένα στην κατανομή t και σε bootstrap, μεγέθη επίδρασης d_z , και τη διόρθωση Holm-Bonferroni ως πρωτεύουσα πάνω σε ρητά δηλωμένα οικογένεια ελέγχων. Δύο σκέλη ελέγχου, το

D10 και το D11, φέρουν κανόνες ανάγνωσης που καθορίστηκαν πριν εκτελεστούν, και μία σχεδιαστική συντόμευση, η επαναχρησιμοποίηση του αναλλοίωτου σκέλους, μετατράπηκε σε μέτρηση αντί να μείνει επιχείρημα. Πάνω από όλα αυτά, μια σουίτα ελέγχων δεσμεύει την αριθμητική που φέρει τους ισχυρισμούς. Τα αποτελέσματα των έξι σαρώσεων αναφέρονται στο Κεφάλαιο 7.

Κεφάλαιο 7ο: Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση

7.1 Εισαγωγή

Όλα τα μεγέθη του κεφαλαίου αυτού προέρχονται από τη σάρωση ευαισθησίας των 1440 εκτελέσεων, όπως αποτυπώνεται στα δύο δεσμευμένα συνοπτικά αρχεία της ανάλυσης (Παράρτημα Δ), με 30 σπόρους τυχειότητας ανά διαμόρφωση και συγκρίσεις κατά ζεύγη ανά σπόρο, εκτός όπου δηλώνεται διαφορετικά. Η σύμβαση προσήμου για τη μετρική 3 είναι σταθερή σε ολόκληρο το κεφάλαιο: αρνητική ποσοστιαία μεταβολή έναντι της βάσης αναφοράς σημαίνει βελτιωμένη ευστάθεια, δηλαδή χαμηλότερο συντελεστή μεταβλητότητας ή χαμηλότερο λόγο αιχμής προς μέσο όρο.

Πέντε μεταγενέστερες προσθήκες συμπληρώνουν την κύρια σάρωση και αναφέρονται καθεμία στη δική της ενότητα: το συμπληρωματικό σκέλος μονοπωλίου των 480 εκτελέσεων (Ενότητα 7.9), το σκέλος ελέγχου κατανομής της προσάυξης των 720 γραμμών (Ενότητα 7.10), η σάρωση των δομικών συντελεστών με 2880 γραμμές (Ενότητα 7.12), ο έλεγχος των 120 εκτελέσεων με μετρημένη ζήτηση OPSD (Ενότητα 7.13) και το σκέλος ελέγχου μονοπωλίου εξισωμένης δόσης των 360 εκτελέσεων (Ενότητα 7.14). Οι αριθμοί παρατίθενται στρογγυλοποιημένοι, και όπου η στρογγυλοποίηση θα έκρυβε το επιχείρημα δίνεται και η αστρογγυλοποιητή τιμή.

7.2 Καθαρή απομόνωση των καναλιών

Η διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού ταυτίζεται με τη βάση αναφοράς σε κάθε φυσική μετρική (μετρικές 2, 3 και 4) και στο κόστος του καταναλωτή (μετρική 1) μέχρι τον θόρυβο κινητής υποδιαστολής: η μέγιστη απόλυτη κατά ζεύγη διαφορά είναι περίπου 4.4×10^{-16} στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, περίπου 5.6×10^{-17} στον δείκτη συγκέντρωσης φορτίου HHI και ακριβώς 0 στον συντελεστή μεταβλητότητας, στην αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών και στο κόστος. Το διαγνωστικό φυσικής διαρροής του λογιστικού καναλιού είναι αρνητικό σε κάθε κελί όπου έχει εφαρμογή, στις 52 από τις 65 γραμμές του αντίστοιχου μπλοκ ελέγχου του δεσμευμένου αρχείου μεγεθών επίδρασης (12 κελιά k επί πλήθος παρόχων στις φυσικές μετρικές, συν τις γραμμές γενικών συνόλων), ενώ οι υπόλοιπες 13 γραμμές κόστους σημειώνονται ως μη εφαρμόσιμες, αφού το κόστος είναι εκτός του πεδίου της διάγνωσης διαρροής.

Το λογιστικό κανάλι χρεώνει πάντως τα καθολικά των παρόχων: η μέση συνολική χρέωση χωρητικότητας υπό τη διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού είναι περίπου 5972 EUR ανά εκτέλεση, μη μηδενικό και ελέγξιμο μέγεθος που όμως δεν μετακινεί καμία φυσική μετρική και δεν αλλάζει τον λογαριασμό κανενός καταναλωτή. Το κέρδος του παρόχου δεν ανήκει στις τέσσερις μετρικές της εργασίας: η συνολική χρέωση χωρητικότητας είναι η στήλη ελέγχου που τεκμηριώνει ότι το κανάλι είναι ενεργό.

Οι διαμορφώσεις μόνο του καναλιού τιμολόγησης και του πλήρους μηχανισμού είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους ανά byte και στις πέντε μετρικές, με μέγιστη απόλυτη διαφορά 0.0. Αυτό δεν είναι δήλωση στατιστικής μη διακρισιμότητας, είναι ταυτότητα: όταν το κανάλι τιμολόγησης λειτουργεί ήδη, η λογιστική χρέωση δεν προσθέτει καμία φυσική επίδραση. Η αφαιρετική μελέτη των δύο καναλιών απομονώνει επομένως καθαρά, ως μέτρηση σε κάθε κελί του πλέγματος: μόνο το κανάλι τιμολόγησης μπορεί να μετακινήσει τη μετρική 3.

7.3 Μετρική 3: ευστάθεια του τροφοδότη

Η μετρική 3 είναι το κύριο αποτέλεσμα της εργασίας. Από τις τρεις υπομετρικές της (Ενότητα 4.8) εξετάζονται εδώ οι δύο πρώτες, οι οποίες με δηλωμένη κατεύθυνση βελτίωσης, και δεν δίνουν την ίδια απάντηση σε όλο το εύρος του k . Ο Πίνακας 7.1 δίνει τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο και ο Πίνακας 7.2 τον συντελεστή μεταβλητότητας, ως κατά ζεύγη μέση ποσοστιαία μεταβολή του καναλιού τιμολόγησης έναντι της απενεργοποιημένης βάσης αναφοράς. Στον Πίνακα 7.1 η παρένθεση κάθε κελιού δίνει το πλήθος των 30 σπόρων που βελτιώθηκαν.

Πλήθος παρόχων	$k = 0.5$	$k = 1.0$	$k = 1.5$	$k = 2.0$
2	-5.2% (24/30)	-5.5% (29/30)	+2.2% (2/30)	+14.0% (0/30)
3	-9.5% (30/30)	-9.8% (30/30)	-6.3% (30/30)	+9.5% (0/30)
5	-10.0% (30/30)	-10.0% (30/30)	-6.8% (30/30)	+9.3% (0/30)

Πίνακας 7.1: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο: ποσοστιαία μεταβολή ανά k και πλήθος παρόχων.

Πλήθος παρόχων	$k = 0.5$	$k = 1.0$	$k = 1.5$	$k = 2.0$
2	-16.5%	-7.4%	-1.3%	-0.2%
3	-14.8%	-7.2%	-1.9%	-0.4%
5	-14.6%	-7.1%	-1.9%	-0.4%

Πίνακας 7.2: Συντελεστής μεταβλητότητας: ποσοστιαία μεταβολή ανά k και πλήθος παρόχων.

Στο κελί $k = 1.0$ και πλήθος παρόχων 3, το προεπιλεγμένο της σάρωσης, τα κατά ζεύγη μεγέθη επίδρασης είναι μεγάλα: για τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο Cohen's $d_z = -5.58$ ($p = 1.3e-23$) και για τον συντελεστή μεταβλητότητας $d_z = -22.2$ ($p = 7.4e-41$). Και τα δύο είναι βελτιώσεις υπό τη σύμβαση προσήμου της Ενότητας 7.1.

Οι δύο υπομετρικές αποκλίνουν στα υψηλά k , και η αναφορά μόνο της μίας θα παρουσίαζε τον μηχανισμό λανθασμένα. Ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται σε κάθε k και δεν αντιστρέφει ποτέ πρόσημο, ενώ η βελτίωση συρρικνώνεται μονότονα καθώς το k ανεβαίνει, από περίπου -15 έως -16 τοις εκατό στο $k = 0.5$ σε κάτω από -1 τοις εκατό στο $k = 2.0$, και στα τρία πλήθη παρόχων. Ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο βελτιώνεται στα χαμηλά και μεσαία k και έπειτα αντιστρέφεται σε μετρημένη επιδείνωση, σε k που εξαρτάται από το πλήθος παρόχων: με 3 και με 5 παρόχους βελτιώνεται ακόμη και στο $k = 1.5$ και αντιστρέφεται μόνο στο $k = 2.0$, ενώ με 2 παρόχους αντιστρέφεται νωρίτερα, κατά +2.2 τοις εκατό ήδη στο $k = 1.5$.

Ο μηχανισμός της αντιστροφής φαίνεται στον ρυθμό ενεργοποίησης και στην αναβεβλημένη ενέργεια. Στα υψηλά k το κυλίομενο κατώφλι σπάνια ξεπερνιέται (περίπου 2.3 τοις εκατό των ωρών στο $k = 2.0$ με 3 παρόχους, έναντι περίπου 20.3 τοις εκατό στο $k = 1.0$), οπότε αναβάλλεται ελάχιστη ζήτηση (περίπου 5700 kWh για όλο το έτος στο $k = 2.0$ έναντι περίπου 58600 kWh στο $k = 0.5$). Ο μικρός αυτός όγκος αποπληρώνεται πάντως με τον φραγμένο ρυθμό αποπληρωμής μόλις η προσαύξηση πέσει ξανά στο μηδέν, και η αποπληρωμή σπρώχνει το μοναδικό ετήσιο μέγιστο προς τα πάνω περισσότερο από όσο το έκοψε το αραιό γεγονός αναβολής. Η ενέργεια διατηρείται: η αναβολή μετατοπίζει φορτίο στον χρόνο, δεν το διαγράφει.

Τα δύο μεγέθη είναι διαφορετικού είδους στατιστικά, και εκεί βρίσκεται η εξήγηση της απόκλισης. Ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο είναι στατιστικό ενός μοναδικού ετήσιου μεγίστου, το μέγιστο της σειράς εισαγωγής του τροφοδότη 8760 ωρών διά τον μέσο όρο της, οπότε η τιμή του εξαρτάται από ό,τι συμβαίνει σε μία και μόνη ώρα του έτους. Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι το κατανομικό

συνοδευτικό μέγεθος: συνοψίζει τη διασπορά ολόκληρης της σειράς και όχι μιας ώρας της, και γι' αυτό είναι ο πιο ανθεκτικός από τους δύο και βελτιώνεται σε κάθε k που δοκιμάστηκε χωρίς να αντιστρέφει ποτέ πρόσημο. Ο μηχανισμός εξομαλύνει επομένως ανθεκτικά τη συνολική κατανομή του φορτίου του τροφοδότη σε ολόκληρη τη δοκιμασμένη περιβάλλουσα, ενώ η αντιστροφή στα υψηλά k περιορίζεται στη μοναδική ώρα της ετήσιας αιχμής.

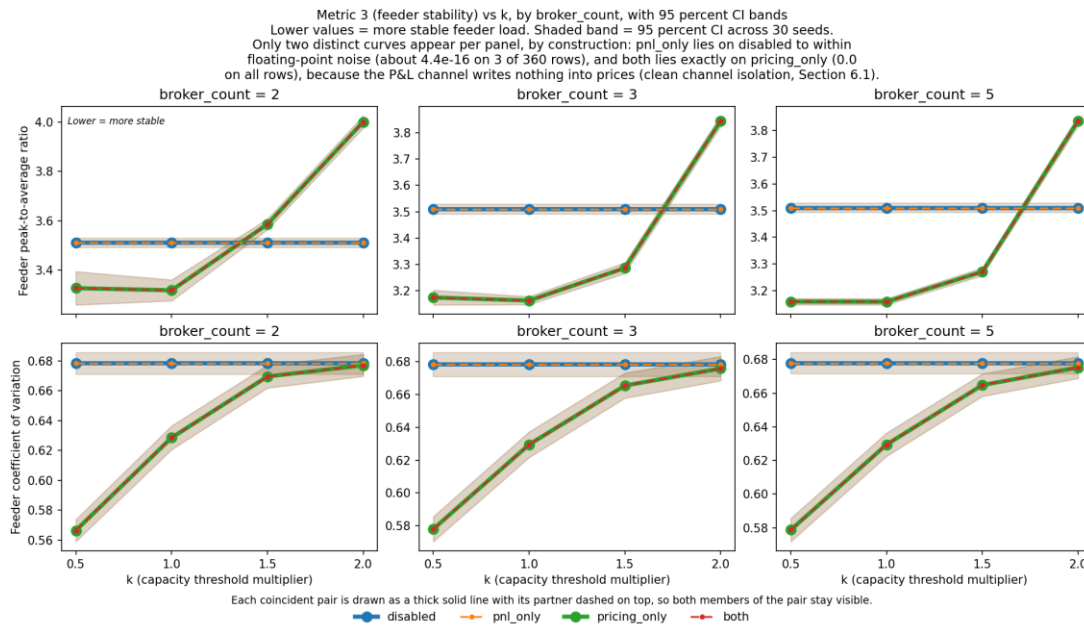
Η πρακτική ανάγνωση είναι μια περιβάλλουσα λειτουργίας για τη μείωση της αιχμής: περίπου $k = 0.5$ έως 1.5 για πλήθος παρόχων 3 ή 5, και στενότερη, περίπου $k = 0.5$ έως 1.0 , για πλήθος παρόχων 2. Η περιβάλλουσα αυτή αναφέρεται όπως παρατηρήθηκε στο πλέγμα, δεν επιλέχθηκε ούτε ρυθμίστηκε ώστε να προκύψει σε συγκεκριμένη τιμή.

Το κέρδος στον συντελεστή μεταβλητότητας είναι ουσιαστικά αναλλοίωτο ως προς το πλήθος παρόχων, και η αναλλοιωσιμότητα αυτή είναι κρίσιμη για την απόδοση του αποτελέσματος σε αιτία. Στο $k = 1.0$ η βελτίωση είναι -7.4 τοις εκατό με 2 παρόχους, -7.2 με 3 και -7.1 με 5 (αστρογυλοποίηση, -7.35 , -7.22 και -7.15), δηλαδή διασπορά μόλις 0.21 ποσοστιαίων μονάδων για περισσότερο από διπλασιασμό του πλήθους των ανταγωνιζόμενων παρόχων. Η κύρια ορατή επίδραση του πλήθους παρόχων δεν είναι το μέγεθος αυτού του κέρδους αλλά το πού πέφτει η άκρη της περιβάλλουσας του λόγου αιχμής προς μέσο όρο. Η Ενότητα 7.9 επιβεβαιώνει την ανάγνωση αυτή απευθείας με ένα συμπληρωματικό σκέλος μονοπωλίου ενός παρόχου σε πλήρη μετακύλιση, και η αναλλοιωσιμότητα στηρίζεται σε εκείνη τη μία σύγκριση, του ενός παρόχου έναντι των 2, 3 και 5, και όχι σε ό,τι ακολουθεί. Το σκέλος εξισωμένης δόσης της Ενότητας 7.14 μεταβάλλει τη δόση και όχι το πλήθος παρόχων στον ίδιο μοναδικό πάροχο: στον διαιρέτη 3 ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται κατά 13.84 τοις εκατό στο $k = 0.5$ και κατά 6.58 στο $k = 1.0$, και στον διαιρέτη 5 κατά 9.02 και 4.37 . Τα νούμερα αυτά δείχνουν εξάρτηση από τη δόση αντί να επεκτείνουν την αναλλοιωσιμότητα αυτή, αφού το 9.02 τοις εκατό του διαιρέτη 5 απέχει 5.6 ποσοστιαίες μονάδες από το 14.64 τοις εκατό του ίδιου του πλήθους παρόχων 5 στο $k = 0.5$.

Η συνιστώσα του λόγου αιχμής προς μέσο όρο συμπεριφέρεται διαφορετικά στην ισχύ σήματος που έτρεξε πράγματι εκείνο το σκέλος: με πλήρη μετακύλιση το μερίδιο ενός μοναδικού παρόχου είναι 1 εξ ορισμού, οπότε το κέρδος απουσιάζει υπό μονοπώλιο και μεγαλώνει με το πλήθος παρόχων (Ενότητα 7.9). Ο έλεγχος εξισωμένης δόσης (Ενότητα 7.14) δείχνει ότι πρόκειται για σύγκυση με την ισχύ σήματος και όχι με τον ίδιο τον ανταγωνισμό: ένας μονοπωλητής δοσομετρημένος στην ανά πάροχο ισχύ σήματος που παραδίδει μια αγορά τριών παρόχων αναπαράγει το αποτέλεσμα εκείνης της αγοράς εντός της ζώνης θορύβου σε επίπεδο σπόρου και με συγκρίσιμο πραγματοποιημένο αναβεβλημένο όγκο, οπότε ο ανταγωνισμός είναι ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη για το κέρδος αυτό, σε αυτόν τον σχεδιασμό και σε αυτούς τους συντελεστές. Η διατύπωση της συνεισφοράς έχει επομένως τρία μέρη: ο μηχανισμός εξομαλύνει από μόνος του τη συνολική μεταβλητότητα του φορτίου του τροφοδότη· ο επιμερισμός της χρέωσης σε ανταγωνιζόμενους παρόχους μειώνει την προσάυξηση, και τον αναβεβλημένο όγκο, που αντιμετωπίζουν οι πελάτες κάθε παρόχου, και αυτό είναι που περικόπτει την ταυτόχρονη αιχμή, με μικρότερη επιβάρυνση κόστους από ένα μονοπώλιο χωρίς δοσομέτρηση· και η δόση αυτή παραδίδεται από τον ανταγωνισμό δομικά, μέσω ενός κανόνα επιμερισμού του οποίου τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα, όχι επειδή ο ανταγωνισμός συντονίζει την αναβολή.

Η διαφορετική συμπεριφορά των δύο υπομετρικών φαίνεται απευθείας στο Σχήμα 7.1, όπου οι καμπύλες της βάσης αναφοράς και της διαμόρφωσης μόνο του λογιστικού καναλιού επικαλύπτονται εξ ορισμού, που είναι η οπτική απόδειξη της απομόνωσης της Ενότητας 7.2. Η ίδια συνιστώσα φέρει δύο ακόμη εξαρτήσεις πέρα από την περιβάλλουσα του k : είναι γνήσια εύθραυστη στους τρεις δομικούς συντελεστές της απόκρισης αναβολής ζήτησης, ενώ ο συντελεστής μεταβλητότητας παραμένει ανθεκτικός στο ίδιο πλέγμα (Ενότητα 7.12), και επιβιώνει σε πραγματική, μετρημένη σειρά ζήτησης

(Ενότητα 7.13). Και οι 72 συγκρίσεις αναφοράς του κεφαλαίου επιβιώνουν και των δύο διορθώσεων πολλαπλών συγκρίσεων (Ενότητα 7.11).



Σχήμα 7.1: Συντελεστής μεταβλητότητας και λόγος αιχμής προς μέσο όρο ως προς το k.

7.4 Μετρική 1: μέσο κόστος ανά πράκτορα

Το κανάλι τιμολόγησης αυξάνει το μέσο κόστος ανά πράκτορα σε κάθε κελί του πλέγματος, και η αύξηση συρρικνώνεται καθώς το k ανεβαίνει (Πίνακας 7.3, και οι τέσσερις διαμορφώσεις στο Σχήμα 7.2).

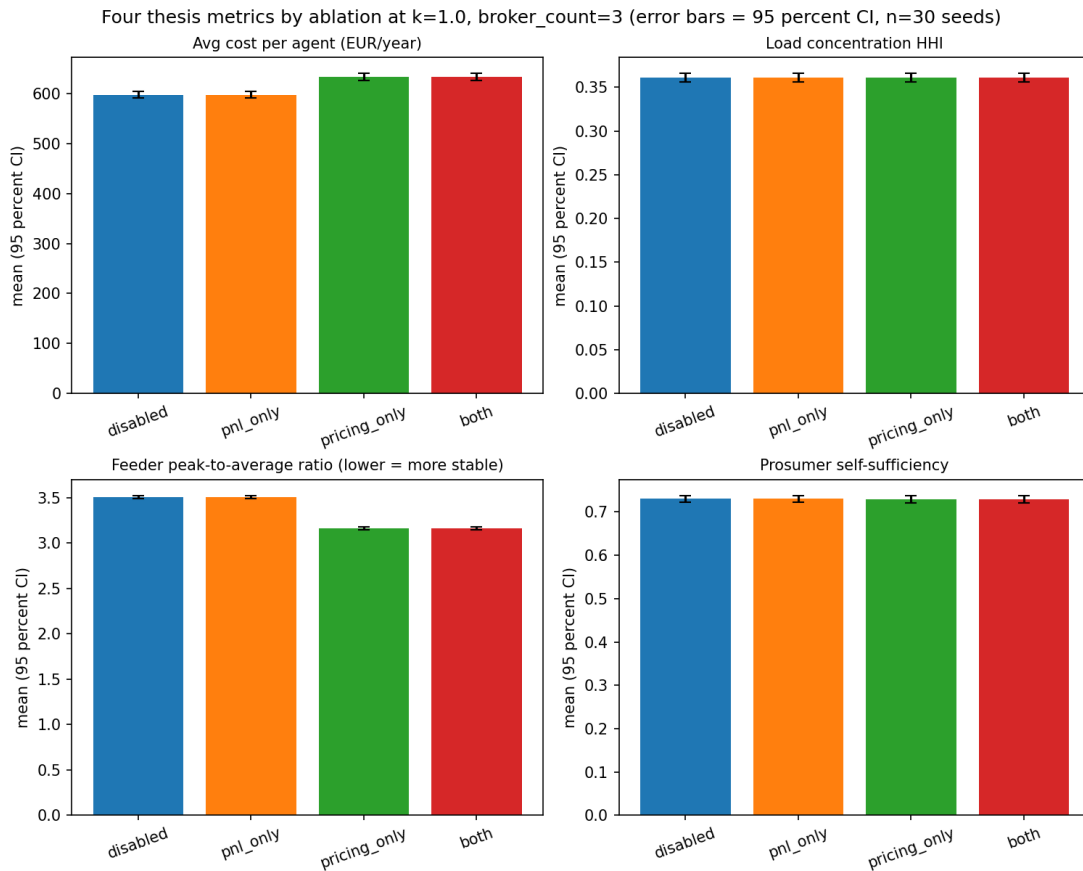
Πλήθος παρόχων	k = 0.5	k = 1.0	k = 1.5	k = 2.0
2	+13.8%	+9.0%	+4.4%	+1.5%
3	+8.8%	+6.0%	+2.9%	+0.9%
5	+8.6%	+5.9%	+2.9%	+0.9%

Πίνακας 7.3: Μέσο κόστος ανά πράκτορα: ποσοστιαία μεταβολή ανά k και πλήθος παρόχων.

Στο k = 1.0 με 3 παρόχους το μέσο κόστος ανά πράκτορα ανεβαίνει από 598.25 σε 633.93 EUR ανά έτος, δηλαδή +6.0 τοις εκατό ($d_z = 31.6$, $p = 2.8e-45$). Η επιβάρυνση κόστους συρρικνώνεται με το k και ακολουθεί τον ρυθμό ενεργοποίησης: περισσότερες ώρες ενεργοποίησης σημαίνουν περισσότερη προσαύξηση μετακυλισμένη στις προσφερόμενες τιμές και, μετά την αφαίρεση της αναβολής, πληρωμένη από τον πληθυσμό. Το λογιστικό κανάλι από μόνο του δεν αλλάζει καθόλου το κόστος του καταναλωτή (Ενότητα 7.2): ολόκληρη η επίδραση στο κόστος προέρχεται από το κανάλι τιμολόγησης και την αναβολή. Το απόλυτο μέσο κόστος ανά πράκτορα σε ολόκληρο το πλέγμα κυμαίνεται από περίπου 500 έως περίπου 686 EUR ανά έτος.

Η επίδραση στο κόστος και η επίδραση στην ευστάθεια κινούνται ως ζεύγος. Το ίδιο κελί k = 1.0 και 3 παρόχων που παράγει την αύξηση κόστους +6.0 τοις εκατό παράγει και τη βελτίωση -7.2 τοις εκατό στον συντελεστή μεταβλητότητας και -9.8 τοις εκατό στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, ενώ και τα δύο συρρικνώνονται μαζί καθώς το k ανεβαίνει: το κόστος πέφτει στο +0.9 τοις εκατό στο k = 2.0, σημείο στο οποίο το όφελος στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο έχει ήδη αντιστραφεί. Πρόκειται για ανταλλαγή κόστους έναντι ευστάθειας και όχι για δωρεάν βελτίωση, με τις μετρικές 2 και 4 να μένουν σχεδόν

ανεπηρέαστες (Ενότητα 7.5). Το αν η ανταλλαγή αξίζει είναι ρυθμιστική ή καταναλωτική κρίση πολιτικής, εκτός του πεδίου της προσομοίωσης: η εργασία αναφέρει το μέγεθός της όπως τη μετρήσε, όχι ως σύσταση. Το αποτέλεσμα επιβιώνει της διόρθωσης πολλαπλών συγκρίσεων σε κάθε k και πλήθος παρόχων (Ενότητα 7.11).



Σχήμα 7.2: Σύγκριση των τεσσάρων αφαιρετικών διαμορφώσεων στις μετρικές αναφοράς.

7.5 Μετρικές 2 και 4: σχεδόν αμετάβλητες

Ο δείκτης συγκέντρωσης φορτίου HHI είναι σχεδόν ανεπηρέαστος από τον μηχανισμό: η μεγαλύτερη κατά ζεύγη μεταβολή σε ολόκληρο το πλέγμα είναι -0.35 τοις εκατό. Διαφέρει κυρίως ανά πλήθος παρόχων, 0.521 με 2 παρόχους, 0.361 με 3 και 0.355 με 5, συνέπεια του πόσοι πάροχοι υπάρχουν και, με 5 παρόχους, του πόσοι είναι πραγματικά ενεργοί. Καμία τιμή δεν βρίσκεται στο θεωρητικό της κατώτατο όριο $1/n$ (0.500, 0.333, 0.200): το χάσμα είναι μεγαλύτερο με 5 παρόχους, όπου δύο σχεδόν υποκατάστατοι διπλότυποι αφήνουν την αγορά να λειτουργεί πλησιέστερα σε τρεις ή τέσσερις ενεργούς ανταγωνιστές, οπότε το πλήθος 5 βρίσκεται 0.1548 πάνω από το όριο του έναντι μόλις 0.0276 στο πλήθος 3.

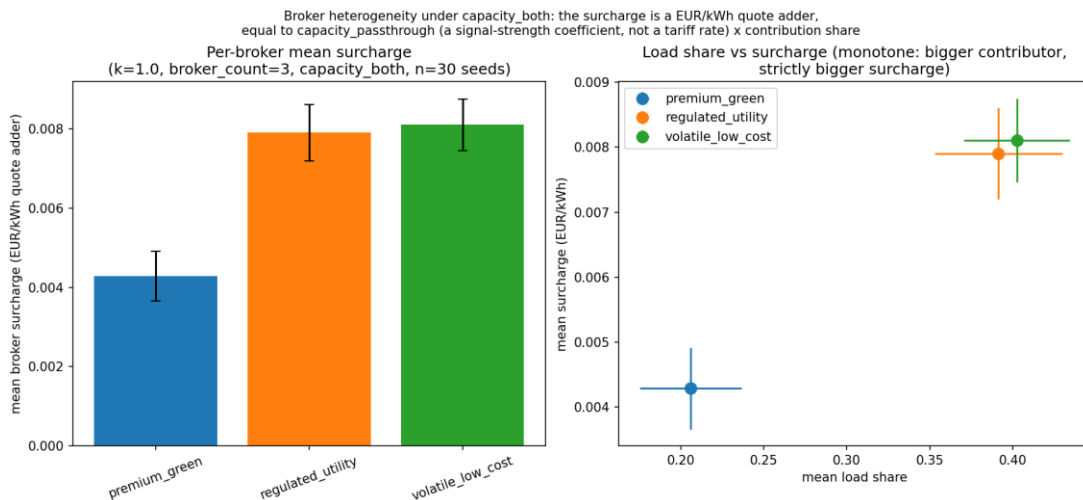
Η αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών είναι επίσης σχεδόν ανεπηρέαστη: η μεγαλύτερη κατά ζεύγη μεταβολή στο πλέγμα είναι -0.374 τοις εκατό, ενώ η ίδια η αυτάρκεια κυμαίνεται από περίπου 0.685 έως 0.779. Ο μηχανισμός αναβάλλει το πότε εξυπηρετείται η ζήτηση, αλλά δεν αλλάζει ουσιαστικά πόσο από τη ζήτηση ενός παραγωγοκαταναλωτή καλύπτουν τα δικά του φωτοβολταϊκά και η μπαταρία του.

Η διόρθωση πολλαπλών συγκρίσεων (Ενότητα 7.11) οξύνει την εικόνα αντί να την επαναλαμβάνει, και οι δύο μετρικές κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Από τις 24 κατά ζεύγη συγκρίσεις του HHI, οι

14 δεν επιβιώνουν της διόρθωσης Holm σε επίπεδο σημαντικότητας άλφα 0.05: στα περισσότερα πλήθη παρόχων η φαινομενική κίνηση του δείκτη δεν ξεχωρίζει στατιστικά από τον θόρυβο. Και οι 24 συγκρίσεις της αυτάρκειας, αντιθέτως, επιβιώνουν και των δύο διορθώσεων παρά τα ελάχιστα μεγέθη επίδρασης. Η ισχύς του κατά ζεύγη σχεδιασμού προέρχεται από το ότι κάθε σπόρος μοιράζεται την ίδια μετεωρολογική κλήρωση και το ίδιο δείγμα πληθυσμού ανάμεσα στις συγκρινόμενες διαμορφώσεις. Το «στατιστικά σημαντικό» και το «πρακτικά αμελητέο» δεν είναι ο ίδιος ισχυρισμός, και εδώ ισχύουν και τα δύο ταυτόχρονα: ο μηχανισμός μετακινεί μετρήσιμα την αυτάρκεια, κατά ποσό πολύ μικρό για να έχει σημασία στα συμπεράσματα της εργασίας.

7.6 Ετερογένεια της προσαύξησης μεταξύ παρόχων

Στον πλήρη μηχανισμό, με $k = 1.0$ και 3 παρόχους, ο πάροχος με το μεγαλύτερο μερίδιο φορτίου λαμβάνει πάντα τη μεγαλύτερη μέση προσαύξηση (βλ. Σχήμα 7.3): η κατάταξη κατά μερίδιο φορτίου ταυτίζεται με την κατάταξη κατά μέση προσαύξηση σε κάθε έναν από τους 30 σπόρους. Κατά μέσο όρο στους 30 σπόρους, ο πράσινος πάροχος έχει μερίδιο φορτίου 0.206 και μέση προσαύξηση 0.0043, η ρυθμιζόμενη επιχείρηση 0.391 και 0.0079, και ο μεταβλητός πάροχος 0.403 και 0.0081. Η μέτρηση επιβεβαιώνει άμεσα την ιδιότητα που το Κεφάλαιο 5 παράγει αναλυτικά: η προσαύξηση είναι πραγματικός προσθετικός όρος σε EUR/kWh στην επόμενη προσφερόμενη τιμή του παρόχου, ίσος με τον συντελεστή μετακύλισης (συντελεστή ισχύος σήματος και όχι τιμολογιακό συντελεστή σε EUR/kWh) επί το αδιάστατο μερίδιο συνεισφοράς του παρόχου, και, υπό τον παραδιδόμενο αναλογικό κανόνα και σε μια ώρα κατά την οποία η χρέωση όντως ενεργοποιείται, ένας αυστηρά μεγαλύτερος συνεισφέρων λαμβάνει αυστηρά μεγαλύτερη προσαύξηση.



Σχήμα 7.3: Ετερογένεια της προσαύξησης κατά την κατάταξη μεριδίου φορτίου.

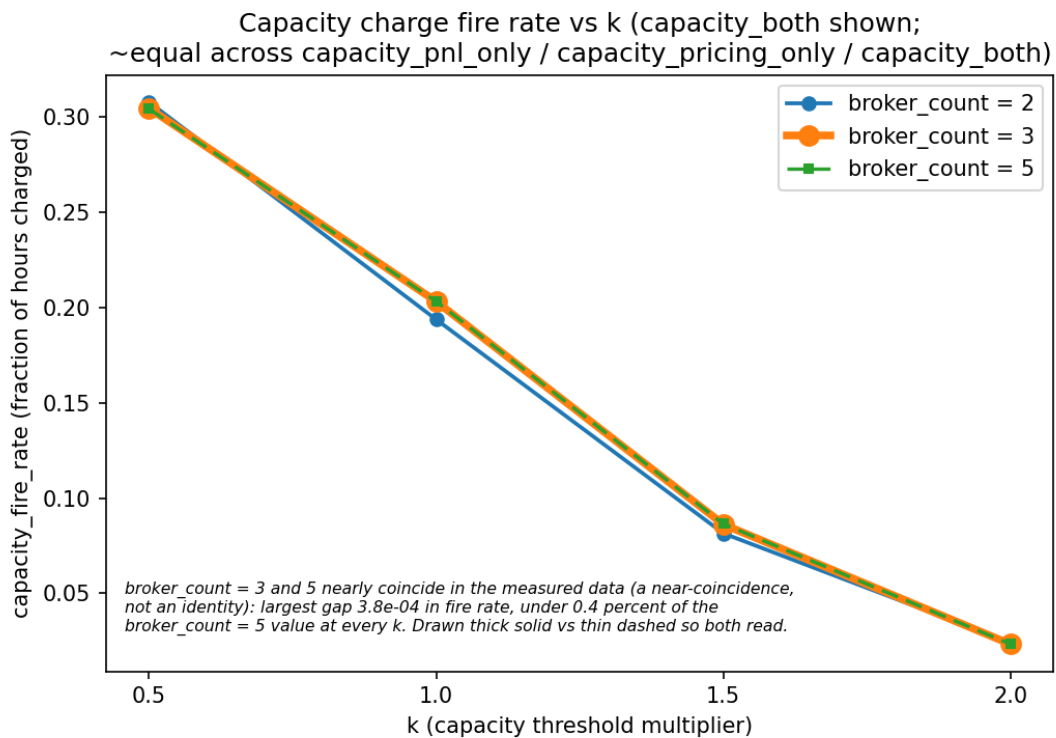
7.7 Ρυθμός ενεργοποίησης έναντι k

Ο ρυθμός ενεργοποίησης, το κλάσμα των ωρών στις οποίες ξεπερνιέται το κυλιόμενο κατώφλι, πέφτει μονότονα καθώς το k ανεβαίνει, συνεπώς προς την αναμενόμενη υπέρβαση ενός κατωφλίου μέσου όρου συν k τυπικές αποκλίσεις σε μια κατά προσέγγιση κανονική σειρά εισαγωγής τροφοδότη (Πίνακας 7.4, Σχήμα 7.4).

Πλήθος παρόχων	k = 0.5	k = 1.0	k = 1.5	k = 2.0
2	30.8%	19.4%	8.1%	2.4%
3	30.4%	20.3%	8.6%	2.3%
5	30.4%	20.3%	8.6%	2.3%

Πίνακας 7.4: Μέσος ρυθμός ενεργοποίησης του πλήρους μηχανισμού ανά k και πλήθος παρόχων.

Μια πρώτη εκτίμηση σχεδιασμού για τον ρυθμό ενεργοποίησης στο $k = 1.0$, περίπου 3 έως 6 τοις εκατό, αποδείχθηκε λανθασμένη. Στη θέση της αναφέρεται η μετρημένη τιμή της πλήρους σάρωσης, περίπου 20 τοις εκατό στο $k = 1.0$ με 3 παρόχους. Ο ρυθμός ενεργοποίησης συνδέει την επιβάρυνση κόστους της Ενότητας 7.4 με τον αναβεβλημένο όγκο της Ενότητας 7.3.



Σχήμα 7.4: Ο ρυθμός ενεργοποίησης του μηχανισμού ως προς το k.

7.8 Αλλαγή παρόχου

Ο ετήσιος ρυθμός αλλαγής παρόχου στη βάση αναφοράς, ως μέσος όρος ανά k και σπόρο, είναι 0.58 τοις εκατό με 3 παρόχους (από 0.00 έως 2.00 τοις εκατό), 0.83 τοις εκατό με 5 παρόχους (από 0.00 έως 3.00 τοις εκατό) και 21.37 τοις εκατό με 2 παρόχους (από 15.00 έως 26.50 τοις εκατό). Στον κανονικό σπόρο 20260704 η αλλαγή παρόχου με 3 παρόχους είναι ακριβώς 0 τοις εκατό σε κάθε k. Ο σχεδόν μηδενικός ρυθμός με 3 και με 5 παρόχους είναι συνεπής προς τη μεροληψία υπέρ της υπάρχουσας κατάστασης του καταναλωτικού κανόνα και προς το χαμηλό άκρο των μετρημένων ευρωπαϊκών ρυθμών αλλαγής.

Ο υψηλός ρυθμός με 2 παρόχους έχει αναγνωρίσιμη αιτία: απουσία του πράσινου υψηλής χρέωσης παρόχου, κάθε πράκτορας με προτίμηση στο πράσινο αναγκάζεται στη ρυθμιζόμενη επιχείρηση ή στον μεταβλητό πάροχο, και ένα μέρος τους μετακινείται συνεχώς λόγω της κυμαινόμενης τιμής του δεύτερου. Πρόκειται για τεχνούργημα ορίου από την αφαίρεση μιας κατηγορίας παρόχου, όχι για

ιδιότητα του μηχανισμού ή για αποτέλεσμα αγοράς. Ο μηχανισμός χωρητικότητας δεν ενεργοποιεί την αλλαγή παρόχου σε καμία διαμόρφωση: η διαφορά του πλήρους μηχανισμού μείον τη βάση αναφοράς μεταβάλλει τον ρυθμό μόνο κατά +0.08 έως +0.09 ποσοστιαίες μονάδες κατά μέσο όρο, και το πολύ κατά 1 ποσοστιαία μονάδα, σε κάθε πλήθος παρόχων.

7.9 Το συμπληρωματικό σκέλος μονοπωλίου

Το σκέλος ενός μοναδικού παρόχου προστέθηκε μετά τον έλεγχο της φάσης 8, που ζήτησε άμεση ένδειξη για το αν το κέρδος της μετρικής 3 οφείλεται στον μηχανισμό ή στον ανταγωνισμό: 480 εκτελέσεις στο ίδιο πλέγμα k και στις ίδιες τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις, με τους ίδιους 30 σπόρους, όπου ο μοναδικός πάροχος είναι η ρυθμιζόμενη επιχείρηση κοινής ωφέλειας. Η απομόνωση των καναλιών ισχύει και υπό μονοπώλιο: ο δείκτης HHI είναι ακριβώς 1.0 και στις 480 γραμμές και ο ρυθμός αλλαγής παρόχου ακριβώς 0, ενώ η διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού έχει αναβολή ακριβώς 0 με μη μηδενική χρέωση, μέσου ύψους περίπου 5941 EUR ανά εκτέλεση.

Το σκέλος διαχωρίζει καθαρά τη μετρική 3 στις δύο υπομετρικές της, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.5: οι καμπύλες του συντελεστή μεταβλητότητας επικαλύπτονται στενά, ενώ οι καμπύλες του λόγου αιχμής προς μέσο όρο ανοίγουν σαν βεντάλια, με το πλήθος 1 να είναι το μόνο χωρίς βελτίωση στα χαμηλά k και με τη χειρότερη αντιστροφή στα υψηλά. Συντελεστής μεταβλητότητας, κανάλι τιμολόγησης έναντι απενεργοποιημένης βάσης, κατά ζεύγη μέση ποσοστιαία μεταβολή ανά k :

- πλήθος παρόχων 1 (μονοπώλιο): -16.3% στο $k=0.5$, -6.8% στο $k=1.0$, -1.1% στο $k=1.5$, -0.1% στο $k=2.0$
- πλήθος παρόχων 2: -16.5%, -7.4%, -1.3%, -0.2%
- πλήθος παρόχων 3: -14.8%, -7.2%, -1.9%, -0.4%
- πλήθος παρόχων 5: -14.6%, -7.1%, -1.9%, -0.4%

Λόγος αιχμής προς μέσο όρο, ίδια σύγκριση, με τους σπόρους που βελτιώθηκαν σε παρένθεση:

- πλήθος παρόχων 1 (μονοπώλιο): -0.1% (16/30), +0.6% (21/30), +4.2% (0/30), +16.7% (0/30)
- πλήθος παρόχων 2: -5.2% (24/30), -5.5% (29/30), +2.2% (2/30), +14.0% (0/30)
- πλήθος παρόχων 3: -9.5% (30/30), -9.8% (30/30), -6.3% (30/30), +9.5% (0/30)
- πλήθος παρόχων 5: -10.0% (30/30), -10.0% (30/30), -6.8% (30/30), +9.3% (0/30)

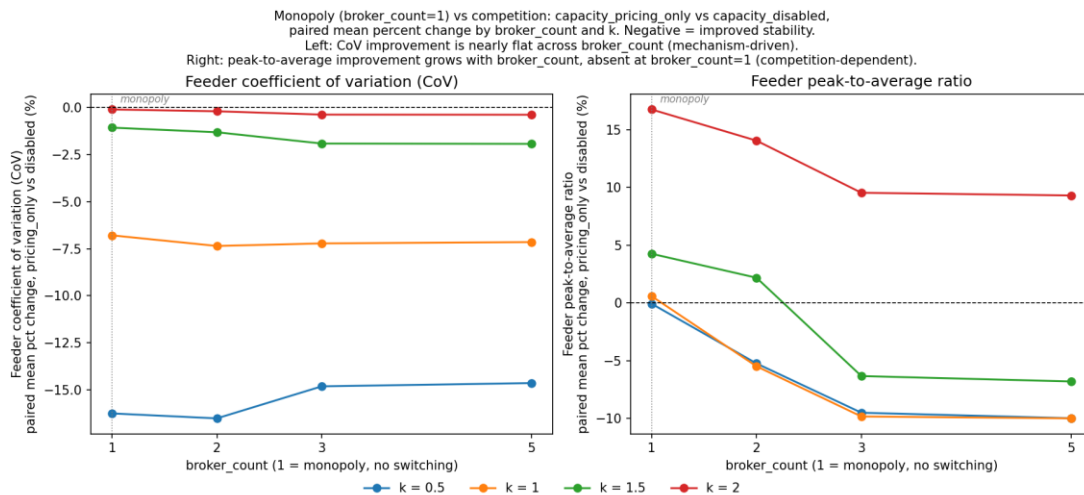
Στο $k = 1.0$ η επίδραση του μονοπωλίου στον συντελεστή μεταβλητότητας είναι μεγάλη και ισχυρά σημαντική ($d_z = -27.0$, $p = 2.8e-43$, βελτίωση και στους 30 σπόρους), ουσιαστικά ίδιου μεγέθους με ό,τι υπό ανταγωνισμό. Στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο το μέγεθος επίδρασης υπό μονοπώλιο δεν είναι σημαντικό ($d_z = +0.15$, $p = 0.43$) και γίνεται μονότονα πιο αρνητικό με το πλήθος παρόχων: -1.93 ($p = 1.8e-11$) με 2 παρόχους, -5.58 ($p = 1.3e-23$) με 3 και -7.38 ($p = 4.8e-27$) με 5. Το μονοπώλιο αναβάλλει επίσης περισσότερη ενέργεια και κοστίζει περισσότερο στο $k = 1.0$ παρά τον χαμηλότερο ρυθμό ενεργοποίησης: 49941 kWh στο έτος με ρυθμό 18.7 τοις εκατό για επιβάρυνση κόστους +12.8 τοις εκατό, έναντι 38822 kWh με 20.3 τοις εκατό και +6.0 τοις εκατό στους 3 παρόχους.

Η μηχανιστική εξήγηση προκύπτει από το μοντέλο και είναι ιστορία μεγέθους, όχι χρονισμού. Η χρέωση σπανιότητας ενεργοποιείται από τη συνολική καθαρή εισαγωγή του τροφοδότη, οπότε κάθε πάροχος με θετικό μερίδιο της εισαγωγής εκείνου του βήματος λαμβάνει την προσαύξησή του στο ίδιο βήμα: η προσαύξηση διαφέρει μεταξύ παρόχων σε μέγεθος, ποτέ στην ώρα στην οποία προσγειώνεται.

Δύο διορθώσεις σε προηγούμενο προσχέδιο της ενότητας ανήκουν στον πυρήνα της. Πρώτον, τα 49941 kWh ανά έτος δεν είναι ο μεγαλύτερος αναβεβλημένος όγκος που αναφέρεται εδώ: το ίδιο σκέλος αναβάλλει 80638 kWh ανά έτος στο $k = 0.5$. Δεύτερον, ο όγκος αυτός βρίσκεται μόλις εντός, και όχι πάνω, από τη ζώνη μετάβασης των περίπου 45000 έως 58000 kWh ανά έτος, 0.3 τοις εκατό κάτω από

το δικό του σημείο μετάβασης των 50083 kWh ανά έτος για όριο αποπληρωμής 0.5 (Ενότητα 7.12). Παραμένει υπερβολική δόση, όμως αυτό το τεκμηριώνει άμεσα ο έλεγχος εξισωμένης δόσης (Ενότητα 7.14) και όχι η θέση στη ζώνη. Δεν είναι επίσης η ταυτόχρονη απόκριση των πελατών που απέτυχε: το σκέλος του διαιρέτη 3 της Ενότητας 7.14 είναι εξίσου ταυτόχρονο, ένας πάροχος με μερίδιο 1 και κάθε ένας από τους 200 πράκτορες να λαμβάνει την ίδια προσαύξηση στις ίδιες ώρες, και στη μη κορεσμένη δόση κόβει την αιχμή κατά 10.13 τοις εκατό.

Οι 8 τιμές p του σκέλους διορθώνονται ως δική τους ξεχωριστή οικογένεια και όχι μαζί με τους 120 ελέγχους της κύριας σάρωσης: οι 6 από τις 8 επιβιώνουν και των δύο διορθώσεων, ενώ οι 2 που δεν επιβιώνουν είναι ακριβώς οι δύο που αναφέρθηκαν ήδη ως μη σημαντικές πριν από κάθε διόρθωση, ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο στο $k = 0.5$ ($p = 0.617$) και στο $k = 1.0$ ($p = 0.428$).



Σχήμα 7.5: Οι δύο πρώτες υπομετρικές της μετρικής 3 με το σκέλος μονοπωλίου.

7.10 Ο έλεγχος κατανομής της προσαύξησης (D10)

Το σκέλος ελέγχου D10 μεταβάλλει ανεξάρτητα τις δύο υπονήφιες εξηγήσεις, τον αποσυγχρονισμένο χρονισμό της αναβολής και τον αναβεβλημένο όγκο (βλ. Σχήμα 7.6). Στο σχήμα αυτό η καμπύλη του συγχρονισμένου κανόνα είναι εμφανώς μη μονότονη, με το καλύτερο αποτέλεσμα, δηλαδή τη μεγαλύτερη μείωση, στο πλήθος παρόχων 3 και όχι σε κάποιο από τα δύο άκρα. Τρέχει σε 720 γραμμές σε $k = 0.5$ και 1.0 , πλήθος παρόχων 2, 3 και 5, πλήρης μηχανισμός έναντι βάσης αναφοράς, με τους ίδιους 30 σπόρους και τον ίδιο ορίζοντα 8760 ωρών, επαναχρησιμοποιώντας τις γραμμές του παραδιδόμενου αναλογικού κανόνα αντί να τις ξανατρέξει. Η κλίση του λόγου αιχμής προς μέσο όρο από πλήθος παρόχων 2 σε 5, σε ποσοστιαίες μονάδες, είναι -4.74 στο $k = 0.5$ και -4.51 στο $k = 1.0$ υπό τον παραδιδόμενο αναλογικό κανόνα. Υπό τον συγχρονισμένο, που αφαιρεί εντελώς τη διακύμανση της προσαύξησης μεταξύ παρόχων, η κλίση επιβιώνει, στα -7.93 και -8.37 με $p_{\text{holm}} 8.4e-28$ και $8.3e-15$. Υπό τον επανακανονικοποιημένο, που κρατά σταθερό τον αναβεβλημένο όγκο ενώ αφήνει τη διακύμανση μεταξύ παρόχων να μεγαλώσει περίπου εξαπλάσια, καταρρέει στα -0.09 και -0.34 , καμία σημαντική ($p_{\text{holm}} = 1.0$).

Η μεγαλύτερη κλίση των άκρων υπό τον συγχρονισμένο κανόνα δεν σημαίνει ότι ο μηχανισμός λειτουργεί καλύτερα: κελί προς κελί είναι χειρότερος από τον αναλογικό σε τέσσερα από τα έξι κελιά και καλύτερος σε δύο, από τα οποία στο ένα, στο πλήθος παρόχων 3 και $k = 1.0$, η διαφορά των 0.0018 ποσοστιαίων μονάδων είναι πολύ μικρή για να χαρακτηριστεί ουσιαστική βελτίωση αντί για θόρυβο σε επίπεδο σπόρου:

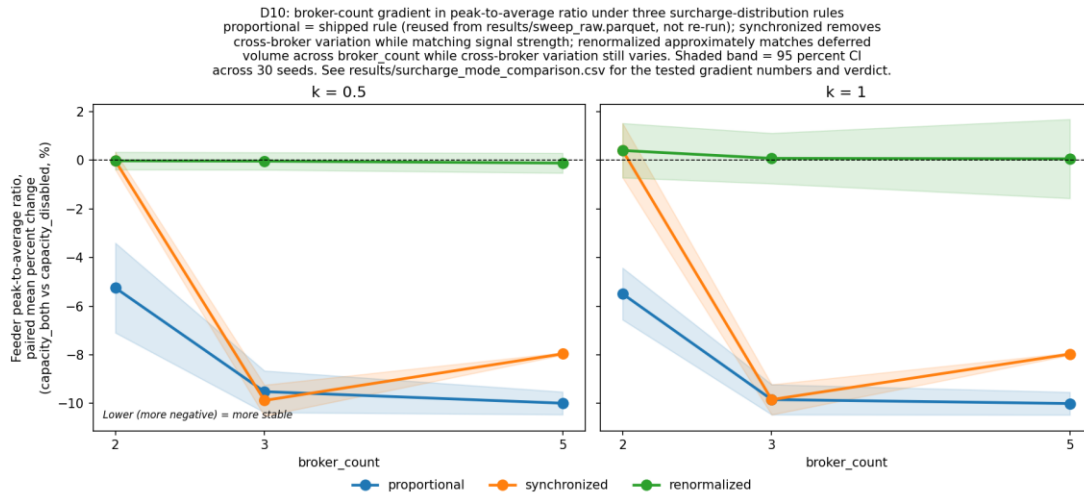
- $k = 0.5$: πλήθος παρόχων 2, -0.03 έναντι -5.25· πλήθος παρόχων 3, -9.88 έναντι -9.51· πλήθος παρόχων 5, -7.96 έναντι -9.99
- $k = 1.0$: πλήθος παρόχων 2, +0.40 έναντι -5.49· πλήθος παρόχων 3, -9.8401 έναντι -9.8383· πλήθος παρόχων 5, -7.97 έναντι -10.00

Η κλίση των άκρων μεγαλώνει εξ ολοκλήρου από την κατάρρευση του κελιού των 2 παρόχων προς το μηδέν, όχι από βελτίωση στους 5 παρόχους. Ο επανακανονικοποιημένος δεν αποτελεί ανεξάρτητη επιβεβαίωση: κάθε συνεισφέρων πάροχος σε κάθε κελί του βρίσκεται στο ή πάνω από το σημείο αποκοπής της απόκρισης αναβολής. Οι προσανξήσεις ώρας ενεργοποίησης, ταξινομημένες κατά τάξη μέσα σε κάθε σπόρο πριν από τη μέση τιμή, είναι 0.0832 και 0.1167 με 2 παρόχους (λόγοι 1.665 και 2.334 έναντι της αποκοπής), 0.0621, 0.1112 και 0.1266 με 3 παρόχους (1.241, 2.225 και 2.532) και 0.1075, 0.1795 και 0.2092 στους τρεις ενεργούς παρόχους των 5 (2.149, 3.589 και 4.185). Ο σταθερός όγκος έπεται επομένως της αποκοπής και όχι του σχεδιασμού του κανόνα, και είναι σχεδόν ταυτολογικός μόλις γίνει γνωστή η αποκοπή.

Ο συγχρονισμένος αναθέτει σε κάθε πάροχο ακριβώς τον συντελεστή μετακύλισης προς το πλήθος παρόχων σε μια ώρα ενεργοποίησης, δηλαδή 0.0500 με 2 παρόχους, 0.0333 με 3 και 0.0200 με 5, οπότε έναντι τιμής αναφοράς απόκρισης 0.0500 οι συντελεστές αναβολής είναι 1.0, 0.6667 και 0.4000. Το άκρο των 2 παρόχων, ακριβώς το άκρο που τροφοδοτεί την κλίση, είναι και αυτό κορεσμένο. Αυτό δηλώνεται αντί να αποσιωπηθεί, και η ετυμηγορία επιβιώνει: η διασπορά της προσανξήσης μεταξύ παρόχων υπό τον συγχρονισμό είναι ακριβώς 0.00000 σε κάθε πλήθος παρόχων και στα δύο k , ενώ ο πραγματοποιημένος αναβεβλημένος όγκος εξακολουθεί να καλύπτει εύρος 2.460 φορές στο $k = 0.5$ (80714, 54590 και 32813 kWh ανά έτος) και 2.350 φορές στο $k = 1.0$ (50083, 36076 και 21308 kWh ανά έτος).

Το κορεσμένο άκρο είναι μάλιστα πιο κατατοπιστικό από ό,τι θα ήταν ένα κενό στο σκέλος ελέγχου. Στο $k = 1.0$ το κελί του συγχρονισμένου με 2 παρόχους είναι το κορεσμένο κελί της σάρωσης δομικών συντελεστών (αναβλητό κλάσμα 0.20, τιμή αναφοράς απόκρισης 0.0125, όριο αποπληρωμής 0.5): και τα δύο αναβάλλουν 50083 kWh ανά έτος και δίνουν +0.3979 τοις εκατό στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, ενώ ανά σπόρο συμφωνούν σε ακριβώς 0.0 στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, σε 2.5×10^{-9} στον συντελεστή μεταβλητότητας, σε 0.048 kWh στη συνολική αναβεβλημένη ενέργεια και σε ακριβώς 0.0 στην αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών, διαφέροντας μόνο στο κόστος (82.9 EUR μέγιστη κατά ζεύγη διαφορά), αφού τα σύνολα παρόχων διαφέρουν, 2 πάροχοι έναντι 3. Η ταυτότητα δηλώνεται στο $k = 1.0$ και μόνο, επειδή το k μετακινεί ολόκληρη την καμπύλη όγκου προς απόκριση.

Το κανάλι χρονισμού είναι στενό και όχι αδύνατο. Ένας πάροχος του οποίου οι πελάτες συνεισφέρουν μηδέν ή εξάγουν καθαρά σε μια ώρα σπανιότητας αποκλείεται από αυτήν υπό τον αναλογικό και τον επανακανονικοποιημένο κανόνα, και ο αποκλεισμός εξαρτάται από το μέγεθος του παρόχου: η μέτρηση σε 10 σπόρους και 800 βήματα καθένας δίνει 0 γεγονότα απόκλισης σε 1469 ώρες σπανιότητας με μερίδιο 0.20, 3 σε 1530 με μερίδιο 0.08 και 110 σε 1468 (7.49 τοις εκατό) με μερίδιο 0.04. Η ετυμηγορία, σε αυτόν τον σχεδιασμό και σε αυτούς τους συντελεστές, είναι επομένως ότι το κανάλι είναι ο αναβεβλημένος όγκος και όχι ο αποσυγχρονισμένος χρονισμός της αναβολής. Δεν δείχνει ότι μια αποσυγχρονισμένη απόκριση ζήτησης δεν μπορεί να περικλύψει ταυτόχρονη αιχμή γενικά: αυτό θα ήταν ισχυρισμός για μηχανισμό που η εργασία αυτή δεν κατασκεύασε.



Σχήμα 7.6: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο υπό τους τρεις κανόνες κατανομής.

7.11 Πολλαπλές συγκρίσεις και διαστήματα bootstrap

Η πρωτεύουσα οικογένεια είναι οι 120 πραγματικοί κατά ζεύγη έλεγχοι t της κύριας σάρωσης, με εναλλακτικό μέγεθος 180 όταν οι 60 εκφυλισμένες συγκρίσεις ταυτότητας επιστρέφουν σε αυτήν, και με το σκέλος μονοπωλίου ως δευτερεύουσα οικογένεια 8 ελέγχων. Και οι 72 συγκρίσεις αναφοράς, δηλαδή οι δύο υπομετρικές της μετρικής 3 και η επιβάρυνση κόστους, στη διαμόρφωση μόνο του καναλιού τιμολόγησης και στον πλήρη μηχανισμό, σε κάθε k και πλήθος παρόχων, επιβιώνουν και των δύο διορθώσεων σε α 0.05, με ασθενέστερη αδιόρθωτη τιμή p το $2.7e-6$, που διορθώνεται σε $4.9e-5$ υπό Holm. Οι 106 από τις 120 τιμές p βρίσκονται κάτω από $1e-3$ και οι υπόλοιπες 14, όλες έλεγχοι του HHI, πάνω από 0.05, οπότε οι δύο διορθώσεις συμφωνούν σε κάθε απόφαση.

Η επιλογή της οικογένειας ελέγχεται με χωριστό παραδοτέο: επτά ορισμοί καταγράφονται σε δεσμευμένο αρχείο ευαισθησίας οικογένειας (Παράρτημα Δ), με τη χειρότερη διορθωμένη τιμή p να κυμαίνεται από $5.4e-6$ υπό τον στενότερο ορισμό έως $2.3e-4$ υπό την ένωση των 306 ελέγχων, και με 72 από τις 72 συγκρίσεις να επιβιώνουν σε κάθε περίπτωση. Η πρόοδος δεν είναι μονότονη ως προς το μέγεθος της οικογένειας, επειδή η Holm είναι διαδικασία με φθίνοντα βήματα: πρόσθετοι έλεγχοι που είναι οι ίδιοι ισχυρά σημαντικοί ανεβάζουν μαζί το μέγεθος και την κατάταξη του ελέγχου αναφοράς ($4.9e-5$ στα $N=120$, $5.4e-5$ στα $N=128$, $7.1e-5$ στα $N=246$), ενώ οι 60 ταυτότητες με $p = 1.0$ ανεβάζουν μόνο το μέγεθος ($2.1e-4$ στα $N=180$).

Η επιλογή είναι εξάλλου αδιάφορη και αριθμητικά για το σύνολο αναφοράς: η χειρότερη αδιόρθωτη τιμή p των 72, το $2.7e-6$, βρίσκεται κατά παράγοντα 60 κάτω από το απλό κατώφλι Bonferroni στη μεγαλύτερη υπολογισμένη οικογένεια και κατά παράγοντα 153 κάτω από αυτό στην πρωτεύουσα. Δεν είναι όμως αδρανής για κάθε μετρική: ο δείκτης συγκέντρωσης φορτίου HHI περνά από 10 επιβιώνοντα κελιά στα 24 σε 8 στα 24 υπό τις δύο οικογένειες που περιλαμβάνουν τις ταυτότητες.

Τα διαστήματα εμπιστοσύνης bootstrap υπολογίζονται δίπλα στα διαστήματα βασισμένα στην κατανομή t . Από τις 188 γραμμές, οι 6 σημειώνονται ως διαφωνούσες, και οι έξι αφορούν τα ίδια οριακά κελιά του HHI που ήδη αποτυγχάνουν στη διόρθωση Holm, με λόγους πλάτους από $1.05x$ έως $1.35x$. Κάθε μία είναι διαφωνία ως προς τον αποκλεισμό του μηδενός και όχι διαφωνία πλάτους, και καμία δεν αλλάζει αναφερόμενο συμπέρασμα.

7.12 Ευαισθησία στους δομικούς συντελεστές (D9)

Η παραγοντική σάρωση των 2880 γραμμών, από 1510 εκτελέσεις μοντέλου, ελέγχει τους τρεις δομικούς συντελεστές της απόκρισης αναβολής ζήτησης σε 48 κελιά, στο σημείο λειτουργίας αναφοράς $k = 1.0$ και πλήθος παρόχων 3, με τους ίδιους 30 σπόρους. Οι δύο υπομετρικές δεν δίνουν την ίδια απάντηση στο ερώτημα της ανθεκτικότητας.

Στον περιθώριο μέσο όρο ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται σε κάθε επίπεδο και των τριών συντελεστών και είναι σημαντικός υπό διόρθωση Holm σε κάθε ένα από αυτά: το εύρος του αναβλητού κλάσματος είναι από -4.85 έως -2.10 τοις εκατό, της τιμής αναφοράς απόκρισης από -3.95 έως -2.00 και του ορίου αποπληρωμής από -4.72 έως -2.02, χωρίς ποτέ να τέμνει το μηδέν. Σε επίπεδο κελιού η εικόνα είναι πιο περιορισμένη: 4 από τα 48 κελιά δείχνουν τον συντελεστή να επιδεινώνεται, και τα 3 από αυτά είναι σημαντικά υπό Holm. Και τα τέσσερα βρίσκονται στο υψηλότερο δοκιμασμένο επίπεδο του αναβλητού κλάσματος (0.30): το (0.30, 0.0125, 0.5) επιδεινώνεται κατά 1.11 τοις εκατό ($p_{\text{holm}} = 1.2e-20$), το (0.30, 0.0125, 1.0) κατά 2.90 τοις εκατό ($p_{\text{holm}} = 1.3e-41$), το (0.30, 0.025, 1.0) κατά 2.36 τοις εκατό ($p_{\text{holm}} = 1.5e-26$), ενώ μόνο το (0.30, 0.025, 0.5), στο +0.19 τοις εκατό, δεν φτάνει σε σημαντικότητα ($p_{\text{holm}} = 0.214$). Ο πλήρης ισχυρισμός είναι επομένως ανθεκτικότητα στον περιθώριο μέσο όρο, με σημαντικότητα παντού σε αυτόν και στενή εξαίρεση μικρού μεγέθους, δηλαδή βελτίωση σε 44 από τα 48 κελιά και όχι κυριολεκτικά καθολική. Το δεσμευμένο αρχείο της δομικής ανάλυσης (Παράρτημα Δ) καταγράφει ακριβώς αυτό ως ανθεκτικότητα στον περιθώριο μέσο όρο με ευθραυστότητα στις αλληλεπιδράσεις, και για τους τρεις συντελεστές, αφού καθένας έχει τουλάχιστον ένα επίπεδο μέσα στο οποίο τα επιμέρους κελιά διαφωνούν μεταξύ τους σε πρόσημο, χωρίς όμως κανένας από τους τρεις να αντιστρέφει ποτέ τον δικό του περιθώριο μέσο όρο.

Η ευθραυστότητα του λόγου αιχμής προς μέσο όρο είναι πολύ μεγαλύτερη σε έκταση και σε μέγεθος. Επιδεινώνονται 9 από τα 48 κελιά, και το χειρότερο μεμονωμένο κελί φτάνει το +27.01 τοις εκατό, στο (0.30, 0.025, 1.00). Το περιθώριο εύρος του αναβλητού κλάσματος τρέχει από -5.92 έως +8.38 τοις εκατό και της τιμής αναφοράς απόκρισης από -5.50 έως +2.78, αλλάζοντας και τα δύο πρόσημο στο ίδιο το περιθώριο επίπεδο, ενώ το εύρος του ορίου αποπληρωμής, από -1.70 έως -0.18, δεν αλλάζει πρόσημο.

Ο Πίνακας 7.5 δίνει τη διπλή αυτή εξάρτηση ως πλέγμα, ως κατά ζεύγη μέση ποσοστιαία μεταβολή του πλήρους μηχανισμού έναντι της βάσης αναφοράς: οι γραμμές του είναι τα επίπεδα του αναβλητού κλάσματος, οι στήλες τα επίπεδα της τιμής αναφοράς απόκρισης, και κάθε κελί είναι μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής και όχι μετρημένο κελί.

Αναβλητό κλάσμα	0.0125	0.025	0.10	0.20
0.05	-5.00	-4.85	-1.79	-0.90
0.10	-9.21	-9.09	-3.58	-1.79
0.20	+0.22	-1.92	-7.13	-3.58
0.30	+25.10	+23.31	-9.51	-5.37

Πίνακας 7.5: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο στη σάρωση δομικών συντελεστών.

Η συνολική αναβεβλημένη ενέργεια του έτους διατάσσει την επίδραση στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο μέσα σε σταθερό όριο αποπληρωμής, με συσχέτιση +0.549 στο 0.25, +0.595 στο 0.50 και +0.662 στο 1.00. Δεν είναι όμως επαρκές στατιστικό σε ολόκληρο τον χώρο των συντελεστών, επειδή το όριο αποπληρωμής καθορίζει ανεξάρτητα το πού πέφτει η αντιστροφή: το κελί με τον χαμηλότερο όγκο που βλέπεται βρίσκεται στα 58314 kWh ανά έτος με όριο 0.25, στα 50083 με 0.50 και στα 45551 με 1.00.

Τέσσερα μετρημένα κελιά διαψεύδουν ευθέως τόσο τον ισχυρισμό του επαρκούς στατιστικού όσο και κάθε μονοσήμαντο σημείο μετάβασης, επειδή σε σταθερά αναβλητό κλάσμα και τιμή αναφοράς απόκρισης ο όγκος και η επίδραση κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις καθώς αλλάζει το όριο αποπληρωμής:

- (0.20, 0.0125, 0.25): 52447 kWh ανά έτος, -3.48 τοις εκατό, δηλαδή όφελος
- (0.20, 0.0250, 0.25): 51121 kWh ανά έτος, -5.75 τοις εκατό, δηλαδή όφελος
- (0.20, 0.0125, 1.00): 46283 kWh ανά έτος, +3.74 τοις εκατό, δηλαδή βλάβη
- (0.20, 0.0250, 1.00): 45551 kWh ανά έτος, +2.03 τοις εκατό, δηλαδή βλάβη

Το σημείο μετάβασης είναι επομένως ζώνη και όχι σημείο: περίπου από 45000 έως 58000 kWh ανά έτος, δηλαδή περίπου 5.3 έως 6.8 τοις εκατό των περίπου 859000 kWh ετήσιας εξυπηρετούμενης ενέργειας του πληθυσμού. Κάτω από το σημείο μετάβασης του δικού του ορίου, περισσότερη αναβολή αφήνει τον μηχανισμό να κόψει μεγαλύτερο μέρος της ετήσιας αιχμής· πάνω από αυτό, αναβάλλει περισσότερο φορτίο από όσο μπορεί να απορροφήσει η κοιλάδα εκτός αιχμής με τον φραγμένο ρυθμό αποπληρωμής, και η αποπληρωμή χτίζει νέα αιχμή μεγαλύτερη από εκείνη που έκοψε. Ο Πίνακας 7.6 δίνει την ταξινομημένη κατά όγκο εικόνα και το Σχήμα 7.7 την ασυμμετρία των δύο υπομετρικών: στην επάνω σειρά του την περιθώρια ποσοστιαία μεταβολή κάθε υπομετρικής ως προς τα επίπεδα του δικού της συντελεστή, με κατά προσέγγιση διαστήματα 95 τοις εκατό και σημειωμένη την παρατιθέμενη βαθμονόμηση, και στην κάτω σειρά τον θερμικό χάρτη της αλληλεπίδρασης του αναβλητού κλάσματος επί το όριο αποπληρωμής με την τιμή αναφοράς απόκρισης μέση και πλαισιωμένη τη γωνία αποτυχίας που είχε ονομάσει το D9.

Αναβεβλημένη ενέργεια (kWh ανά έτος)	Μεταβολή λόγου αιχμής προς μέσο όρο	Είδος γραμμής
2332	-0.90%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
4673	-1.79%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
9363	-3.58%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
12591	-4.85%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
13036	-5.00%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
14060	-5.37%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
18871	-7.13%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
25915	-9.09%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
26831	-9.21%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
28886	-9.51%	μέσος όρος, καλύτερη μετρημένη περιοχή
38822	-9.84%	μετρημένο κελί: η παρατιθέμενη βαθμονόμηση
48611	-1.92%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
49604	+0.22%	μέσος όρος: σημείο μετάβασης της μέσης όψης

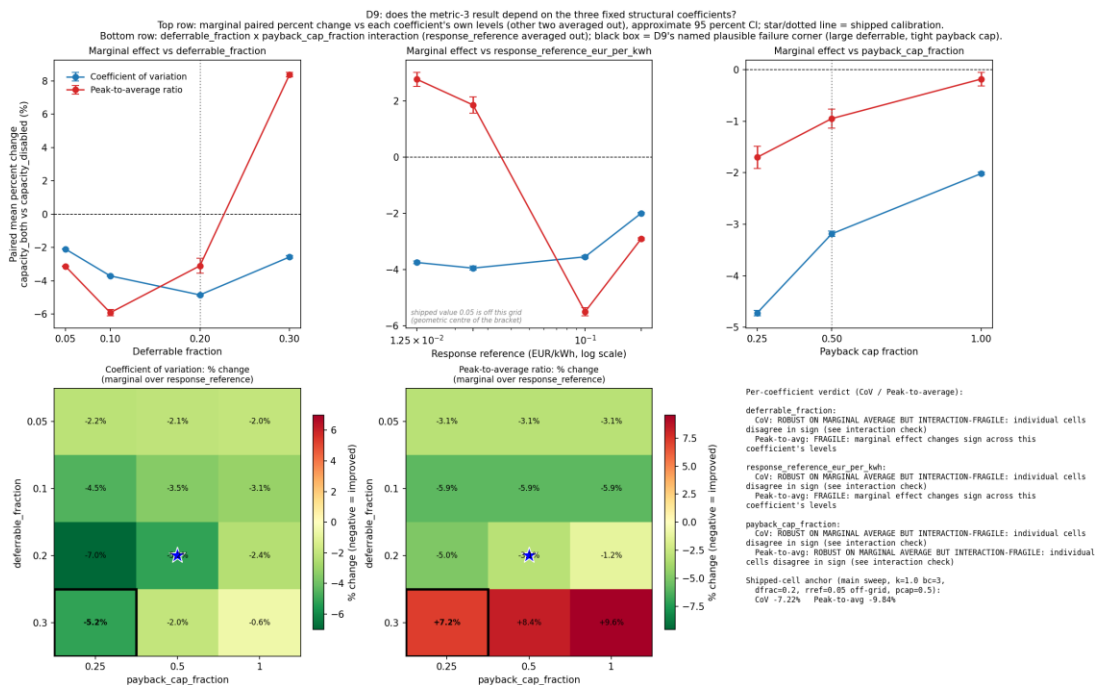
Αναβλημένη ενέργεια (kWh ανά έτος)	Μεταβολή λόγου αιχμής προς μέσο όρο	Είδος γραμμής
54661	+23.31%	μέσος όρος ως προς το όριο αποπληρωμής
55182	+25.10%	μέσος όρος: χειρότερη τιμή της μέσης όψης

Πίνακας 7.6: Τα 15 σημεία του ανεστραμμένου U κατά αναβλημένο όγκο.

Η τεκμηρίωση του D9, γραμμένη πριν τρέξει η σάρωση, προέβλεψε ότι μεγάλο αναβλητό κλάσμα με σφικτό όριο αποπληρωμής είναι η γωνία στην οποία το αποτέλεσμα θα μπορούσε να αντιστραφεί. Τα δεδομένα δείχνουν το αντίθετο: το σφικτότερο όριο απλώνει την αποπληρωμή σε περισσότερες ώρες και μειώνει την ανάκαμψη. Στο (0.30, 0.0125) το σφικτό όριο είναι το λιγότερο κακό από τα τρία (+23.04, +26.11 και +26.14 τοις εκατό), και στο (0.20, 0.0125) το όριο από μόνο του αλλάζει το πρόσημο (-3.48, +0.40 και +3.74 τοις εκατό). Η αλληλεπίδραση που το D9 έκρινε ότι άξιζε να αναζητηθεί υπάρχει, όμως το πρόσημό της είχε προβλεφθεί ανάποδα, και καταγράφεται όπως βρέθηκε.

Η παρατιδόμενη βαθμονόμηση αναβάλλει 38822 kWh ανά έτος, δηλαδή περίπου 22 τοις εκατό κάτω από το σημείο μετάβασης του δικού της ορίου αποπληρωμής, τα 50083 kWh ανά έτος. Η θέση αυτή δεν παρουσιάζεται ως επικύρωση: οι τρεις συντελεστές είχαν καθοριστεί πριν υπάρξει η σάρωση, κρατήθηκαν σταθεροί σε ολόκληρη την κύρια σάρωση των 1440 εκτελέσεων, και κανένας δεν άλλαξε μετά την εμφάνιση του αποτελέσματος. Περιγράφεται επομένως ως τυχερή και όχι ως επικυρωμένη.

Η πρωτεύουσα οικογένεια διόρθωσης της σάρωσης είναι οι 96 πραγματικοί κατά ζεύγη έλεγχοι, με δευτερεύουσα περιθώρια οικογένεια 22 ελέγχων, από τους οποίους και οι 22 επιβιώνουν της Holm. Σε επίπεδο κελιού η διόρθωση δεν σβήνει τις εξαιρέσεις: από τα 9 επιδεινούμενα κελιά του λόγου αιχμής προς μέσο όρο, τα 8 επιβιώνουν, με μοναδική εξαίρεση το (0.20, 0.0125, 0.5) στο $p_{holm} = 0.478$.



Σχήμα 7.7: Περιθώριες επιδράσεις και αλληλεπίδραση των δομικών συντελεστών.

7.13 Έλεγχος ανθεκτικότητας: μετρημένη ζήτηση OPSD

Το κελί αναφοράς επανεκτελέστηκε με την πηγή ζήτησης ρυθμισμένη στη μετρημένη σειρά OPSD, σε 120 εκτελέσεις κατά ζεύγη ανά σπόρο έναντι των συνθετικών εκτελέσεων του ίδιου κελιού. Το εύρημα της μετρικής 3 επιβιώνει στη μετρημένη ζήτηση (Πίνακας 7.7, πλήρης μηχανισμός έναντι βάσης αναφοράς, κατά ζεύγη μέση ποσοστιαία μεταβολή), και κάθε γραμμή του πίνακα κινείται προς την ίδια κατεύθυνση και στους 30 από τους 30 σπόρους. Πρόκειται για έλεγχο ανθεκτικότητας ενός μόνο κελιού ($k = 1.0$, πλήθος παρόχων 3, και οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις, 30 σπόροι) και όχι για επανεκτέλεση της εργασίας σε μετρημένα δεδομένα: η συνθετική σειρά παραμένει η προεπιλογή, κάθε άλλος αριθμός του κεφαλαίου υπολογίζεται πάνω σε αυτήν, και ο χαρακτηρισμός της περιβάλλουσας ως προς k και πλήθος παρόχων των Ενοτήτων 7.3 και 7.9 παραμένει αποτέλεσμα συνθετικής ζήτησης.

Μετρική	Συνθετική	Στατιστικό	OPSD	Στατιστικό
Συντελεστής μεταβλητότητας	-7.22%	$d_z = -22.25, p = 7.4e-41$	-2.87%	$d_z = -46.80, p = 3.3e-50$
Λόγος αιχμής προς μέσο όρο	-9.84%	$d_z = -5.58, p = 1.3e-23$	-15.35%	$d_z = -27.03, p = 2.6e-43$
Μέσο κόστος ανά πράκτορα	+5.97%	$d_z = 31.62$	+4.20%	$d_z = 26.22$
Αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών	-0.13%	δεν αναφέρεται	+0.04%	δεν αναφέρεται

Πίνακας 7.7: Συνθετική έναντι μετρημένης ζήτησης OPSD στο κελί αναφοράς ($k = 1.0$, πλήθος παρόχων 3).

Η μεγαλύτερη βελτίωση στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο πρέπει να διαβαστεί μαζί με την επιφύλαξη της και όχι μετά από αυτήν: ο τροφοδότης OPSD είναι 2.8 φορές πιο αιχμηρός από τον συνθετικό πριν καν ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός (λόγος αιχμής προς μέσο όρο 9.98 υπό OPSD έναντι 3.51 υπό συνθετική ζήτηση, συντελεστής μεταβλητότητας 0.787 έναντι 0.678), επειδή η σειρά OPSD συναθροίζει μόνο δύο νοικοκυριά. Ένας μηχανισμός που κόβει αιχμές έχει περισσότερο περιθώριο έναντι ενός αιχμηρότερου σημείου εκκίνησης, οπότε μέρος της μεγαλύτερης βελτίωσης είναι το περιθώριο και όχι καλύτερος μηχανισμός. Από τη διαφορά προσήμου στην αυτάρκεια δεν προκύπτει ανάγνωση, αφού και οι δύο τιμές βρίσκονται πολύ κάτω από το ένα τέταρτο της ποσοστιαίας μονάδας.

Ο αναβεβλημένος όγκος δίνει άτυπο διασταυρωτικό έλεγχο με τη σάρωση δομικών συντελεστών. Η εκτέλεση OPSD αναβάλλει 25990 kWh ανά έτος, κάτω από τη ζώνη μετάβασης της Ενότητας 7.12, και κάτω και από τα δύο άκρα της καλύτερης μετρημένης περιοχής, που δεν είναι το ίδιο είδος αριθμού και γ' αυτό χαρακτηρίζονται χωριστά: τα 28886 kWh ανά έτος στο -9.51 τοις εκατό είναι τιμή μέση ως προς το όριο αποπληρωμής, ενώ τα 38822 kWh ανά έτος στο -9.84 τοις εκατό είναι το μοναδικό μετρημένο κελί της παραδιδόμενης βαθμονόμησης. Τα 25990 kWh ανά έτος βρίσκονται μέσα στην περιοχή οφέλους, ανάμεσα στα 25915 kWh ανά έτος με -9.09 τοις εκατό και στα 26831 kWh ανά έτος με -9.21 τοις εκατό. Πρόκειται για αμοιβαία επιβεβαίωση ανάμεσα σε δύο ανεξάρτητα σχεδιασμένους ελέγχους και όχι για απόδειξη ότι ο όγκος μετάβασης είναι ανεξάρτητος από τα δεδομένα. Ο έλεγχος αυτός δεν αφορά επίσης καθόλου τον περιορισμό του συντελεστή ταυτοχρονισμού.

7.14 Μονοπώλιο εξισωμένης δόσης (D11)

Το σκέλος ελέγχου των 360 εκτελέσεων (Πίνακας 7.8, Σχήμα 7.8) απαντά αν η απουσία οφέλους στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο υπό μονοπώλιο είναι ιδιότητα του μονοπωλίου ή της συγκεκριμένης ισχύος σήματος. Στον Πίνακα 7.8 τα σκέλη M είναι το μονοπώλιο με τον αντίστοιχο διαιρέτη προσαύξησης, η επίδραση είναι η κατά ζεύγη μέση ποσοστιαία μεταβολή του πλήρους μηχανισμού έναντι της βάσης

αναφοράς στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, και δίπλα σε κάθε επίδραση δίνεται ο πραγματοποιημένος αναβεβλημένος όγκος ώστε η δόση να είναι ορατή. Οι 180 γραμμές βάσης αναφοράς του σκέλους είναι πανομοιότυπες ανά byte για τους διαιρέτες 2, 3 και 5, σε ακριβώς 0.0 μέγιστη απόλυτη απόκλιση, και πανομοιότυπες και προς τις αντίστοιχες γραμμές του αρχικού σκέλους μονοπωλίου, οπότε η αδράνεια του διαιρέτη με το κανάλι τιμολόγησης κλειστό είναι μέτρηση και όχι επιχείριμα κατασκευής.

Σκέλος	Επίδραση, $k = 0.5$	kWh, $k = 0.5$	Επίδραση, $k = 1.0$	kWh, $k = 1.0$
Μονοπώλιο $M=1$	-0.08	80638	+0.58	49941
Μονοπώλιο $M=2$	-0.08	80638	+0.58	49941
Μονοπώλιο $M=3$	-10.16	54501	-10.13	36030
Μονοπώλιο $M=5$	-7.93	32658	-7.94	21209
Πλήθος παρόχων 2	-5.25	75686	-5.49	47968
Πλήθος παρόχων 3	-9.51	58602	-9.84	38822
Πλήθος παρόχων 5	-9.99	57839	-10.00	38423

Πίνακας 7.8: Λόγος αιχμής προς μέσο όρο και αναβεβλημένος όγκος ανά σκέλος δόσης.

Η κρίσιμη σύγκριση γίνεται ανά σπόρο πάνω στις κατά ζεύγη ποσοστιαίες μεταβολές, με τους ίδιους 30 σπόρους και στις δύο πλευρές. Στο $k = 0.5$ ο μονοπωλητής με διαιρέτη 3 δίνει -10.157 τοις εκατό έναντι -9.512 τοις εκατό του πλήθους παρόχων 3, δηλαδή διαφορά -0.645 ποσοστιαίων μονάδων, με διάστημα εμπιστοσύνης 95 τοις εκατό βασισμένο στην κατανομή t από -1.467 έως +0.178, κατά ζεύγη $p = 0.12$ και τον μονοπωλητή καλύτερο σε 18 από τους 30 σπόρους. Στο $k = 1.0$ δίνει -10.125 έναντι -9.838, διαφορά -0.287 ποσοστιαίων μονάδων, διάστημα από -0.895 έως +0.320, $p = 0.342$ και 17 από τους 30 σπόρους. Ο πραγματοποιημένος αναβεβλημένος όγκος είναι 54501 έναντι 58602 kWh ανά έτος στο $k = 0.5$ και 36030 έναντι 38822 στο $k = 1.0$, δηλαδή λόγοι 0.930 και 0.928.

Η διατύπωση που κάνει η εργασία είναι «εντός της ζώνης θορύβου σε επίπεδο σπόρου, με διάστημα εμπιστοσύνης από -1.467 έως +0.178». Οι λέξεις «ταυτόσημο», «ισοδύναμο» και «καμία διαφορά» δεν χρησιμοποιούνται, επειδή μια μη σημαντική κατά ζεύγη διαφορά σε 30 σπόρους δεν αποκλείει πραγματική διαφορά. Το διάστημα δεν είναι συμμετρικό: τα δεδομένα αποκλείουν να υπερτερεί ο ανταγωνισμός έναντι του μονοπωλητή εξισωμένης δόσης κατά περισσότερο από περίπου 0.18 ποσοστιαίες μονάδες στο $k = 0.5$ και 0.32 στο $k = 1.0$, ενώ πλεονέκτημα του μονοπωλητή έως περίπου 1.47 και 0.89 μονάδες αντίστοιχα δεν αποκλείεται.

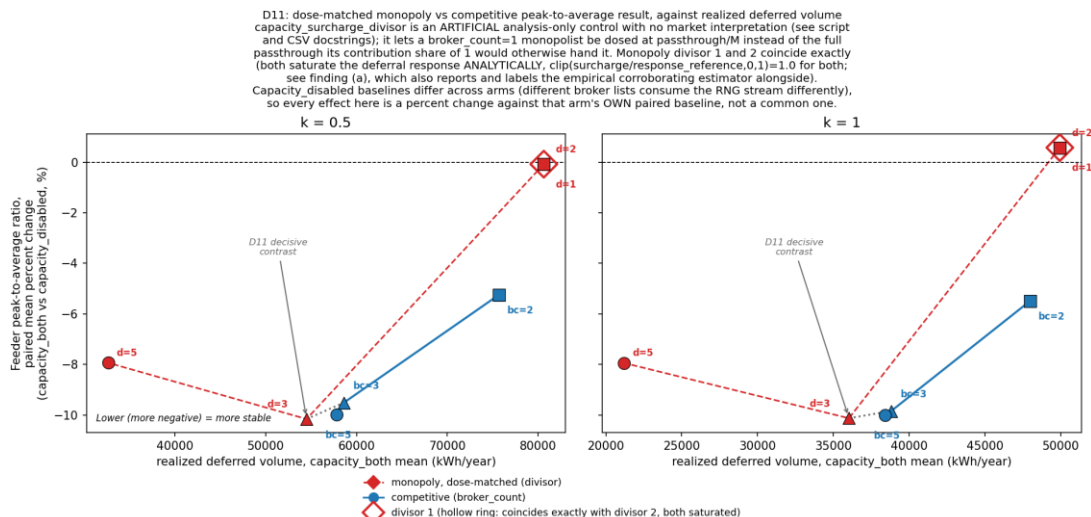
Το σκέλος του διαιρέτη 3 και το σκέλος του πλήθους παρόχων 3 είναι μεν συζευγμένα ανά σπόρο, αλλά δεν μοιράζονται την ίδια εκτέλεση βάσης αναφοράς, επειδή διαφορετική λίστα παρόχων καταναλώνει διαφορετικά τη ροή τυχαίων αριθμών του μοντέλου, οπότε κάθε επίδραση είναι ποσοστιαία μεταβολή έναντι της δικής της βάσης. Η συσχέτιση ανά σπόρο μεταξύ των δύο σκελών είναι 0.364 στο $k = 0.5$ και 0.426 στο $k = 1.0$, δηλαδή υψηλότερη από τις τιμές 0.249 και 0.082 της σύγκρισης πλήθους παρόχων 2 έναντι 3, η οποία μοιράζεται πληθυσμό ακριβώς. Αυτό αναφέρεται ως δήλωση και όχι ως ελάττωμα.

Οι διαιρέτες 1 και 2 παράγουν πανομοιότυπη φυσική έξοδο και διαφέρουν μόνο στο κόστος (+19.94 έναντι +9.96 τοις εκατό στο $k = 0.5$). Η αιτία είναι η αποκοπή της απόκρισης αναβολής: η προσαύξηση ώρας ενεργοποίησης του μονοπωλητή είναι 0.10 στον διαιρέτη 1 και 0.05 στον διαιρέτη 2, και οι δύο αποκόπτονται σε συντελεστή 1.0, ενώ ο διαιρέτης 3 δίνει 0.0333 και ο διαιρέτης 5 δίνει 0.02, κάτω από την αποκοπή. Το παραδιδόμενο σκέλος μονοπωλίου δεν ήταν επομένως απλώς υψηλής δόσης, ήταν σε διπλάσια δόση από το σημείο κορεσμού, και ό,τι βρισκόταν πάνω από εκείνο το σημείο πήγε εξ ολοκλήρου σε κόστος καταναλωτή χωρίς καμία φυσική επίδραση. Ο διαιρέτης 5 δίνει -7.93 και -7.94 έναντι -9.99 και -10.00 του πλήθους παρόχων 5, επειδή το σκέλος των 5 παρόχων τρέχει με μέσο όρο

3.625 ενεργούς παρόχους, οπότε το σκέλος με το οποίο μοιάζει είναι ο διαιρέτης 3. Στο πλήθος παρόχων 2 οι προσαυξήσεις ώρας ενεργοποίησης είναι άνισες, 0.0585 και 0.0415, οπότε ο ένας πάροχος είναι κορεσμένος και ο άλλος όχι και δεν υπάρχει μοναδική δόση προς εξίσωση.

Ενάντια στο συμφέρον του ισχυρισμού, και αναφερόμενο αντί να αποσιωπηθεί: η εξίσωση της δόσης είναι καλή στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο και μετρήσιμα ατελής στον συντελεστή μεταβλητότητας. Στον διαιρέτη 3 ο μονοπωλητής τον βελτιώνει κατά 13.84 τοις εκατό έναντι 14.82 του πλήθους παρόχων 3 στο $k = 0.5$, και κατά 6.58 έναντι 7.22 στο $k = 1.0$, δηλαδή διαφορές +0.978 και +0.642 ποσοστιαίων μονάδων, και οι δύο σημαντικές περίπου στο $1e-9$. Δεν πρόκειται για δεύτερο κανάλι: ο μονοπωλητής αναβάλλει περίπου 7 τοις εκατό λιγότερο όγκο, και ο συντελεστής μεταβλητότητας τον διακρίνει ενώ ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο δεν τον διακρίνει. Η δόση εξισώθηκε σε περίπου 7 τοις εκατό και όχι ακριβώς.

Η ετυμηγορία, στη διατύπωση που στηρίζουν τα δεδομένα, είναι ότι ο ανταγωνισμός είναι ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη για το αποτέλεσμα στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, σε αυτόν τον σχεδιασμό και σε αυτούς τους συντελεστές, και ο μονοπωλητής εξισωμένης δόσης το πετυχαίνει με μικρότερη επιβάρυνση κόστους από την ίδια αγορά (7.37 έναντι 8.77 τοις εκατό στο $k = 0.5$ και 5.02 έναντι 5.97 στο $k = 1.0$). Ο διαιρέτης δεν είναι εργαλείο πολιτικής και κανένας ισχυρισμός δεν τον μεταχειρίζεται ως τέτοιο, ούτε δείχνει το σκέλος ότι ένα πραγματικό μονοπώλιο θα παρήγαγε αυτό το αποτέλεσμα. Η ενότητα δεν επανεξετάζει επίσης την αναλλοιωσιμότητα του συντελεστή μεταβλητότητας ως προς το πλήθος παρόχων, που τεκμηριώθηκε από το σκέλος μονοπωλίου πλήρους μετακύλισης (Ενότητα 7.9). Οι 28 έλεγχοι της πρωτεύουσας οικογένειας του σκέλους διορθώνονται όπως κάθε άλλη οικογένεια, ενώ η κρίσιμη σύγκριση διορθώνεται ως δική της οικογένεια 4 ελέγχων: κανένας από τους δύο ελέγχους της στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο δεν επιβιώνει ($p_{\text{holm}} = 0.240$ και 0.342), ενώ και οι δύο έλεγχοι στον συντελεστή μεταβλητότητας επιβιώνουν (p_{holm} περίπου $4.4e-9$ και $1.3e-8$).



Σχήμα 7.8: Επίδραση και αναβεβλημένος όγκος ως προς τον διαιρέτη προσαύξησης.

7.15 Επίλογος

Τα δύο κανάλια του μηχανισμού απομονώνονται καθαρά: το λογιστικό κανάλι χρεώνει καθολικά χωρίς να μετακινεί καμία φυσική μετρική, και μόνο το κανάλι τιμολόγησης μπορεί να μετακινήσει τη μετρική 3. Οι δύο υπομετρικές της δεν συμπεριφέρονται όμοια: ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται σε κάθε k , ενώ ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο βελτιώνεται μόνο εντός μιας περιβάλλουσας και

αντιστρέφεται έξω από αυτήν. Η επιβάρυνση κόστους συρρικνώνεται μαζί με το κέρδος ευστάθειας καθώς ανεβαίνει το k , ενώ οι μετρικές 2 και 4 μένουν κοντά στο αμετάβλητο.

Το σκέλος μονοπωλίου χωρίζει το αποτέλεσμα στα δύο, αποδίδοντας το κέρδος του συντελεστή μεταβλητότητας στον ίδιο τον μηχανισμό, και ο έλεγχος εξισωμένης δόσης στενεύει τον ισχυρισμό για τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο σε ικανή και όχι αναγκαία συνθήκη. Η σάρωση των δομικών συντελεστών δείχνει την ίδια υπομετρική εύθραυστη στους συντελεστές της απόκρισης, με τη ζώνη μετάβασης να εξαρτάται από το όριο αποπληρωμής, ενώ ο έλεγχος με μετρημένη ζήτηση δείχνει ότι το εύρημα επιβιώνει, με τη δική του επιφύλαξη για το αιχμηρότερο σημείο εκκίνησης. Το σύνολο αναφοράς των 72 συγκρίσεων επιβιώνει και των δύο διορθώσεων υπό κάθε ορισμό οικογένειας που δοκιμάστηκε.

Κεφάλαιο 8ο: Συζήτηση και περιορισμοί

8.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό δίνει ίσο βάρος σε δύο μισά: σε αυτό που στηρίζουν τα μετρημένα αποτελέσματα και σε αυτό που δεν στηρίζουν. Το πρώτο μισό διαβάζει τα ευρήματα του Κεφαλαίου 7 ως ερμηνεία και όχι ως δεύτερο πίνακα αριθμών: ποιο κανάλι κινεί ποια μετρική, μέσα σε ποιες περιβάλλουσες λειτουργίας ισχύει το κύριο εύρημα, τι διευθετούν τα σκέλη ελέγχου και τι αφήνουν ανοιχτό. Το δεύτερο μισό απαριθμεί τους περιορισμούς της εργασίας χωρίς εξομάλυνση, μαζί με εκείνον που οριοθετεί άμεσα το κύριο μέγεθος που αναφέρω. Οι αριθμοί δεν επαναλαμβάνονται εδώ: παραπέμπω στην αντίστοιχη ενότητα του Κεφαλαίου 7 και αναφέρω ρητά μόνο όσα μεγέθη αποτελούν το ίδιο το αντικείμενο μιας ερμηνευτικής παρατήρησης.

8.2 Τι στηρίζουν τα αποτελέσματα

Η αφαιρετική μελέτη των δύο καναλιών απομονώνει καθαρά τη συνεισφορά καθενός (Ενότητα 7.2). Το λογιστικό κανάλι χρεώνει τα καθολικά των παρόχων με μη μηδενική και ελέγξιμη χρέωση, δεν κινεί όμως καμία φυσική μετρική και δεν αλλάζει κανέναν λογαριασμό καταναλωτή. Το κανάλι τιμολόγησης και αναβολής είναι το μόνο κανάλι που κινεί την ευστάθεια του τροφοδότη. Η διάκριση αυτή δεν προκύπτει από στατιστικό έλεγχο αλλά από την ίδια την κατασκευή: το ένα κανάλι γράφει σε λογαριασμούς, το άλλο γράφει σε προσφερόμενες τιμές, και μόνο οι τιμές φτάνουν στον κανόνα απόκρισης των πρακτόρων. Ό,τι μετακινείται στη μετρική 3 αποδίδεται επομένως σε ένα ονομασμένο κανάλι και όχι στον μηχανισμό χωρητικότητας συνολικά.

Οι δύο πρώτες υπομετρικές της μετρικής 3 δεν είναι εξίσου ανθεκτικά στατιστικά, και η διαφορά αυτή καθορίζει πώς πρέπει να διαβαστεί το αποτέλεσμα. Ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο είναι στατιστικό μίας και μόνο ετήσιας μέγιστης τιμής, άρα ευαίσθητο σε ό,τι συμβαίνει σε μία μοναδική ώρα του έτους. Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι το κατανομικό συνοδευτικό μέτρο, συνοψίζει τη διασπορά ολόκληρης της σειράς και είναι ο πιο ανθεκτικός από τους δύο: βελτιώνεται σε κάθε k που δοκιμάστηκε και δεν αντιστρέφει ποτέ πρόσημο. Ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο βελτιώνεται μόνο εντός περιβάλλουσας που εξαρτάται από το πλήθος παρόχων (Ενότητα 7.3). Στο κελί αναφοράς, $k = 1.0$ και πλήθος παρόχων 3, η κατά ζεύγη μεταβολή είναι -9.84 τοις εκατό στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο και -7.22 τοις εκατό στον συντελεστή μεταβλητότητας. Η αντιστροφή στα υψηλά k περιορίζεται στη μοναδική ώρα της ετήσιας αιχμής, όπου ο μηχανισμός ενεργοποιείται πολύ σπάνια για να την κουρέψει και η φραγμένη αποπληρωμή της λίγης ενέργειας που αναβάλλει σπρώχνει το μέγιστο προς τα πάνω.

Τα υπόλοιπα μετρημένα μεγέθη συμφωνούν με αυτή την ανάγνωση. Η επιβάρυνση κόστους από την ενεργοποίηση του καναλιού τιμολόγησης συρρικνώνεται καθώς αυξάνεται το k και ακολουθεί τον ίδιο τον ρυθμό ενεργοποίησης του μηχανισμού (Ενότητες 7.4 και 7.7). Ο δείκτης συγκέντρωσης φορτίου H_{HI} και η αυτάρκεια των παραγωγοκαταναλωτών παραμένουν και οι δύο σχεδόν αμετάβλητοι ως προς τον μηχανισμό (Ενότητα 7.5). Η ετερογένεια της προσαύξησης μεταξύ παρόχων διατηρείται ακριβώς όπως προβλέπει η κατασκευή του μηχανισμού: υπό τον αναλογικό κανόνα της παραδιδόμενης διαμόρφωσης και σε ώρα που η χρέωση όντως ενεργοποιείται, ένας αυστηρά μεγαλύτερος συνεισφέρων λαμβάνει αυστηρά μεγαλύτερη προσαύξηση (Ενότητα 7.6). Ο μηχανισμός δεν ενεργοποιεί αλλαγή παρόχου σε καμία διαμόρφωση που δοκιμάστηκε (Ενότητα 7.8).

Μια προηγούμενη ανάγνωση απέδιδε τη βελτίωση του λόγου αιχμής προς μέσο όρο σε αποσυγχρονισμό της αναβολής μεταξύ παρόχων. Ο ισχυρισμός αυτός διατυπώθηκε και δεν επιβίωσε του δικού του σκέλους ελέγχου (Ενότητα 7.10), και η αντιστροφή αυτή είναι μέρος όσων αναφέρω. Η συνεισφορά διατυπώνεται επομένως καλύτερα σε τρία μέρη και όχι σε ένα: ο μηχανισμός τιμολόγησης και αναβολής εξομαλύνει από μόνος του τη συνολική μεταβλητότητα του φορτίου του τροφοδότη· ο ανταγωνισμός μεταξύ παρόχων περικλύπει επιπλέον την ταυτόχρονη αιχμή με μικρότερη επιβάρυνση κόστους από ό,τι ένα μονοπάτι χωρίς δοσομέτρηση, μέσω του ίδιου αποδόσιμου καναλιού τιμής και της ίδιας επίδρασης δόσης στον όγκο αναβεβλημένης ενέργειας, και όχι μέσω κάποιου μηχανισμού χρονισμού αποκλειστικού του ανταγωνισμού· και η δόση αυτή παραδίδεται από τον ανταγωνισμό δομικά, μέσω ενός κανόνα επιμερισμού του οποίου τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα, και όχι επειδή ο ανταγωνισμός συντονίζει την αναβολή με τρόπο που δεν θα μπορούσε να αναπαραγάγει ένας εξισωμένος συντελεστής. Η βελτίωση του συντελεστή μεταβλητότητας δεν αποδίδεται στον ανταγωνισμό.

Το κόστος αυτής της σταθερότητας είναι μετρημένο, αλλά το αν αξίζει δεν είναι ερώτημα που μπορεί να διευθετήσει η προσομοίωση. Στην προεπιλεγμένη διαμόρφωση το μέσο κόστος ανά πράκτορα αυξάνεται κατά 6.0 τοις εκατό ενώ βελτιώνονται και οι δύο υπομετρικές της μετρικής 3. Δεν θα υποστηρίξω ότι η ανταλλαγή αυτή είναι προφανώς συμφέρουσα: πρόκειται για κρίση αξίας ενός χρήστη, ενός ρυθμιστή ή ενός σχεδιαστή αγοράς. Αυτό που δείχνουν τα δεδομένα είναι ότι η επιβάρυνση κόστους και το όφελος ευστάθειας κινούνται μαζί, αφού και τα δύο συρρικνώνονται όσο αυξάνεται το k . Στο $k = 2.0$ η επιβάρυνση έχει πέσει σε περίπου +0.9 έως +1.5 τοις εκατό, αλλά το όφελος στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο έχει ήδη αντιστραφεί σε ζημία και απομένει βελτίωση μερικών δεκάτων του τοις εκατό στον συντελεστή μεταβλητότητας. Δεν θα χαρακτηρίζα το $k = 2.0$ καλό σημείο λειτουργίας, μόνο το σημείο όπου η επιβάρυνση κόστους είναι η μικρότερη και το επιχείρημα ευστάθειας για να πληρωθεί το ασθενέστερο.

8.3 Δύο περιβάλλουσες: το κατώφλι k και ο όγκος αναβεβλημένης ενέργειας

Οι δύο περιβάλλουσες δεν είναι το ίδιο εύρημα που βρέθηκε δύο φορές. Η περιβάλλουσα του κατωφλίου k διέπει το πόσο συχνά ενεργοποιείται ο μηχανισμός, δηλαδή τον ρυθμό ενεργοποίησης. Η περιβάλλουσα του όγκου διέπει το πόσο φορτίο μετακινείται μόλις ο μηχανισμός ενεργοποιηθεί. Η δεύτερη βρέθηκε αργότερα, από τη σάρωση των δομικών συντελεστών D9 (Ενότητα 7.12), με το k και το πλήθος παρόχων σταθερά και μεταβλητούς μόνο τους τρεις συντελεστές που καθορίζουν πόσο φορτίο αναβάλλεται.

Μια διαμόρφωση θα μπορούσε καταρχήν να βρίσκεται εντός της μιας περιβάλλουσας και εκτός της άλλης. Ένα υψηλό k με πολύ μεγάλο μερίδιο αναβαλλόμενης ζήτησης θα ενεργοποιούσε σπάνια τον μηχανισμό αλλά θα μετακινούσε μεγάλο όγκο στις ώρες που ενεργοποιείται, ενώ ένα χαμηλό k με ελάχιστο μερίδιο αναβαλλόμενης ζήτησης θα ενεργοποιούσε συχνά και θα μετακινούσε ελάχιστα κάθε φορά. Ούτε η κύρια σάρωση ούτε η D9 δοκίμασαν τους συνδυασμούς όπου οι δύο περιβάλλουσες θα μπορούσαν να αποκλίνουν, για παράδειγμα $k = 0.5$ διασταυρωμένο με μερίδιο αναβαλλόμενης ζήτησης 0.30. Η ειλικρινής διατύπωση του αποτελέσματος στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο είναι επομένως υπό όρους δύο πραγμάτων που ισχύουν ταυτόχρονα και όχι ενός.

Οι δύο όροι είναι πλέον μετρημένοι. Το κατώφλι πρέπει να βρίσκεται στο δικό του ενεργό εύρος, περίπου από 0.5 έως 1.5 για πλήθος παρόχων 3 ή περισσότερους και στενότερο για πλήθος παρόχων 2, και ο προκύπτων όγκος αναβεβλημένης ενέργειας πρέπει να βρίσκεται κάτω από το σημείο μετάβασης του εκάστοτε ορίου αποπληρωμής, δηλαδή σε μια ζώνη περίπου από 45000 έως 58000 kWh ανά έτος, περίπου 5.3 έως 6.8 τοις εκατό της ετήσιας εξυπηρετούμενης ενέργειας του πληθυσμού. Η

παραδιδόμενη βαθμονόμηση αναβάλλει 38822 kWh ανά έτος, εντός της ευνοϊκής περιοχής και περίπου 22 τοις εκατό κάτω από το δικό της σημείο μετάβασης, τα 50083 kWh ανά έτος. Η θέση αυτή μοιάζει με ρυθμισμένη θέση, και η ευλικρινής υπεράσπισή της είναι χρονική και όχι μαγική: οι τρεις συντελεστές καθορίστηκαν στην D7 πριν καν υπάρξει η σάρωση D9 και δεν προσαρμόστηκαν ποτέ ως απόκριση σε αυτήν, οπότε η ευνοϊκή θέση είναι τυχερή και όχι επικυρωμένη.

Στην περιβάλλουσα του όγκου προσαρτάται ένας περιορισμός πληθυσμού που ανήκει εδώ. Η ζώνη μετάβασης είναι ιδιότητα αυτού του συγκεκριμένου, μέγιστα συγχρονισμένου πληθυσμού και προφίλ ζήτησης, όχι σταθερά ανεξάρτητη πληθυσμού. Ένας συμπεριφορικά πιο ποικιλόμορφος πληθυσμός θα ανέβαλλε εύλογα διαφορετικό όγκο στις ίδιες τιμές των συντελεστών, καθώς ένα πιο απλωμένο προφίλ ζήτησης αλλάζει και τις ώρες στις οποίες διασχίζεται το κατώφλι και το μέγεθος της υπέρβασης. Η ποιοτική μορφή του αποτελέσματος, ένα ανεστραμμένο U με πραγματικό σημείο μετάβασης από όφελος σε ζημία, εξαρτώμενο από το όριο αποπληρωμής και όχι σταθερό ακόμη και εντός αυτής της μίας προσομοίωσης, είναι πιθανότερος υποψήφιος για γενίκευση από ό,τι οι συγκεκριμένοι όγκοι μετάβασης.

8.4 Τι διευθετεί και τι δεν διευθετεί ο έλεγχος εξισωμένης δόσης

Ο έλεγχος κατανομής της προσαύξεσης (D10, Ενότητα 7.10) διευθετεί το ερώτημα του καναλιού: εντός σταθερού k , ο πραγματοποιημένος όγκος αναβεβλημένης ενέργειας διατάσσει την επίδραση στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, ενώ η διασπορά της προσαύξεσης μεταξύ παρόχων δεν τη διατάσσει. Η σωστή διατύπωση είναι επομένως αυτή του μεγέθους: ο επιμερισμός της χρέωσης σε περισσότερους παρόχους μειώνει την προσαύξεση, και άρα τον όγκο που αναβάλλουν οι πελάτες κάθε παρόχου, και είναι αυτός ο μικρότερος όγκος που περικόπτει την ταυτόχρονη αιχμή. Αυτό διευθετεί το ερώτημα για τη συγκεκριμένη σχεδίαση στους συγκεκριμένους συντελεστές, αλλά δεν δείχνει ότι μια αποσυγχρονισμένη απόκριση ζήτησης δεν μπορεί να κουρέψει μια ταυτόχρονη αιχμή όταν το έναυσμα της σπανιότητας δεν είναι κοινό μέγεθος σε επίπεδο τροφοδότη, αφού τέτοιον μηχανισμό η εργασία αυτή δεν τον κατασκεύασε.

Το μονοπώλιο εξισωμένης δόσης (D11, Ενότητα 7.14) διευθετεί ένα δεύτερο, στενότερο ερώτημα, και δηλώνεται ακριβώς σε αυτό το πλάτος. Διευθετεί ότι ο ανταγωνισμός δεν είναι αναγκαίος για το αποτέλεσμα στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο σε αυτή τη σχεδίαση, σε συγκρίσιμο πραγματοποιημένο όγκο αναβεβλημένης ενέργειας και με μικρότερη επιβάρυνση κόστους για τον καταναλωτή από ό,τι η ίδια αγορά. Η αναπαραγωγή δηλώνεται εντός της ζώνης θορύβου σε επίπεδο σπόρου τυχαιότητας (διάστημα εμπιστοσύνης από -1.467 έως +0.178 ποσοστιαίες μονάδες, Ενότητα 7.14) και όχι ως ταυτότητα: μια μη σημαντική κατά ζεύγη διαφορά σε 30 σπόρους δεν αποκλείει πραγματική διαφορά. Δεν διευθετεί ότι ένα πραγματικό μονοπώλιο θα συμπεριφερόταν έτσι, αφού τίποτε εκτός αυτού του μοντέλου δεν κάνει έναν μονοπωλητή να μετακυλίζει το ένα τρίτο του σήματος που λαμβάνει· ο διαιρέτης είναι τεχνητό σκέλος ελέγχου μόνο για την ανάλυση, χωρίς ερμηνεία αγοράς. Δεν αποδυναμώνει τη βελτίωση του λόγου αιχμής προς μέσο όρο, η οποία παραμένει αμετάβλητη, και δεν επανεξετάζει την αναλλοίωτη συμπεριφορά του συντελεστή μεταβλητότητας ως προς το πλήθος παρόχων.

Ένα εύρημα εις βάρος του ισχυρισμού καταγράφεται επίσης: η εξίσωση της δόσης είναι καλή στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο και μετρήσιμα ατελής στον συντελεστή μεταβλητότητας. Ο μονοπωλητής αναβάλλει περίπου 7 τοις εκατό μικρότερο όγκο από ό,τι το πλήθος παρόχων 3, και ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι αρκετά ευαίσθητος ώστε να διακρίνει αυτό το υπολειπόμενο κενό, ενώ ο λόγος

αιχμής προς μέσο όρο δεν είναι. Δεν πρόκειται για δεύτερο κανάλι, και ο προδηλωμένος κανόνας ανάγνωσης της D11 είναι διατυπωμένος σε όρους λόγου αιχμής προς μέσο όρο και δεν επηρεάζεται.

8.5 Ο συντελεστής μετακύλισης, επαναδιατυπωμένος

Ο συντελεστής μετακύλισης είναι συντελεστής ισχύος σήματος και όχι συντελεστής χρέωσης σε ευρώ ανά kWh. Κλιμακώνει ένα αδιάστατο μερίδιο συνεισφοράς, έναν αριθμό μεταξύ 0 και 1, σε ένα προσθετικό στοιχείο τιμής του επόμενου βήματος. Διαστατικά το γινόμενο πρέπει να φέρει ευρώ ανά kWh, και αυτό το μισό του ζητήματος το παραδέχομαι ρητά: αν το μερίδιο είναι καθαρός αριθμός, ο συντελεστής που το πολλαπλασιάζει φέρει ο ίδιος τις μονάδες. Αυτό που δεν είναι ο συντελεστής είναι τιμολογιακός συντελεστής χρέωσης, γιατί δεν βαθμονομείται έναντι καμίας τιμής εμπορεύματος ή τιμολογίου και αποτελεί εντελώς ξεχωριστό μέγεθος από τον πραγματικό συντελεστή χρέωσης ανά kWh υπέρβασης, με τον οποίο δεν πρέπει να συγκρίνεται σαν να ήταν το ίδιο είδος μεγέθους. Η διάκριση δεν είναι τεχνική λεπτομέρεια: διαβάζοντας τη μετακύλιση ως τιμολογιακό συντελεστή θα δηλωνόταν λανθασμένα τι σημαίνει ο αριθμός και θα καλούσε σε σύγκριση με πραγματικά λιανικά τιμολόγια σε ευρώ ανά kWh, τα οποία ποτέ δεν κλήθηκε να αναπαραστήσει.

8.6 Περιορισμοί

Λίγοι πάροχοι, κανένας με μάθηση. Η κύρια σάρωση μοντελοποιεί αγορά από 2 έως 5 παρόχους, κανένας από τους οποίους δεν μαθαίνει. Τα συμπεράσματα για τον ανταγωνισμό μεταξύ παρόχων είναι συμπεράσματα για αυτόν τον μικρό πληθυσμό σταθερών κανόνων και όχι ισχυρισμός για αγορές με πολλούς ανεξάρτητους λιανοπωλητές.

Μόνο προσομοίωση. Δεν συλλέχθηκαν και δεν προσαρμόστηκαν στο μοντέλο δεδομένα πεδίου για την πραγματική συμπεριφορά παρόχων ή καταναλωτών. Κάθε επίδραση που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 7 είναι ιδιότητα των κανόνων και της βαθμονόμησης αυτής της προσομοίωσης, όχι επικυρωμένη πρόβλεψη για πραγματικό τροφοδότη.

Η χρέωση χωρητικότητας είναι τιμολογιακό σήμα, όχι φυσικός περιορισμός δικτύου. Τίποτε στο μοντέλο δεν αναπαριστά θερμικό όριο γραμμής, περιορισμό τάσης, συχνότητα ή επίλυση ροής ισχύος. Η λέξη ευστάθεια σημαίνει εδώ το στατιστικό σχήμα μιας υπολογισμένης σειράς καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη, δηλαδή ένα υποκατάστατο μέτρο εντός της εμβέλειας του μοντέλου, και όχι επαληθευμένο περιθώριο λειτουργικής ασφάλειας από μελέτη ροής φορτίου. Ο περιορισμός εμβέλειας δηλώνεται εξαρχής και δεν ανακαλύφθηκε εκ των υστέρων.

Κλίμακα χαμηλής τάσης (XT). Ο πληθυσμός είναι 200 πράκτορες σε έναν μόνο προσομοιωμένο τροφοδότη, δηλαδή μία γειτονιά. Τίποτε από όσα αναφέρονται εδώ δεν έχει δοκιμαστεί σε κλίμακα υποσταθμού διανομής ή ευρύτερη.

Φραγμένη επίδραση ευελιξίας ζήτησης, εξαρτώμενη από περιβάλλουσα, σε δύο ανεξάρτητες διαστάσεις. Το όφελος στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο αντιστρέφεται έξω από την περιβάλλουσα του κατωφλιού και, ανεξάρτητα, πάνω από το σημείο μετάβασης στον όγκο αναβεβλημένης ενέργειας που ορίζει το ίδιο το όριο αποπληρωμής (Ενότητα 8.3). Η παραδιδόμενη βαθμονόμηση κάθεται εντός της ευνοϊκής περιοχής και στις δύο διαστάσεις, αλλά η θέση της αναφέρεται ως τυχερή και όχι ως επικυρωμένη. Έξω από οποιαδήποτε από τις δύο περιβάλλουσες, ο μηχανισμός όπως βαθμονομείται εδώ δεν παραδίδει άνευ όρων βελτίωση σε αυτή την υπομετρική.

Η επίδραση στη μετρική 4 είναι αμελητέα όπως παρατηρείται. Ο μηχανισμός δεν κατασκευάστηκε για να μετακινήσει την αυτάρκεια των παραγωγοκαταναλωτών και δεν τη μετακινεί σε αξιόλογο βαθμό: η μεγαλύτερη κατά ζεύγη μεταβολή σε ολόκληρο το πλέγμα είναι -0.374 τοις εκατό.

Η αλλαγή παρόχου στη βάση αναφοράς είναι σχεδόν μηδενική στα πλήθη παρόχων 3 και 5, συνεπώς με τη μεροληψία υπέρ της υπάρχουσας κατάστασης της D1, ενώ η κινητικότητα στο πλήθος παρόχων 2, περίπου 21 τοις εκατό, είναι τεχνούργημα ορίου από την αφαίρεση της κατηγορίας του πράσινου παρόχου και όχι αποτέλεσμα προς γενίκευση.

Το πλήθος παρόχων 5 είναι ονομαστικά πέντε πάροχοι αλλά ουσιαστικά τρεις έως τέσσερις, με μέσο όρο 3.625 ενεργών παρόχων με θετικό μερίδιο φορτίου. Οι σχεδόν υποκατάστατοι διπλότυποι πάροχοι δεν προσθέτουν, σε αυτό το μοντέλο, ανταγωνισμό ανάλογο του πλήθους τους.

Το σκέλος του μονοπωλίου και ο έλεγχος εξισωμένης δόσης εκτελέστηκαν στο ίδιο σταθερό μέγεθος πληθυσμού και στους ίδιους δομικούς συντελεστές με την υπόλοιπη σάρωση, οπότε χαρακτηρίζουν τον διαχωρισμό μηχανισμού και ανταγωνισμού αυτού του συγκεκριμένου μοντέλου και όχι μια γενική δήλωση για μονοπωλιακές λιανικές αγορές. Ο διαιρέτης που παράγει την εξισωμένη δόση είναι τεχνητό σκέλος ελέγχου μόνο για την ανάλυση, χωρίς ερμηνεία αγοράς, αφού υπό τον παραδιδόμενο κανόνα επιμερισμού ένας μονοπωλητής δεν μπορεί να επιλέξει να μετακυλίσει μόνο ένα κλάσμα του σήματος που λαμβάνει.

Η διόρθωση πολλαπλών συγκρίσεων ήταν δηλωμένο κενό προηγούμενου σχεδίου και έχει πλέον κλείσει και όχι απλώς δηλωθεί (Ενότητα 7.11). Ο εναπομένον ειλικρινής περιορισμός είναι στενότερος: η διόρθωση καλύπτει τις κατά ζεύγη συγκρίσεις που πραγματικά υπολογίζει αυτή η διαδικασία ανάλυσης, όχι κάθε νοητή σύγκριση που θα μπορούσε να κατασκευαστεί από τα ακατέργαστα δεδομένα της σάρωσης, και η επιλογή του ποιες αντιπαραβολές ανήκουν στην πρωτεύουσα οικογένεια ελέγχων είναι κρίση, η οποία δηλώνεται ρητά και αναφέρεται και με τους δύο τρόπους για λόγους ελεγχσιμότητας, όχι γεγονός που καθορίζουν από μόνα τους τα δεδομένα.

Η οικιακή ζήτηση είναι εξ ορισμού ένα αντιπροσωπευτικό συνθετικό προφίλ ζήτησης και όχι μετρημένη ζήτηση, και κάθε αριθμός της πλευράς ζήτησης υπολογίζεται πάνω σε αυτό. Ο έλεγχος με πραγματική, μετρημένη σειρά OPSD επιβιώνει (Ενότητα 7.13), αλλά επανεκτελέστηκε μόνο ένα κελί του πλέγματος και όχι ολόκληρη η σάρωση, οπότε η συνθετική σειρά παραμένει η προεπιλογή και ο χαρακτηρισμός των περιβαλλουσών σε k και σε πλήθος παρόχων παραμένει αποτέλεσμα συνθετικής ζήτησης. Η μεγαλύτερη βελτίωση στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο υπό μετρημένη ζήτηση, ενώ ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται λιγότερο από ό,τι υπό συνθετική ζήτηση, δεν πρέπει να διαβαστεί ως καθαρότερος μηχανισμός: η βάση αναφοράς της OPSD είναι 2.8 φορές πιο αιχμηρή πριν καν ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός, επειδή η σειρά χτίζεται από δύο μόνο συναθροισμένα νοικοκυριά, οπότε μεγάλο μέρος της οφείλεται σε αιχμηρότερο σημείο εκκίνησης που δίνει στον μηχανισμό περισσότερα περιθώρια.

Ένα και μόνο επαναλαμβανόμενο μετεωρολογικό έτος PVGIS υπόκειται κάθε ηλιακής εισόδου της εργασίας. Η μεταβλητότητα του καιρού από έτος σε έτος δεν αναπαρίσταται: ο ορίζοντας των 8760 ωρών χρησιμοποιεί το έτος αυτό μία φορά, αλλά οποιαδήποτε εκτέλεση μεγαλύτερη του έτους θα επαναλάμβανε αυτούσιο τον ίδιο καιρό αντί να δειγματοληπτεί άλλο πραγματικό έτος. Η διακύμανση μεταξύ σπόρων τυχαιότητας προέρχεται από τη δειγματοληψία παραμέτρων ανά πράκτορα, από τη στοχαστική διαδρομή τιμών του μεταβλητού παρόχου και από τη διατάραξη των διπλότυπων παρόχων στο πλήθος παρόχων 5, όχι από μεταβολή των υποκειμένων δεδομένων.

Ο προσομοιωμένος πληθυσμός δεν έχει σχεδόν καθόλου ποικιλομορφία στο πότε κορυφώνονται τα μέλη του, και αυτό βαραίνει άμεσα το κύριο μέγεθος αντί να είναι ζήτημα καλλωπιστικού ρεαλισμού. Το Παράρτημα Α μετρά τον συντελεστή ταυτοχρονισμού του τροφοδότη στο 0.951, έναντι περίπου 0.3 έως 0.8 σε συνθετικά, όχι μετρημένα, δεδομένα πολλών νοικοκυριών NREL SMART-DS [10] και 0.164 υπό το καθιερωμένο μοντέλο σχεδιασμού δικτύων του Rusk σε αυτό το μέγεθος ομάδας [11], το οποίο παρατίθεται εκ δευτέρου μέσω του [12]. Η αιτία είναι η D4: κάθε πράκτορας μοιράζεται ένα ντετερμινιστικό προφίλ ζήτησης και διαφέρει μόνο στο πλάτος, οπότε και οι 200 πράκτορες κορυφώνονται ουσιαστικά την ίδια ώρα εκ κατασκευής. Δύο συνέπειες προκύπτουν. Πρώτον, ένας πληθυσμός χωρίς χρονική ποικιλομορφία παράγει οξύτερο συναθροιστικό προφίλ, το οποίο διογκώνει μηχανικά τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο σε σχέση με έναν συμπεριφορικά ποικιλόμορφο πληθυσμό ίδιου μεγέθους. Δεύτερον, και σημαντικότερο, το κανάλι του μηχανισμού σε αυτή τη μετρική είναι ο όγκος της ενέργειας που αναβάλλεται εκτός της ώρας της ταυτόχρονης αιχμής και όχι κάποια επίδραση αποσυγχρονισμού μεταξύ παρόχων, οπότε ένας μέγιστα συγχρονισμένος πληθυσμός συμπυκνώνει τον μεγαλύτερο δυνατό αναβεβλημένο όγκο σε μία κοινή ώρα αιχμής, ακριβώς τον πληθυσμό στον οποίο το κούρεμα εκείνης της ώρας παράγει το πιο ορατό όφελος. Οι βελτιώσεις στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο πρέπει επομένως να διαβάζονται ως άνω φράγμα για έναν συμπεριφορικά ποικιλόμορφο πληθυσμό και όχι ως μεταφέρσιμη εκτίμηση. Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι λιγότερο εκτεθειμένος σε αυτό, αφού συνοψίζει ολόκληρη τη σειρά, δεν είναι όμως ούτε αυτός άτρωτος.

Σχετικά με το προηγούμενο, ο προσομοιωμένος τροφοδότης κορυφώνεται τον χειμώνα, ενώ η πραγματική αιχμή του ελληνικού συστήματος είναι θερινό γεγονός οδηγούμενο από τον κλιματισμό, με 10.5 GW τον Αύγουστο του 2021 [13]. Η γεννήτρια ζήτησης έχει εποχικό όρο τύπου θέρμανσης και κανένα φορτίο ψύξης, ενώ το μοντέλο δεν περιέχει καθόλου φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων ή αντλιών θερμότητας. Το Παράρτημα Α βαθμολογεί τον τροφοδότη ως μερικώς εύλογο σε αυτή τη βάση: ρεαλιστικό στην ενεργειακή κλίμακα του νοικοκυριού, επιβεβαιωμένο στον χρονισμό της ημερήσιας αιχμής έναντι του ενός από τα δύο σημεία αναφοράς του αλλά όχι του άλλου, καθώς η αιχμή στις 20:00 πέφτει εντός της ελληνικής Περιόδου Μέγιστης Ζήτησης Συστήματος, 19:00 έως 24:00 για τον Απρίλιο έως τον Αύγουστο [14], αλλά εκτός της βρετανικής βραδινής περιόδου αιχμής εργάσιμης ημέρας, 16:00 έως 18:50, όπως την ορίζουν οι Torriti et al. [15], και μη ρεαλιστικό στη χρονική ποικιλομορφία και στο ποια εποχή φέρει την ετήσια αιχμή.

8.7 Η ειλικρινής συνολική εικόνα

Εντός της χαρακτηρισμένης περιβάλλουσας λειτουργίας του, το κανάλι τιμολόγησης και αναβολής βελτιώνει μετρήσιμα την ευστάθεια του τροφοδότη: ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται σε κάθε k που δοκιμάστηκε και ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο βελτιώνεται εντός της περιβάλλουσας που περιγράφει η Ενότητα 8.3 για τρεις ή περισσότερους παρόχους. Έξω από την περιβάλλουσα αυτή, στα υψηλά k , η υπομετρική του λόγου αιχμής προς μέσο όρο χειροτερεύει, επειδή η φραγμένη αποπληρωμή ενός μικρού αναβεβλημένου όγκου σπρώχνει το ετήσιο μέγιστο της σειράς προς τα πάνω αντί προς τα κάτω.

Δεν πρόκειται για μηχανισμό που βελτιώνει καθολικά την ευστάθεια του δικτύου, και η εργασία αυτή δεν ισχυρίζεται ότι πρόκειται. Πρόκειται για μηχανισμό του οποίου η περιβάλλουσα λειτουργίας έχει μετρηθεί και αναφερθεί απλά, βελτιώσεις και αντιστροφές εξίσου. Η σάρωση των δομικών συντελεστών οξύνει την ίδια τριμερή εικόνα αντί να την αλλάζει: η βελτίωση του συντελεστή μεταβλητότητας είναι σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη και από το πλήθος παρόχων και από τους συντελεστές της ίδιας της απόκρισης αναβολής, με στενή εξαίρεση 4 από τα 48 κελιά συντελεστών, όλα στο υψηλότερο δοκιμασμένο επίπεδο του μεριδίου αναβαλλόμενης ζήτησης, που φτάνουν το πολύ σε

2.90 τοις εκατό επιδείνωση (Ενότητα 7.12), ενώ το κούρεμα της ταυτόχρονης αιχμής απαιτεί δύο περιβάλλουσες ταυτόχρονα, με τη θέση της παραδιδόμενης βαθμονόμησης εντός της δεύτερης να μην είναι γνωστή, ούτε σχεδιασμένη, όταν καθορίστηκαν οι συντελεστές.

8.8 Επίλογος

Το κεφάλαιο διάβασε τα αποτελέσματα σε δύο μισά. Στηρίζονται η καθαρή απομόνωση των δύο καναλιών, η εξομάλυνση της συνολικής μεταβλητότητας από τον ίδιο τον μηχανισμό και το κούρεμα της ταυτόχρονης αιχμής υπό ανταγωνισμό με μικρότερη επιβάρυνση κόστους από ό,τι ένα μονοπώλιο χωρίς δοσομέτρηση, υπό τους όρους δύο μετρημένων περιβαλλουσών. Ο έλεγχος εξισωμένης δόσης δείχνει ότι ο ανταγωνισμός είναι ικανός και όχι αναγκαίος για το κούρεμα της ταυτόχρονης αιχμής. Οι δεκατέσσερις περιορισμοί, με πρώτον σε βαρύτητα τον συντελεστή ταυτοχρονισμού, οριοθετούν πόσο μακριά μεταφέρονται τα μεγέθη αυτά.

Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

9.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό κλείνει την εργασία. Επαναδιατυπώνει τη συνεισφορά όπως τελικά υλοποιήθηκε, διατυπώνει συμπυκνωμένα το κεντρικό εύρημα στην ακριβή, τριμερή μορφή του και μαζί με τους όρους υπό τους οποίους ισχύει, εξηγεί τι απέδωσε πρακτικά το πλαίσιο καινοτομίας που καθοδήγησε κάθε επιλογή σεναρίου ή σχεδίασης εντός του σταθερού πλαισίου της εργασίας, και καταγράφει τις κατευθύνσεις που η ίδια η εργασία αφήνει ανοιχτές. Δεν εισάγεται εδώ κανένα νέο αριθμητικό αποτέλεσμα: κάθε μέγεθος που αναφέρεται έχει ήδη παρουσιαστεί ως μετρημένο στο Κεφάλαιο 7, η ερμηνεία του ανήκει στο Κεφάλαιο 8, και οι λεπτομέρειες των σκελών ελέγχου παραμένουν εκεί όπου μετρήθηκαν.

9.2 Η συνεισφορά, επαναδιατυπωμένη

Η παρούσα εργασία κατασκεύασε μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη πάνω σε έναν μικρό πληθυσμό ανταγωνιζόμενων λιανικών παρόχων σταθερών κανόνων, χωρισμένη σε δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμα κανάλια ανάδρασης: ένα λογιστικό κανάλι, που χρεώνει μόνο το καθολικό του υπεύθυνου παρόχου και εξ κατασκευής δεν μπορεί να μετακινήσει κανένα φυσικό μέγεθος, και ένα κανάλι τιμολόγησης, που μετατρέπει τον ίδιο επιμερισμό σε προσαύξηση επόμενου βήματος στην προσφερόμενη τιμή του συγκεκριμένου παρόχου. Το κανάλι τιμολόγησης συζεύχθηκε με έναν τιμοευσίσθητο, χωρίς πρόβλεψη και με διατήρηση ενέργειας κανόνα ενδοημερήσιας αναβολής ζήτησης, εφαρμοσμένο σε ολόκληρο τον πληθυσμό πρακτόρων και όχι μόνο στη μειοψηφία των παραγωγοκαταναλωτών.

Σε κανένα σημείο δεν χρησιμοποιήθηκε ενισχυτική μάθηση και σε κανένα σημείο δεν μοντελοποιήθηκε φυσική του δικτύου, δηλαδή ροή ισχύος, τάση ή όρια γραμμών. Η χρέωση είναι τιμολογιακή και λογιστική κατασκευή, όχι αναπαράσταση φυσικής χωρητικότητας του δικτύου, και αξιολογείται έναντι τεσσάρων μετρικών, του μέσου κόστους, της κατανομής φορτίου, της ευστάθειας του δικτύου και της αυτάρκειας των παραγωγοκαταναλωτών, οι οποίες υπολογίζονται απευθείας από την προσομοιωμένη κατάσταση των πρακτόρων και του τροφοδότη.

Επειδή τα δύο κανάλια ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται ανεξάρτητα, το μοντέλο μπορεί να απομονώσει ποιο από τα δύο, αν κάποιο, μετακινεί πράγματι τη φυσική μετρική ευστάθειας. Αυτή η απομόνωση είναι το πρώτο μετρημένο αποτέλεσμα της εργασίας (Ενότητα 7.2), και είναι ο λόγος για τον οποίο η αιτιώδης απόδοση του ευρήματος στο κανάλι τιμής δεν στηρίζεται σε επιχείρημα αλλά σε αφαιρετική διαμόρφωση. Ο συντελεστής μετακύλισης που κλιμακώνει την προσαύξηση παραμένει συντελεστής ισχύος σήματος και όχι τιμολογιακός συντελεστής σε ευρώ ανά kWh, με την έννοια που αναλύεται στην Ενότητα 8.5.

9.3 Κεντρικό εύρημα

Το ειλικρινές κεντρικό εύρημα είναι τριμερές. Πρώτον, ο μηχανισμός τιμολόγησης και αναβολής εξομαλύνει από μόνος του τη συνολική μεταβλητότητα του φορτίου του τροφοδότη. Δεύτερον, ο ανταγωνισμός των παρόχων περικόπτει επιπρόσθετα την ταυτόχρονη αιχμή του τροφοδότη με μικρότερη επιβάρυνση κόστους από ό,τι ένα μονοπώλιο χωρίς δοσομέτρηση, μέσω του ίδιου αποδιδόμενου καναλιού τιμής και της ίδιας επίδρασης δόσης στον όγκο αναβεβλημένης ενέργειας, και όχι μέσω κάποιου μηχανισμού χρονισμού που να ανήκει αποκλειστικά στον ανταγωνισμό. Τρίτον, η

δότη αυτή παραδίδεται από τον ανταγωνισμό δομικά, μέσω ενός κανόνα επιμερισμού του οποίου τα μερίδια αθροίζουν στη μονάδα, και όχι επειδή ο ανταγωνισμός συντονίζει την αναβολή με τρόπο που δεν θα μπορούσε να αναπαραγάγει ένας εξισωμένος συντελεστής.

Εντός μιας χαρακτηρισμένης περιβάλλουσας κατωφλίου, περίπου $k = 0.5$ έως 1.5 για τρεις ή περισσότερους παρόχους, το κανάλι τιμολόγησης και αναβολής παράγει μετρήσιμη βελτίωση στον συντελεστή μεταβλητότητας του τροφοδότη σε κάθε k που δοκιμάστηκε, και στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο εντός αυτού του εύρους, με επιβάρυνση κόστους που συρρικνώνεται καθώς ανεβαίνει το κατώφλι. Εκτός του εύρους αυτού το όφελος στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο αντιστρέφεται, μια οριοθετημένη παρενέργεια ενός μικρού όγκου αναβεβλημένης ενέργειας που αποπληρώνεται με περιορισμένο ρυθμό. Ο μηχανισμός δεν βελτιώνει καθολικά την ευστάθεια και η εργασία δεν ισχυρίζεται ότι το κάνει.

Η βελτίωση στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο εξαρτάται και από μια δεύτερη, ανεξάρτητη περιβάλλουσα, στον ετήσιο όγκο αναβεβλημένης ενέργειας. Το σημείο μετάβασης δεν είναι ένας αριθμός αλλά ζώνη, περίπου 45000 έως 58000 kWh/έτος (περίπου 5.3 έως 6.8 τοις εκατό της ετήσιας εξυπηρετούμενης ενέργειας του πληθυσμού), και το πού πέφτει το καθορίζει ανεξάρτητα το όριο αποπληρωμής (Ενότητα 7.12). Η ζώνη αυτή είναι ιδιότητα αυτού του συγκεκριμένου, μέγιστα συγχρονισμένου πληθυσμού και προφίλ ζήτησης, και όχι σταθερά ανεξάρτητη πληθυσμού (Ενότητα 8.3). Οι δύο πρώτες υπομετρικές δεν είναι εξίσου ανθεκτικές: στα 48 κελιά συντελεστών που δοκίμασε η D9, ο συντελεστής μεταβλητότητας βελτιώνεται στα 44, με τις μόνες εξαιρέσεις μικρές και περιορισμένες σε μία ακραία γωνία του πλέγματος που δεν καταλαμβάνει η διαμόρφωση η οποία παραδίδεται, ενώ ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο χειροτερεύει σε 9 από τα 48, με το χειρότερο μεμονωμένο κελί στο +27.01 τοις εκατό. Είναι επομένως γνήσια εύθραυστος και το πιο εύθραυστο από τα δύο κεντρικά υποαποτελέσματα της εργασίας.

Ο ανταγωνισμός είναι ικανός για τη βελτίωση του λόγου αιχμής προς μέσο όρο, όπως δείχνει η παραδιδόμενη σχεδίαση, αλλά το σκέλος ελέγχου εξισωμένης δόσης (D11) έδειξε ότι, σε αυτή τη σχεδίαση και σε αυτούς τους συντελεστές, δεν είναι αναγκαίος: ένας μονοπωλητής δοσομετρημένος στην ισχύ σήματος ανά πάροχο που παραδίδει μια αγορά τριών παρόχων, μέσω ενός διαιρέτη που είναι τεχνητό μέσο ανάλυσης χωρίς ερμηνεία αγοράς και όχι εργαλείο πολιτικής, αναπαράγει τη βελτίωση εκείνης της αγοράς στον λόγο αιχμής προς μέσο όρο εντός της ζώνης θορύβου σε επίπεδο σπόρου και σε συγκρίσιμο πραγματοποιημένο όγκο αναβεβλημένης ενέργειας, με κατά ζεύγη διαφορά -0.645 εκατοστιαίων μονάδων στο $k=0.5$ (διάστημα εμπιστοσύνης 95 τοις εκατό από -1.467 έως $+0.178$, $p=0.12$) και -0.287 στο $k=1.0$ (από -0.895 έως $+0.320$, $p=0.342$). Αυτό δεν είναι ισοδυναμία: μια μη σημαντική κατά ζεύγη διαφορά σε 30 σπόρους δεν αποκλείει πραγματική διαφορά, και η ειλικρινής σύνοψη είναι το διάστημα και όχι η σημειακή εκτίμηση (Ενότητα 7.14).

Με απλά λόγια, από τις τέσσερις μετρικές της εργασίας βελτιώνεται μόνο μία, η μετρική 3, η ευστάθεια του τροφοδότη, και το κάνει μόνο εντός μιας οριοθετημένης περιβάλλουσας k , για δε την υπομετρική του λόγου αιχμής προς μέσο όρο μόνο εντός μιας δεύτερης, ανεξάρτητα οριοθετημένης περιβάλλουσας όγκου αναβεβλημένης ενέργειας, και μόνο με τίμημα μια συρρικνούμενη αλλά μη μηδενική αύξηση του μέσου κόστους του καταναλωτή (μετρική 1). Οι μετρικές 2 και 4 παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες. Αυτό αναφέρεται ως το πλήρες αποτέλεσμα του μηχανισμού και όχι ως μερική προεπισκόπηση μιας μεγαλύτερης επίδρασης, και το αν η ανταλλαγή μιας υπό όρους βελτιωμένης μετρικής έναντι μιας μέτριας αύξησης του κόστους αξίζει είναι ρυθμιστική ή χρηστική κρίση, εκτός όσων μπορεί να διευθετήσει η προσομοίωση αυτή.

9.4 Το πλαίσιο καινοτομίας και ο τρόπος που διαμόρφωσε την εργασία

Κάθε επιλογή σεναρίου ή σχεδίασης εντός του σταθερού πλαισίου της εργασίας ακολούθησε έναν κανόνα λειτουργίας: προτιμάται η επιλογή που είναι υποεξερευνημένη στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, με τον λόγο καταγεγραμμένο και με μία ανεξάρτητη επιστημονική αιτιολόγηση προσαρτημένη. Οι αποφάσεις D1 έως D5 αφορούν τους πράκτορες: ικανοποιητική επιλογή παρόχου με αδράνεια αλλαγής, λεξικογραφικοί κανόνες ανά προφίλ αντί σταθμισμένης αθροιστικής χρησιμότητας, αντιδραστική διαχείριση μπαταρίας με σταθερό βραδινό απόθεμα, ανά πράκτορα δειγματοληπτούμενη ετερογένεια, και τιμές με βαριές ουρές για τον μεταβλητό χαμηλού κόστους πάροχο. Οι D6 έως D8 αφορούν τον μηχανισμό και τη σάρωσή του: τη χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη, την αναθεώρηση του φυσικού καναλιού από την αποθήκευση στην τιμοευαίσθητη αναβολή ζήτησης, και τη σχεδίαση της κύριας σάρωσης ευαισθησίας. Οι D9 έως D11 είναι τα σκέλη που δοκίμασαν τους ισχυρισμούς τους οποίους παρήγαγαν οι προηγούμενες αποφάσεις: η σάρωση των δομικών συντελεστών, το σκέλος ελέγχου κατανομής της προσαύξησης και το μονοπώλιο εξισωμένης δόσης.

Κατά τη δική μου εκτίμηση, η πειθαρχία αυτή απέδωσε δύο συγκεκριμένα πράγματα. Πρώτον, δύο προδηλωμένους κανόνες ανάγνωσης (D10 και D11), γραμμένους πριν γραφτεί ο κώδικας, ώστε ο τρόπος με τον οποίο θα διαβαζόταν το αποτέλεσμα να είναι καθορισμένος ανεξάρτητα από το πώς θα έβγαине. Δεύτερον, μία καταγεγραμμένη πρόβλεψη που τα δεδομένα διέψευσαν: η D9 είχε προβλέψει, πριν τρέξει η σάρωση, ότι ένα μεγάλο μερίδιο αναβαλλόμενης ζήτησης σε συνδυασμό με ένα αυστηρό όριο αποπληρωμής είναι η γωνία στην οποία θα μπορούσε να αντιστραφεί ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο. Η αλληλεπίδραση αποδείχθηκε πραγματική, αλλά η προβλεπόμενη κατεύθυνσή της ήταν αντίστροφη, και το γεγονός αναφέρεται ως διάψευση αντί να αναθεωρηθεί σιωπηρά. Κανένας συντελεστής δεν άλλαξε ως απόκριση σε αυτό. Το ημερολόγιο αποφάσεων δεν προβάλλεται ως συνεισφορά στη μεθοδολογία: είναι η πειθαρχία εργασίας του ίδιου του έργου.

9.5 Μελλοντική εργασία

Τέσσερις επεκτάσεις προκύπτουν άμεσα από τους περιορισμούς που συζητούνται στο Κεφάλαιο 8. Πρώτη, κατηγορικά διαφοροποιημένοι πάροχοι, δηλαδή περισσότερα από ένα ρυθμιζόμενα, μεταβλητά ή πράσινα αρχέτυπα ταυτόχρονα, ώστε το πλήθος παρόχων να μπορεί να αυξηθεί χωρίς να στηρίζεται σε σχεδόν υποκατάστατα αντίγραφα. Αυτό αντιμετωπίζει άμεσα το κενό ανάμεσα στο ονομαστικό και στο ενεργό πλήθος παρόχων που παρατηρήθηκε στο πλήθος παρόχων 5.

Δεύτερη, μετρημένα δεδομένα ζήτησης για τον συγκεκριμένο πληθυσμό που μοντελοποιείται. Αυτό είναι πλέον εν μέρει υλοποιημένο και όχι καθαρά μελλοντική εργασία: μια πραγματική, μετρημένη σειρά OPSD διατίθεται μαζί με τη συνθετική, το κεντρικό κελί της κύριας σάρωσης εκτελέστηκε ξανά υπό αυτήν κατά ζεύγη ανά σπόρο, και το εύρημα της μετρικής 3 επιβιώνει (Ενότητα 7.13). Αυτό που απομένει ως μελλοντική εργασία είναι στενότερο: τα νοικοκυριά του OPSD είναι γερμανικά και όχι αντιπροσωπευτικά της Θεσσαλονίκης, εκτελέστηκε ξανά μόνο ένα κελί του πλέγματος και όχι ολόκληρη η σάρωση, και η αλλαγή της σειράς δεν θίγει τον περιορισμό του συντελεστή ταυτοχρονισμού. Μια γνήσια ανά πράκτορα μετρημένη σειρά ζήτησης, αντί για σειρά κλιμακωμένη κατά πλάτος ανά πράκτορα, κατά προτίμηση ελληνική και κατά προτίμηση συνδυασμένη με πολλαπλά μετεωρολογικά έτη και έτη ζήτησης ώστε να αρθεί και ο περιορισμός του ενός επαναλαμβανόμενου έτους στην ηλιακή είσοδο, είναι η επέκταση που θα έκλεινε και τα δύο κενά ταυτόχρονα.

Τρίτη, μεγαλύτερος πληθυσμός πρακτόρων, ώστε να ελεγχθεί αν οι επιδράσεις που μετρήθηκαν στους 200 πράκτορες παραμένουν, ενισχύονται ή εξασθενούν σε κλίμακα ομάδας τροφοδοτών ή υποσταθμού διανομής.

Τέταρτη, ένα ρητό μοντέλο φυσικής του τροφοδότη, έστω απλοποιημένο, όπως ένα θερμικό όριο γραμμής ή μια προσέγγιση πτώσης τάσης, ώστε η «ευστάθεια» να μπορεί κάποτε να ελεγχθεί έναντι πραγματικού λειτουργικού περιορισμού και όχι μόνο έναντι του στατιστικού σχήματος μιας υπολογισμένης σειράς καθαρής εισαγωγής. Παράλληλα με αυτό, ενδογενής ευελιξία, δηλαδή να αφαιρούν οι ίδιοι οι συντελεστές αναβολής να αποκρίνονται σε παρατηρούμενες συνθήκες αντί να κρατούνται σταθερές δομικές παράμετροι, θα επέτρεπε σε μια μελλοντική επέκταση να ελέγξει αν η ενεργή περιβάλλουσα λειτουργίας που βρέθηκε εδώ μπορεί να διευρυνθεί και όχι μόνο να χαρακτηριστεί.

9.6 Επίλογος

Η εργασία κατασκεύασε μια χρέωση σπανιότητας κοινού τροφοδότη με δύο ανεξάρτητα αφαιρέσιμα κανάλια και ένα τιμοευαίσθητο κανάλι αναβολής ζήτησης, και μέτρησε την επίδρασή της σε τέσσερις μετρικές πάνω σε έναν πληθυσμό πρακτόρων σταθερών κανόνων, χωρίς ενισχυτική μάθηση και χωρίς μοντέλο φυσικής δικτύου. Το μετρημένο αποτέλεσμα είναι μία βελτιωμένη μετρική, η ευστάθεια του τροφοδότη, με τίμημα μια συρρικνούμενη αλλά μη μηδενική αύξηση του μέσου κόστους, και εξαρτάται από δύο περιβάλλουσες ταυτόχρονα: το κατώφλι k και, για τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο, τον ετήσιο όγκο αναβεβλημένης ενέργειας. Οι επεκτάσεις που καταγράφηκαν παραπάνω προκύπτουν άμεσα από τους περιορισμούς που συζητούνται στο Κεφάλαιο 8, και από αυτές η ενδογενής ευελιξία είναι εκείνη που θα επέτρεπε να ελεγχθεί αν η ενεργή περιβάλλουσα λειτουργίας μπορεί να διευρυνθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. Ketter, J. Collins, and M. de Weerd, "The 2020 Power Trading Agent Competition," ERIM Report Series ERS-2020-002-LIS, Mar. 2020.
- [2] J. Kazil, D. Masad, and A. Crooks, "Utilizing Python for agent-based modeling: the Mesa framework," in Social, Cultural, and Behavioral Modeling (SBP-BRiMS 2020), Lecture Notes in Computer Science, vol. 12268, Springer, 2020.
- [3] C. R. Harris et al., "Array programming with NumPy," *Nature*, vol. 585, pp. 357-362, 2020.
- [4] P. Virtanen et al., "SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python," *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261-272, 2020.
- [5] S. Holm, "A simple sequentially rejective multiple test procedure," *Scandinavian Journal of Statistics*, vol. 6, no. 2, pp. 65-70, 1979.
- [6] Y. Benjamini and Y. Hochberg, "Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing," *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, vol. 57, no. 1, pp. 289-300, 1995.
- [7] B. Efron, "Bootstrap methods: another look at the jackknife," *The Annals of Statistics*, vol. 7, no. 1, pp. 1-26, 1979.
- [8] European Commission Joint Research Centre, "PVGIS seriescalc API," European Commission Joint Research Centre.
- [9] Open Power System Data, "Household load data package," version 2020-04-15, file household_data_60min_singleindex.csv, 2020.
- [10] Y. Weng, A. Musgrave, B. Chen, and Y. C. Chen, "Estimating probabilistic load coincidence factors for distribution system operation," presented at the 57th North American Power Symposium (NAPS), 2025.
- [11] S. Rusck, "The simultaneous demand in distribution network supplying domestic consumers," *ASEA Journal*, vol. 10, no. 11, pp. 59-61, 1956. Cited second-hand through [12].
- [12] G. Gust, A. Schlüter, S. Feuerriegel, I. Úbeda, J. T. Lee, and D. Neumann, "Designing electricity distribution networks: the impact of demand coincidence," *European Journal of Operational Research*, vol. 315, no. 1, pp. 271-288, 2024.
- [13] International Energy Agency, "Greece 2023: Energy Policy Review," International Energy Agency, 2023.
- [14] Regulatory Authority for Waste, Energy and Water (RAAEY), "Decision E-144/2025: determination of the System Maximum Demand Periods for 2026," *Government Gazette* 4569/B/20-8-2025, 2025.
- [15] J. Torriti, R. Hanna, B. Anderson, G. Yeboah, and A. Druckman, "Peak residential electricity demand and social practices: deriving flexibility and greenhouse gas intensities from time use and locational data," *Indoor and Built Environment*, vol. 24, no. 7, pp. 891-912, 2015.
- [16] ODYSSEE-MURE, "Electricity consumption per dwelling," ODYSSEE-MURE, page last updated Nov. 2025.

Βιβλιογραφία

- [17] Balkan Green Energy News, "Photovoltaics supply 60% of Greece's electricity at noon during heatwave," 18 Jul. 2023.
- [18] J. Dickert and P. Schegner, "Residential load models for network planning purposes," presented at Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010. Cited second-hand through [12].
- [19] Ot.gr, "Kausonas - mplakaout: Rekord sti zitisi, sta ypsi oi times" [Heatwave-blackout: record demand, sky-high prices], 24 Jul. 2025.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Εξωτερική επικύρωση του προσομοιωμένου τροφοδότη

Α.1 Σκοπός και εμβέλεια

Το Κεφάλαιο 6 και το Κεφάλαιο 7 χαρακτηρίζουν την επίδραση του μηχανισμού χωρητικότητας στις τέσσερις μετρικές της εργασίας. Το παράρτημα αυτό θέτει ένα στενότερο και προγενέστερο ερώτημα: ανεξάρτητα από τον μηχανισμό χωρητικότητας, παράγει ο πληθυσμός και το μοντέλο ζήτησης πάνω στο οποίο αυτός εδράζεται έναν τροφοδότη που μοιάζει, έστω κατά προσέγγιση, με πραγματικό οικιακό τροφοδότη χαμηλής τάσης (XT); Ο έλεγχος είναι περιγραφικός και όχι πιστοποιητικό εγκυρότητας: υπολογίζει τυποποιημένα στατιστικά σχήματος φορτίου από την προσομοίωση όπως αυτή παραδίδεται και τα συγκρίνει με δημοσιευμένα μεγέθη για πραγματικούς οικιακούς τροφοδότες και νοικοκυριά, όπου βρέθηκε πραγματική και ελέγξιμη πηγή. Όπου δεν βρέθηκε τέτοια πηγή, αυτό δηλώνεται ρητά αντί να καλυφθεί με έναν επινοημένο αριθμό.

Ο πληθυσμός που ελέγχεται δηλώνεται εξ αρχής, ώστε η σύγκριση να διαβαστεί στη σωστή της εμβέλεια: 200 πράκτορες, 20 τοις εκατό παραγωγοκαταναλωτές, ωριαία ανάλυση, ένα επαναλαμβανόμενο μετεωρολογικό έτος PVGIS για τη Θεσσαλονίκη, ένα ενιαίο ντετερμινιστικό συνθετικό προφίλ ζήτησης (Ενότητα 4.7), καμία φυσική δικτύου πουθενά στο μοντέλο, και κανένα φορτίο ηλεκτρικού οχήματος ή αντλίας θερμότητας. Αυτοί ακριβώς είναι και οι λόγοι για τους οποίους ένα δεδομένο στατιστικό μπορεί να βρίσκεται εκτός δημοσιευμένου εύρους, και κάθε στατιστικό που βρίσκεται εκτός αποδίδεται παρακάτω σε μία συγκεκριμένη, κατονομασμένη από αυτές τις αιτίες και όχι στον θόρυβο.

Α.2 Μέθοδος

Εκτελέστηκαν δύο διαμορφώσεις για ένα πλήρες έτος (8760 ώρες, σπόρος τυχαιότητας 20260704, οι δεσμευτικές σταθερές του πλαισίου), αμφότερες χωρίς καμία τροποποίηση σε σχέση με το αποθετήριο όπως παραδίδεται:

- `config/default.yaml`, η βάση αναφοράς όπως παραδίδεται (`capacity_mechanism.enabled: false`).
- `config/scenarios/capacity_both.yaml` (επεκτείνει το `default.yaml`, με τον μηχανισμό χωρητικότητας ενεργό και τα `feedback_pnl` και `feedback_pricing` αμφότερα αληθή), το κύριο σκέλος της αφαιρετικής μελέτης της σάρωσης των Κεφαλαίων 6 και 7, εκτελεσμένο εδώ στη διαμόρφωση που παραδίδεται, δηλαδή $k = 1.0$ και `broker_count = 3`.

Για κάθε εκτέλεση, το `MicrogridModel` κατασκευάστηκε ακριβώς όπως το κατασκευάζει το `scripts/run_baseline.py` και στη συνέχεια εκτελέστηκε βήμα προς βήμα, μία ώρα τη φορά, για ολόκληρο τον ορίζοντα (ισοδύναμα με το `model.run()`), αλλά με χειροκίνητα βήματα ώστε να μπορεί να διαβαστεί η κατάσταση κάθε πράκτορα μετά από κάθε ώρα). Οι 200 πράκτορες του πληθυσμού καταγράφηκαν μία φορά, αμέσως μετά την κατασκευή, ως απλή λίστα Python: το `model.agents` περιέχει μόνο τους 200 καταναλωτές και παραγωγοκαταναλωτές, καθώς οι πάροχοι είναι απλά αντικείμενα και όχι πράκτορες Mesa, οπότε τίποτε άλλο δεν βρίσκεται μέσα σε αυτή τη συλλογή. Μετά από κάθε ώρα, το `last_net_import_kwh` κάθε πράκτορα (η μετρούμενη καθαρή απορρόφησή του, με τα φωτοβολταϊκά και τη μπαταρία ήδη συμψηφισμένα για τους παραγωγοκαταναλωτές) και το `last_demand_kwh` του (η δική του εξυπηρετούμενη ζήτηση, μετά την αναβολή και χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα φωτοβολταϊκά) διαβάστηκαν σε δύο πίνακες διαστάσεων 8760 επί 200. Η συγκεντρωτική

σειρά του τροφοδότη που χρησιμοποιείται παντού είναι το `model.feeder_net_import_history`, η ίδια σειρά από την οποία υπολογίζεται η μετρική 3 (`environment/metrics.py`, `compute_grid_stability`). Ως έλεγχος της ίδιας της μετρητικής διάταξης, το ωριαίο άθροισμα του πίνακα καθαρής εισαγωγής ανά πράκτορα συγκρίθηκε με τη σειρά τροφοδότη που καταγράφει το ίδιο το μοντέλο: η μέγιστη απόλυτη διαφορά ήταν $2.8e-13$ kWh στη βάση αναφοράς και $2.8e-13$ kWh στο `capacity_both`, δηλαδή θόρυβος κινητής υποδιαστολής, οπότε η μέτρηση ανά πράκτορα και η συγκεντρωτική λογιστική του μοντέλου συμφωνούν μέχρι αυτόν τον θόρυβο.

Το ίδιο το σενάριο ανάλυσης (`compute_feeder_stats.py`) ήταν εργαλείο μίας χρήσης, που κρατήθηκε στον πρόχειρο χώρο εργασίας του ελέγχου και δεν αποτέλεσε ποτέ μέρος του αποθετηρίου. Περιγράφεται εδώ με αρκετή λεπτομέρεια, δηλαδή με τις ακριβείς διαδρομές διαμόρφωσης, τον σπόρο τυχαιότητας και τα πεδία ανά πράκτορα που διαβάζονται, ώστε ένας εξεταστής να μπορεί να αναπαραγάγει τους αριθμούς που ακολουθούν από τον κώδικα όπως παραδίδεται, με τη μοναδική εξαίρεση που δηλώνεται αμέσως παρακάτω, χωρίς να χρειάζεται το σενάριο αυτό. Το εργαλείο μίας χρήσης αντικαταστάθηκε αργότερα από το `scripts/feeder_statistics.py`, το οποίο γράφτηκε εξ αρχής, οδηγεί απευθείας το `MicrogridModel`, αναπαράγει δεκαπέντε από τα δεκαέξι στατιστικά μεγέθη που ελέγχει πεδίο προς πεδίο έναντι αυτού του παραρτήματος και είναι καθηλωμένο από ελέγχους, τρεις εκ των οποίων εκτελούνται μόνο όταν έχει τεθεί η σημαία `RUN_SLOW_TESTS`, επειδή επαναλαμβάνουν τις πλήρεις εκτελέσεις των 8760 ωρών. Το δέκατο έκτο μέγεθος είναι ο συντελεστής ταυτοχρονισμού του `capacity_both`, όπου η μέτρηση δίνει 0.905464 έναντι του τυπωμένου 0.906: πρόκειται για διαφορά που οφείλεται στη σειρά στρογγυλοποίησης και αντιστροφής μεταξύ δύο ακριβώς αντίστροφων μεγεθών και όχι σε σφάλμα υπολογισμού, και δηλώνεται εδώ αντί να αποσιωπηθεί.

Τα στατιστικά και οι ακριβείς τους ορισμοί, όλα υπολογισμένα πάνω στην πλήρη σειρά των 8760 ωρών εκτός όπου δηλώνεται διαφορετικά, είναι τα εξής:

- Συντελεστής φορτίου = μέσος όρος της σειράς τροφοδότη προς μέγιστο της σειράς τροφοδότη.
- Ατομική αιχμή πράκτορα = το μέγιστο, μέσα στο έτος, του δικού του `last_net_import_kwh`. Συντελεστής ταυτοχρονισμού = αιχμή τροφοδότη προς το άθροισμα των 200 ατομικών αιχμών. Συντελεστής διαφοροποίησης = ο αντίστροφός του, δηλαδή άθροισμα ατομικών αιχμών προς αιχμή τροφοδότη.
- Λόγος αιχμής προς μέσο όρο = αιχμή τροφοδότη προς μέσο όρο τροφοδότη. Είναι το ίδιο μέγεθος με το `feeder_peak_to_average_ratio` της μετρικής 3 και διασταυρώθηκε με αυτό: τα δύο συμφωνούν μέχρι το τελευταίο τυπωμένο ψηφίο και στις δύο εκτελέσεις, όπως αναμένεται αφού διαβάζουν την ίδια σειρά.
- Ετήσια ζήτηση ανά νοικοκυριό = το άθροισμα, μέσα στο έτος, του `last_demand_kwh` κάθε πράκτορα (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ιδιοκατανάλωση από φωτοβολταϊκά), σε μέσο όρο επί των 200 πρακτόρων. Ετήσια καθαρή εισαγωγή ανά νοικοκυριό = το ίδιο άθροισμα, αλλά του `last_net_import_kwh`, δηλαδή το μετρούμενο στο δίκτυο μέγεθος, με τα φωτοβολταϊκά και τη μπαταρία συμψηφισμένα για τους παραγωγοκαταναλωτές.
- Ημερήσιο σχήμα: η σειρά των 8760 ωρών αναδιατάσσεται σε 365 ημέρες επί 24 ώρες και ο μέσος όρος λαμβάνεται κατά ημέρα, ώστε να προκύψει ένα μέσο ωριαίο προφίλ. Η ώρα της ημερήσιας αιχμής (κοιλιάδας) είναι το `argmax` (`argmin`) αυτού του προφίλ. Τα χειμερινά και θερινά προφίλ είναι ο ίδιος μέσος όρος περιορισμένος στις ώρες Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου και στις ώρες Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου αντίστοιχα (ημερολόγιο 365 ημερών χωρίς δίσεκτο, με την ώρα 0 να αντιστοιχεί στην 1η Ιανουαρίου, 00:00, όπως ακριβώς συμπεριφέρεται το `tile_to_horizon` του μοντέλου σε εκτέλεση 8760 ωρών).
- Μηνιαίο σχήμα: ο μέσος όρος της σειράς τροφοδότη εντός κάθε ημερολογιακού μήνα. Ο μήνας της ετήσιας αιχμής είναι ο ημερολογιακός μήνας που περιέχει τη μοναδική ώρα στην οποία η σειρά τροφοδότη φτάνει το ετήσιο μέγιστό της.

- Λόγος ελαχίστου προς μέγιστο = ελάχιστο της σειράς τροφοδότη προς μέγιστο της σειράς τροφοδότη. Επειδή η σειρά τροφοδότη είναι καθαρή εισαγωγή (ζήτηση μείον παραγωγή φωτοβολταϊκών μείον εκφόρτιση μπαταρίας, αθροισμένα στον πληθυσμό), μπορεί να γίνει αρνητική όταν η συνολική παραγωγή των παραγωγοκαταναλωτών υπερβαίνει τη συνολική ζήτηση. Αυτό συνέβη σε 467 από τις 8760 ώρες (5.331 τοις εκατό) στη βάση αναφοράς και σε 465 από τις 8760 ώρες (5.308 τοις εκατό) στο capacity_both. Ο λόγος ελαχίστου προς μέγιστο που αναφέρεται παρακάτω είναι επομένως προσημασμένο μέγεθος και όχι ο κλασικός λόγος μη αρνητικής ζήτησης των εγχειριδίων, και αυτό δηλώνεται ρητά αντί να συγκαλυφθεί.
- Βάθος νυχτερινής κοιλάδας = ένα μείον το ημερήσιο του μέσου ωριαίου προφίλ στις ώρες 01:00 έως 04:00 προς τη μέγιστη τιμή του ίδιου του μέσου ωριαίου προφίλ.

Α.3 Αποτελέσματα

Όλες οι προσομοιωμένες τιμές που ακολουθούν προέρχονται από τις δύο εκτελέσεις που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η στήλη «Δημοσιευμένο εύρος» δίνει ό,τι πράγματι βρέθηκε και επαληθεύτηκε στην αναφερόμενη πηγή, είτε ως παράθεμα είτε ως στενή παράφραση. Όπου μια αναζήτηση σε πηγές ρυθμιστικών αρχών, διαχειριστών δικτύου, του IEA, της Eurostat και περιοδικών του IEEE δεν εντόπισε επαληθεύσιμο μέγεθος ίδιας εμβέλειας, αυτό δηλώνεται αντί να δοθεί αριθμός. Οι εκτενείς επεξηγήσεις για το πώς προέκυψαν τα δημοσιευμένα εύρη των στατιστικών εκτός εύρους δίνονται στην Ενότητα Α.5, και η επιφύλαξη για την πηγή των δύο γραμμών κατανάλωσης αμέσως μετά τον πίνακα, ώστε ο Πίνακας Α.1 να παραμείνει αναγνώσιμος.

Στατιστικό	Προσομοίωση, βάση αναφοράς	Προσομοίωση, capacity_both	Δημοσιευμένο εύρος	Πηγή	Εντός εύρους
Συντελεστής φορτίου (μέσος προς αιχμή, ετήσιος)	0.287	0.315	δεν βρέθηκε για αμιγώς οικιακό τροφοδότη ΧΤ σε αυτή την κλίμακα	καμία επαληθευμένη, βλ. Α.5	μερικώς
Συντελεστής ταυτοχρονισμού (200 πράκτορες)	0.951	0.906	περίπου 0.3 έως 0.8, ανάγνωση του Σχήματος 2 της πηγής, σε συνθετικά και όχι μετρημένα προφίλ, και 0.164 από το μοντέλο σχεδιασμού Rusck στα N = 200	[10]; [12]	όχι
Συντελεστής διαφοροποίησης (αντίστροφος)	1.051	1.104	περίπου 1.25 έως 3.3, όπως παραπάνω, και 6.1 από το μοντέλο Rusck στα N = 200	[10]; [12]	όχι
Λόγος αιχμής προς μέσο όρο	3.483	3.172486	δεν βρέθηκε ειδικά για τροφοδότη ΧΤ 200 νοικοκυριών	καμία επαληθευμένη, βλ. Α.5	μερικώς
Μέση ετήσια ζήτηση ανά νοικοκυριό (εξυπηρετούμενη, χωρίς Φ/Β)	4295.0 kWh/έτος	4294.9 kWh/έτος	μέσος όρος EE 3.6 MWh ανά κατοικία ανά έτος, εύρος 1.8 έως 8.5 MWh μεταξύ κρατών μελών	[16]	ναι

Παραρτήματα

Στατιστικό	Προσομοίωση, βάση αναφοράς	Προσομοίωση, capacity_both	Δημοσιευμένο εύρος	Πηγή	Εντός εύρους
Μέση ετήσια καθαρή εισαγωγή ανά νοικοκυριό (μετρούμενη στο δίκτυο)	3428.5 kWh/έτος	3428.4 kWh/έτος	όπως παραπάνω	[16]	ναι
Ωρα της ημερήσιας αιχμής (μέσο προφίλ)	20:00	20:00	16:00 έως 18:50 στο Ηνωμένο Βασίλειο, βραδινή περίοδος αιχμής όπως την ορίζει η ίδια η πηγή, (η ίδια πηγή αντιμετωπίζει το 19:00 έως 21:50 ως χωριστή περίοδο αργά το βράδυ και όχι ως αιχμή), και 19:00 έως 24:00 για Απρίλιο έως Αύγουστο, Περίοδος Μέγιστης Ζήτησης Συστήματος στην Ελλάδα	[15]; [14]	μερικώς
Εποχή της ώρας ετήσιας αιχμής και λόγος χειμώνα προς καλοκαίρι	Δεκέμβριος (χειμερινός μέσος 106.1, θερινός 50.7, λόγος 2.09)	Ιανουάριος (ίδιοι μέσοι στα τυπωμένα ψηφία)	η πραγματική αιχμή του ελληνικού συστήματος εμφανίζεται το καλοκαίρι (Αύγουστος), λόγω κλιματισμού	[13]	όχι
Λόγος ελαχίστου προς μέγιστο της σειράς τροφοδοτή, ποσοστό ωρών καθαρής εξαγωγής	-0.116, 5.33% των ωρών	-0.127, 5.31% των ωρών	ποιοτική μόνο κατεύθυνση, πρόβλεψη επόμενης ημέρας για 6.1 GW παραγωγής Φ/Β στις 13:00, κανένα ποσοτικό μέτρο σύγκρισης για τροφοδοτή 200 νοικοκυριών	[17]	μερικώς
Βάθος νυχτερινής κοιλάδας (ένα μείον κοιλάδα προς αιχμή του μέσου ημερήσιου προφίλ)	0.709	0.603	δεν βρέθηκε	καμία επαληθευμένη, βλ. Α.5	μερικώς

Πίνακας Α.1: Στατιστικά σχήματος φορτίου του τροφοδοτή έναντι δημοσιευμένων μεγεθών.

Για την πηγή των δύο γραμμών κατανάλωσης ανά νοικοκυριό ισχύει μία επιφύλαξη που δεν χωρούσε στον πίνακα: η σελίδα του ODYSSEE-MURE δηλώνει το εύρος και τον μέσο όρο αλλά δεν τους συνδέει με συγκεκριμένο έτος δεδομένων, οπότε κανένα έτος δεν δηλώνεται εδώ [16].

Δύο ακόμη μεγέθη αναφέρονται για πληρότητα, αν και δεν αποτελούν ξεχωριστές γραμμές του πίνακα: ο συντελεστής μεταβλητότητας της σειράς τροφοδοτή (0.672 στη βάση αναφοράς, 0.623 στο

capacity_both) και η συνολική ετήσια ενέργεια που εξυπηρετήθηκε στον πληθυσμό (858996.5 kWh στη βάση αναφοράς, 858971.9 kWh στο capacity_both, ταυτόσημα σε τέσσερα σημαντικά ψηφία, με σχετική διαφορά 2.9×10^{-5} , επειδή η αναβολή ζήτησης μετατοπίζει ενέργεια στον χρόνο και δεν τη διαγράφει). Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι, στα τυπωμένα ψηφία, η τιμή που καταγράφει η ίδια η σάρωση για τη διαμόρφωση και τον σπόρο τυχαιότητας αυτής της εκτέλεσης (results/sweep_raw.parquet, σπόρος τυχαιότητας 20260704, $k = 1.0$, broker_count = 3), της οποίας τα ποσοστά μεταβολής αναφέρει η Ενότητα 7.3, ενώ η συνολική εξυπηρετούμενη ενέργεια δεν αποτελεί μέγεθος της σάρωσης και δίνεται εδώ ως ανεξάρτητη μέτρηση. Αναφέρονται ως διασταύρωση ότι η μέτρηση αυτού του παραρτήματος συμφωνεί με τα καταγεγραμμένα δεδομένα της εργασίας.

A.4 Ετυμηγορία

Μερικώς ευλογοφανής. Η συνολική ενεργειακή κλίμακα του πληθυσμού βρίσκεται εντός πραγματικού και ελέγξιμου δημοσιευμένου εύρους: η μέση ετήσια κατανάλωση ανά νοικοκυριό (4295 kWh/έτος από την πλευρά της ζήτησης, 3428 kWh/έτος μετρούμενη στο δίκτυο) βρίσκεται εντός της διασποράς που αναφέρεται για την Ευρωπαϊκή Ένωση (1.8 έως 8.5 MWh/έτος, μέσος όρος ΕΕ 3.6 MWh/έτος) και κοντά σε αυτόν τον μέσο όρο ως προς το μετρούμενο στο δίκτυο μέγεθος [16]. Ο χρονισμός της ημερήσιας αιχμής είναι διχασμένο αποτέλεσμα και όχι καθαρή επιτυχία: η ημερήσια αιχμή του προσομοιωμένου τροφοδότη στις 20:00 βρίσκεται εντός της θερινής Περιόδου Μέγιστης Ζήτησης Συστήματος της ελληνικής ρυθμιστικής αρχής (19:00 έως 24:00 για Απρίλιο έως Αύγουστο, απόφαση Ε-144/2025) [14], αλλά εκτός της βραδινής περιόδου αιχμής του Ηνωμένου Βασιλείου όπως την ορίζουν οι Torriti et al. (16:00 έως 18:50) [15]: πέφτει σε αυτό που εκείνοι αντιμετωπίζουν ως χωριστή περίοδο αργά το βράδυ.

Απέναντι σε αυτά, δύο στατιστικά δεν είναι απλώς οριακά αλλά σαφώς εκτός όσων δείχνουν τα διαθέσιμα μέτρα σύγκρισης, για λόγους που αποδίδονται σε συγκεκριμένες, κατονομασμένες σχεδιαστικές επιλογές και όχι στην τύχη. Ο συντελεστής ταυτοχρονισμού (0.951, έναντι περίπου 0.3 έως 0.8 σε προσομοιωμένα δεδομένα πολλών νοικοκυριών και περίπου 0.16 υπό την καθιερωμένη πρακτική σχεδιασμού δικτύων σε αυτό το μέγεθος ομάδας) δείχνει ότι ο προσομοιωμένος πληθυσμός δεν έχει ουσιαστικά καμία συμπεριφορική διαφοροποίηση ως προς το πότε τα μέλη του κάνουν ατομικά αιχμή. Και το χειμερινό εποχικό σχήμα (ετήσια αιχμή τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο, μέσο χειμερινό φορτίο 2.09 φορές το θερινό) είναι το αντίθετο της πραγματικής ελληνικής θερινής αιχμής που οδηγείται από τον κλιματισμό.

Δύο ακόμη στατιστικά, ο συντελεστής φορτίου και ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο, δεν κατέστη δυνατό να βαθμολογηθούν έναντι έγκυρου δημοσιευμένου μεγέθους ίδιας εμβέλειας παρά την πραγματική προσπάθεια αναζήτησης, και αυτό το κενό τεκμηρίωσης δηλώνεται αντί να καλυφθεί με επινοημένο αριθμό. Η ειλικρινής σύνοψη δεν είναι επομένως ούτε «ευλογοφανής» χωρίς επιφύλαξη ούτε «μη ευλογοφανής»: η ενεργειακή κλίμακα του τροφοδότη είναι ρεαλιστική και ο χρονισμός της ημερήσιας αιχμής του επιβεβαιώνεται έναντι του ενός μόνο από τα δύο μέτρα σύγκρισής του, ενώ η συμπεριφορική διαφοροποίηση σε επίπεδο πληθυσμού και η εποχή της αιχμής του δεν είναι ρεαλιστικές. Και οι δύο τελευταίες αποτυχίες ανάγονται σε συγκεκριμένες, ήδη τεκμηριωμένες σχεδιαστικές επιλογές (την ετερογένεια μόνο κατά πλάτος της απόφασης D4 και το συνθετικό προφίλ ζήτησης της Ενότητας 4.7) και όχι σε σφάλμα στη μηχανική της προσομοίωσης.

A.5 Συζήτηση των στατιστικών εκτός εύρους

A.5.1 Συντελεστής ταυτοχρονισμού και συντελεστής διαφοροποίησης

Αυτή είναι η καθαρότερη και καλύτερα τεκμηριωμένη απόκλιση. Η ζήτηση καθενός από τους 200 πράκτορες είναι το `demand_profile[hour]` πολλαπλασιασμένο με το δικό του σταθερό `demand_scale` (`agents/consumer.py`, `Consumer._compute_demand_kwh`, και `data/loaders.py`, `generate_synthetic_demand`): το σχήμα στον χρόνο είναι ταυτόσημο και ντετερμινιστικό για κάθε πράκτορα, και μόνο το πλάτος του δειγματοληπτείται ανά πράκτορα (απόφαση D4). Επειδή τα φωτοβολταϊκά δίνουν μηδενική παραγωγή τη νύχτα και η αιχμή του κοινού προφίλ ζήτησης πέφτει σε χειμερινή βραδινή ώρα μετά τη δύση του ηλίου, η διαχείριση φωτοβολταϊκών και μπαταρίας των παραγωγοκαταναλωτών δεν αλλάζει ούτε αυτή ποια ώρα του ρολογιού είναι το ετήσιο μέγιστο κάθε πράκτορα: και οι 200 πράκτορες, καταναλωτές και παραγωγοκαταναλωτές, κάνουν αιχμή ουσιαστικά την ίδια ώρα εκ κατασκευής. Αυτό ακριβώς σημαίνει ένας συντελεστής ταυτοχρονισμού 0.951, με συντελεστή διαφοροποίησης μόλις 1.051: σχεδόν καμία διαφοροποίηση. Πραγματικοί πληθυσμοί αυτού του μεγέθους δεν συμπεριφέρονται έτσι, επειδή τα πραγματικά νοικοκυριά δεν μοιράζονται ένα ενιαίο ντετερμινιστικό προφίλ χρήσης. Η αιτία εδώ είναι ο σχεδιασμός του συνθετικού προφίλ ζήτησης (μία αντιπροσωπευτική καμπύλη, κλιμακωμένη ανά πράκτορα, Ενότητα 4.7) και όχι το μέγεθος πληθυσμού των 200, το οποίο κατά τα άλλα είναι απολύτως συνηθισμένη κλίμακα τροφοδότη XT: οι Weng et al. αναδειγματοληπτούν ομάδες 30 και 300 πελατών από σύνολο 600 νοικοκυριών, οπότε το 200 βρίσκεται εντός του εύρους τους [10], ενώ τα δίκτυα των Gust et al. είναι μικρότερα και η πηγή αυτή χρησιμοποιείται εδώ για τον τύπο σχεδιασμού Rusck και όχι για μέγεθος ομάδας [12].

Δύο σημειώσεις για το πώς προέκυψαν τα δύο μέτρα σύγκρισης εκείνης της γραμμής, ώστε ένας εξεταστής να μπορεί να τα αναπαραγάγει αντί να τα δεχτεί επί πίστει. Πρώτον, το εύρος από 0.3 έως 0.8 διαβάζεται από την κατανομή του μέγιστου συντελεστή ταυτοχρονισμού που απεικονίζεται στο Σχήμα 2 των Weng et al. [10]. Το Σχήμα 3 της ίδιας εργασίας απεικονίζει διαφορετικό μέγεθος, τον ελάχιστο συντελεστή ταυτοχρονισμού που εκείνοι προτείνουν, και δεν στηρίζει αυτό το εύρος. Οι συγγραφείς αναφέρουν κατανομές του στατιστικού και όχι ένα ενιαίο διάστημα σε πεζό κείμενο, οπότε το διάστημα που παρατίθεται εδώ είναι ανάγνωση των σχημάτων τους και χαρακτηρίζεται ως τέτοιο στον πίνακα, όχι ως πρόταση αντλημένη από το κείμενό τους. Το υποκείμενο σύνολο δεδομένων τους είναι δεκαπεντάλεπτες μετρήσεις ενεργού ισχύος για $N = 600$ νοικοκυριά στο Σαν Φρανσίσκο για ολόκληρο το 2018, με τυχαία αναδειγματοληψία σε ομάδες $n = 30$ και $n = 300$, και πρόκειται για συνθετικά προφίλ NREL SMART-DS και όχι για μετρημένα δεδομένα. Δεύτερον, το μέγεθος σχεδιασμού 0.164 δεν είναι καθόλου παρατιθέμενος αριθμός, αλλά τύπος που αποτιμήθηκε εδώ: οι Gust et al. μοντελοποιούν τον συντελεστή ταυτοχρονισμού ως $\gamma(N) = \gamma_{lim} + (1 - \gamma_{lim}) * N^{(-1/2)}$, αποδίδοντάς τον στον Rusck (1956) και στους Dickert και Schegner (2010), τους οποίους η παρούσα εργασία αναφέρει εκ δευτέρου μέσα από τους Gust et al. [11], [18], και δηλώνουν ότι η τιμή $\gamma_{lim} = 0.1$ «ακολουθεί την τρέχουσα πρακτική στον σχεδιασμό δικτύων» [12]. Η αποτίμηση της έκφρασης αυτής για $\gamma_{lim} = 0.1$ και $N = 200$ δίνει 0.1636, που παρατίθεται παραπάνω ως 0.164, με αντίστροφο 6.1 ως τον αντίστοιχο συντελεστή διαφοροποίησης.

Ο πιο ακριβής τρόπος να δηλωθεί το μέγεθος αυτού του κενού χρησιμοποιεί τη γλώσσα σεναρίων της ίδιας εργασίας. Οι Gust et al. ορίζουν τρία σενάρια ταυτοχρονισμού: $\gamma_{lim} = 0.1$ ως τη βάση της τρέχουσας πρακτικής σχεδιασμού δικτύων, $\gamma_{lim} = 0.7$ ως ένα μέλλον υψηλού ταυτοχρονισμού με ταυτόχρονη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, και $\gamma_{lim} = 1.0$ ως ρητή χειρότερη περίπτωση στην οποία, με τα δικά τους λόγια, όλες οι αιχμές ζήτησης συμβαίνουν την ίδια στιγμή, κάτι που δίνει σταθερό συντελεστή ταυτοχρονισμού ακριβώς 1.0 για οποιοδήποτε μέγεθος ομάδας και το οποίο

εκείνοι περιγράφουν ως ρεαλιστικό σενάριο για ανεξέλεγκτη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [12]. Η μετρημένη τιμή 0.951 αυτής της προσομοίωσης βρίσκεται ουσιαστικά πάνω σε εκείνο το σενάριο χειρότερης περίπτωσης. Το εύρημα επομένως δεν είναι απλώς ότι ο προσομοιωμένος τροφοδότης είναι κάπως πιο ταυτόχρονος από έναν πραγματικό: ως προς αυτό το στατιστικό ο πληθυσμός όπως παραδίδεται συμπεριφέρεται σαν το παθολογικό άνω όριο που μια μελέτη σχεδιασμού δικτύων κατασκευάζει σκόπιμα για να αποτιμήσει το κόστος της χειρότερης περίπτωσης, παρότι δεν περιέχει κανένα ηλεκτρικό όχημα. Πρόκειται για ισχυρή δήλωση και γίνεται εδώ επειδή η τεκμηριωμένη σύγκριση τη στηρίζει.

A.5.2 Εποχή της ετήσιας αιχμής και λόγος χειμώνα προς καλοκαίρι

Η γεννήτρια συνθετικής ζήτησης (`data/loaders.py, generate_synthetic_demand`) εφαρμόζει εποχικό πολλαπλασιαστή $1.0 + 0.25 \cdot \cos(2\pi \cdot (\text{day_of_year} - 15)/365)$, δηλαδή σχήμα τύπου θέρμανσης που κορυφώνεται στα μέσα Ιανουαρίου και δεν έχει κανέναν απολύτως όρο ψύξης ή κλιματισμού. Η πραγματική αιχμή του ελληνικού συστήματος, αντιθέτως, είναι πλέον θερινό γεγονός οδηγούμενο από τον κλιματισμό: η επισκόπηση ενεργειακής πολιτικής του IEA για την Ελλάδα καταγράφει αιχμή φορτίου 10.5 GW τον Αύγουστο του 2021, έναντι χαμηλότερης και μη αντιπροσωπευτικής τιμής 8.6 GW το 2020, έτος επηρεασμένο από την πανδημία [13]. Ελληνικό δημοσίευμα για τα δεδομένα του διαχειριστή κατά τον καύσωνα του Ιουλίου 2025 περιγράφει πρόβλεψη επόμενης ημέρας του ΑΔΜΗΕ στα 10798 MW για την 24η Ιουλίου 2025, ελαφρώς κάτω από το στρογγυλό όριο των 10800 MW που το ίδιο δημοσίευμα επίσης αναφέρει, έναντι πραγματικής αιχμής 10494 MW την προηγούμενη ημέρα (23 Ιουλίου 2025), η οποία είναι με τη σειρά της χαμηλότερη από την πραγματική αιχμή των 10.5 GW του Αυγούστου 2021 κατά το IEA. Η διατύπωση περί «ρεκόρ» σε εκείνο το δημοσίευμα περιγράφει επομένως πρόβλεψη που δεν επαληθεύτηκε και όχι επιβεβαιωμένη αιχμή που το παρόν παράρτημα μπορεί να πιστοποιήσει ότι ξεπέρασε την τιμή του 2021, αν και η ζήτηση αυτή αποδίδεται στην εκτεταμένη χρήση κλιματισμού [19]. Για την ίδια τη θερινή περίοδο αιχμής, το παράρτημα αναφέρεται πλέον στο πρωτογενές ρυθμιστικό κείμενο και όχι σε δημοσιεύματα: η απόφαση E-144/2025 της ΠΑΑΕΥ ορίζει την Περίοδο Μέγιστης Ζήτησης Συστήματος στις 19:00 έως 24:00 για τους μήνες Απρίλιο έως Αύγουστο, τις εργάσιμες ημέρες, και τη θέτει με βάση τις μέσες ωριαίες καμπύλες ζήτησης συστήματος του ΑΔΜΗΕ για το 2023 και το 2024 [14]. Ο προσομοιωμένος τροφοδότης δεν μπορεί να αναπαραγάγει αυτό το σχήμα επειδή δεν έχει κανενός είδους φορτίο ψύξης: πρόκειται για άμεση και αποδιδόμενη συνέπεια του συνθετικού προφίλ ζήτησης, ειδικότερα της επιλογής του να έχει μόνο χειμερινό εποχικό όρο, καθώς και της δηλωμένης απουσίας οποιουδήποτε φορτίου ηλεκτρικού οχήματος ή αντλίας θερμότητας και ψύξης από το μοντέλο, και όχι για ελάττωμα στον τρόπο υπολογισμού του ίδιου του εποχικού στατιστικού.

A.5.3 Ώρα της ημερήσιας αιχμής

Η γραμμή αυτή βαθμολογείται ως «μερικώς» επειδή τα δύο μέτρα σύγκρισής της διαφωνούν ως προς την προσομοιωμένη ώρα 20:00. Προηγούμενη εκδοχή αυτού του παραρτήματος έδινε το βρετανικό μέτρο σύγκρισης ως περίπου 18:00 έως 21:00, με αναφορά στους Torriti et al. βασισμένη μόνο στην περίληψή τους, και βαθμολογούσε τη γραμμή ως επιτυχία. Το πλήρες κείμενο αποκτήθηκε έκτοτε και δεν στηρίζει εκείνο το παράθυρο. Οι Torriti et al. χωρίζουν την εργάσιμη ημέρα σε πέντε περιόδους ίσου μήκους (07:00 έως 09:50, 10:00 έως 12:50, 13:00 έως 15:50, 16:00 έως 18:50, 19:00 έως 21:50), χαρακτηρίζουν την πρωινή (07:00 έως 09:50) και την απογευματινή (16:00 έως 18:50) ως τις «περιόδους αιχμής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας» και αποκαλούν το 16:00 έως 18:50 «βραδινή αιχμή»,

ενώ το 19:00 έως 21:50 συζητείται ως «περίοδος αργά το βράδυ» και δεν χαρακτηρίζεται ποτέ αιχμή [15]. Με βάση τους ορισμούς της ίδιας της πηγής, η προσομοιωμένη ώρα 20:00 πέφτει εκτός της βρετανικής βραδινής αιχμής και όχι εντός της, οπότε το βρετανικό ήμισυ αυτής της γραμμής είναι αστοχία και η προηγούμενη βαθμολόγηση ως επιτυχίας ήταν λανθασμένη. Το ελληνικό ήμισυ επιβιώνει και λαμβάνεται πλέον από ρυθμιστικό κείμενο αντί από δημοσιεύματα: η απόφαση E-144/2025 της ΡΑΑΕΥ θέτει την Περίοδο Μέγιστης Ζήτησης Συστήματος στις 19:00 έως 24:00 για Απρίλιο έως Αύγουστο τις εργάσιμες ημέρες, και η ώρα 20:00 βρίσκεται εντός της, όπως βρίσκεται και εντός των παραθύρων 17:00 έως 22:00 και 18:00 έως 23:00 που η ίδια απόφαση θέτει για το υπόλοιπο έτος [14]. Δύο επιφυλάξεις πρέπει να δηλωθούν ανοιχτά αντί να μείνουν θαμμένες. Το παράθυρο της ρυθμιστικής αρχής είναι μέγεθος του εθνικού συστήματος μεταφοράς που καλύπτει όλες τις κατηγορίες καταναλωτών και όχι στατιστικό οικιακού τροφοδότη XT, οπότε αποτελεί χαλαρότερη σύγκριση από όσο υποδηλώνει η διατύπωση της γραμμής. Και οι περίοδοι των Torriti et al. είναι παράθυρα ανάλυσης σταθερού μήκους επιλεγμένα από εκείνους τους συγγραφείς και όχι μετρημένο argmax , οπότε κανένα από τα δύο μέτρα σύγκρισης δεν είναι ακριβώς το μέγεθος που υπολογίζεται εδώ. Χωριστά, προηγούμενη εκδοχή αυτής της γραμμής παρέπεμπε στο Lykavitos.gr παράλληλα με το Dnews.gr για το ελληνικό παράθυρο αιχμής. Το άρθρο του Dnews.gr εντοπίστηκε και ανιχνεύθηκε πίσω στην απόφαση της ΡΑΑΕΥ που πλέον αναφέρεται απευθείας, ενώ το άρθρο του Lykavitos.gr δεν κατέστη δυνατό να εντοπιστεί ξανά, οπότε αποσύρθηκε αντί να παραμείνει ως παραπομπή που κανείς δεν μπορεί να ελέγξει.

A.5.4 Συντελεστής φορτίου και λόγος αιχμής προς μέσο όρο

Και τα δύο αναφέρονται ως «μερικώς» και όχι ως «όχι». Υπολογίστηκαν ακριβώς όπως ορίστηκαν στην Ενότητα A.2 και διασταυρώνονται σωστά με την έξοδο της μετρικής 3 του ίδιου του μοντέλου, οπότε δεν υπάρχει λόγος αμφιβολίας για τους ίδιους τους αριθμούς. Αυτό που δεν κατέστη δυνατό να τεκμηριωθεί, παρά την αναζήτηση σε πηγές ρυθμιστικών αρχών, διαχειριστών δικτύου, του IEA, της Eurostat, της CIGRE και της CIRED, καθώς και σε περιοδικά του IEEE, είναι ένα έγκυρο δημοσιευμένο μέγεθος ίδιας εμβέλειας για τον ετήσιο συντελεστή φορτίου ή τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο ενός αμιγώς οικιακού τροφοδότη XT 200 νοικοκυριών, χωρίς ηλεκτρικά οχήματα και αντλίες θερμότητας. Αρκετές πηγές επαγγελματικής πρακτικής και ιστολογίων παραθέτουν τιμές στο εύρος 0.15 έως 0.35 για τον οικιακό συντελεστή φορτίου, καμία όμως δεν ανάγεται σε συγκεκριμένη έκδοση εγχειριδίου, σε κείμενο ρυθμιστικής αρχής ή διαχειριστή δικτύου, ή σε εργασία με κριτές που θα μπορούσε να επαληθευτεί ανεξάρτητα, οπότε δεν χρησιμοποιούνται ως παραπομπή εδώ. Ως ένας κατευθυντικός και σαφώς χαρακτηρισμένος έλεγχος λογικής, και όχι ως μέτρο σύγκρισης ίδιας εμβέλειας: ο συντελεστής φορτίου του ίδιου του ελληνικού εθνικού συστήματος, υπολογισμένος από δύο μεγέθη επαληθευμένα από το IEA (αιχμή φορτίου 10.5 GW τον Αύγουστο του 2021 και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας 51 TWh το 2021, που συνεπάγεται μέσο φορτίο περίπου 5.82 GW), είναι περίπου 0.55, δηλαδή αισθητά υψηλότερος από το μέγεθος των 200 νοικοκυριών αυτής της προσομοίωσης [13]. Αυτή είναι η αναμενόμενη κατεύθυνση για ένα σύστημα ολόκληρης χώρας, που αναμειγνύει βιομηχανικούς, εμπορικούς και εκατομμύρια διαφοροποιημένους οικιακούς πελάτες, έναντι ενός μικρού, αμιγώς οικιακού τροφοδότη XT, οπότε η θέση της προσομοιωμένης τιμής κάτω από την εθνική δεν αποτελεί από μόνη της ένδειξη προβλήματος. Δεν υποκαθιστά όμως μια παραπομπή ίδιας εμβέλειας, την οποία το παράρτημα αυτό δεν κατάφερε να εντοπίσει. Δεδομένου ότι και τα δύο στατιστικά μοιράζονται την ίδια βαθύτερη αιτία με τον συντελεστή ταυτοχρονισμού, δηλαδή ότι ένας πληθυσμός χωρίς διαφοροποίηση χρονισμού παράγει οξύτερο και πιο συγχρονισμένο συγκεντρωτικό προφίλ, το οποίο μηχανικά μειώνει τον συντελεστή φορτίου και διογκώνει τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο σε σχέση με έναν συμπεριφορικά διαφοροποιημένο πληθυσμό ίδιου μεγέθους, η αληθής, αν και μη τεκμηριωμένη,

προσδοκία είναι ότι και τα δύο είναι διογκωμένα προς την ίδια κατεύθυνση και για τον ίδιο λόγο με το εύρημα του συντελεστή ταυτοχρονισμού.

A.5.5 Λόγος ελαχίστου προς μέγιστο και ώρες καθαρής εξαγωγής

Μια αρνητική καθαρή εισαγωγή στον τροφοδότη (5.33 τοις εκατό των ωρών στη βάση αναφοράς) δεν είναι εκ πρώτης όψεως μη ευλογοφανής: ελληνικό δημοσίευμα από τον καύσωνα του Ιουλίου 2023 μεταφέρει πρόβλεψη επόμενης ημέρας του διαχειριστή για 6.1 GW παραγωγής φωτοβολταϊκών στις 13:00, δηλαδή μια πραγματική και αυξανόμενη μεσημεριανή μείωση της ζήτησης λόγω φωτοβολταϊκών στο πραγματικό ελληνικό δίκτυο [17]. Ο τίτλος εκείνου του δημοσιεύματος τοποθετεί τα φωτοβολταϊκά στο 60 τοις εκατό της ελληνικής ηλεκτρικής ενέργειας το μεσημέρι, αλλά το κείμενό του ούτε επαναλαμβάνει τον αριθμό ούτε δηλώνει σε τι αναφέρεται ως ποσοστό, οπότε από αυτό λαμβάνεται εδώ μόνο η ποιοτική κατεύθυνση. Αυτό που δεν κατέστη δυνατό να επαληθευτεί είναι ποσοτικό μέτρο σύγκρισης για το πόσο συχνά ένας τροφοδότης 200 νοικοκυριών με μόλις 20 τοις εκατό παραγωγικοκαταναλωτές και 1.5 έως 4.5 kWp φωτοβολταϊκών σε στέγη ο καθένας θα έπρεπε να εμφανίζει ώρα καθαρής εξαγωγής. Η ποιοτική κατεύθυνση είναι ρεαλιστική, το μέγεθος απλώς δεν τεκμηριώνεται, και γι' αυτό η γραμμή αυτή σημειώνεται ως «μερικώς» και όχι ως «ναι» ή «όχι».

A.5.6 Βάθος νυχτερινής κοιλάδας

Αναφέρεται ακριβώς όπως υπολογίστηκε (0.709 στη βάση αναφοράς, 0.603 στο `capacity_both`). Δεν βρέθηκε δημοσιευμένο μέγεθος ίδιας εμβέλειας για να βαθμολογηθεί, οπότε αναφέρεται ως μετρημένο χωρίς να του αποδίδεται ετυμηγορία, αντί να επινοηθεί μέτρο σύγκρισης.

A.6 Τι θα το άλλαζε

Η απόκλιση του συντελεστή ταυτοχρονισμού θα έκλεινε αν δινόταν σε κάθε πράκτορα ο δικός του ιδιοσυγκρασιακός χρονισμός ζήτησης από ημέρα σε ημέρα και από ώρα σε ώρα, και όχι μόνο το δικό του πλάτος: για παράδειγμα, τυχαία διατάραξη φάσης ή μεγέθους ανά πράκτορα στην πρωινή και τη βραδινή καμπούρα (η `generate_synthetic_demand` στο `data/loaders.py` εφαρμόζει σήμερα ένα κοινό, ντετερμινιστικό σχήμα σε κάθε πράκτορα) ή, ακόμη καλύτερα, γνήσιες χρονοσειρές ανά νοικοκυριό, ώστε διαφορετικά νοικοκυριά να κάνουν αιχμή σε διαφορετικές ώρες. Σημειώνεται ότι ούτε οι Weng et al. παρέχουν τέτοιες μετρημένες σειρές: τα δικά τους δεδομένα είναι συνθετικά προφίλ NREL SMART-DS, και γι' αυτόν τον λόγο η πηγή αυτή χρησιμοποιείται εδώ ως μέτρο σύγκρισης για ρεαλιστική διαφοροποίηση και όχι ως πηγή μετρημένων δεδομένων νοικοκυριών [10]. Τα μετρημένα δεδομένα OPSD που πλέον παραδίδονται με το αποθετήριο (Ενότητα 4.7) είναι πραγματικά, παραδίδονται όμως ήδη συναθροισμένα: μία σειρά αναφοράς, χτισμένη από τα δύο μόνο νοικοκυριά του OPSD χωρίς επιτόπια παραγωγή, την οποία το μοντέλο εφαρμόζει κοινή σε όλους τους πράκτορες. Το κενό επομένως δεν κλείνει με διαφορετική εφαρμογή αυτής της σειράς, αλλά με γνήσιες σειρές ανά νοικοκυριό σε πλήθος συγκρίσιμο με τον πληθυσμό, δεδομένα που δεν παραδίδονται εδώ. Η χρήση της σειράς OPSD στη θέση της συνθετικής, όπως κάνει η σύγκριση της Ενότητας 7.13, δεν αλλάζει τίποτε εδώ, επειδή και οι δύο σειρές εφαρμόζονται με τον ίδιο τρόπο, ως ένα κοινό συγκεντρωτικό σχήμα κλιμακωμένο ανά πράκτορα, οπότε καμία τους δεν προσθέτει τη διαφοροποίηση χρονισμού ανά πράκτορα που αυτό το κενό πραγματικά χρειάζεται.

Η εποχική απόκλιση χειμώνα προς καλοκαίρι θα έκλεινε με την προσθήκη ρητού όρου ζήτησης ψύξης ή κλιματισμού στη συνθετική γεννήτρια, ή με την αντικατάστασή της από μετρημένα δεδομένα ελληνικής οικιακής ζήτησης. Προηγούμενη εκδοχή αυτού του παραρτήματος ανέφερε ότι τέτοια δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα σε κατάλληλη ανάλυση όταν λήφθηκε η επιλογή δεδομένων της Ενότητας

4.7. Μια μετρημένη σειρά πλέον παραδίδεται και έχει ελεγχθεί (Ενότητα 4.7, Ενότητα 7.13), δεν κλείνει όμως αυτό το συγκεκριμένο κενό, επειδή πρόκειται για γερμανική σειρά OPSD και όχι για ελληνική, οπότε φέρει το σχήμα της γερμανικής βραδινής ρουτίνας και του γερμανικού κλίματος θέρμανσης και όχι το ελληνικό, και εξακολουθεί να μην έχει δικό της όρο θερινής ψύξης. Η βαθμονόμηση ενός ρητού όρου ψύξης έναντι των ίδιων μεγεθών ελληνικής αιχμής ζήτησης του IEA και του Τύπου που αναφέρθηκαν παραπάνω παραμένει επομένως η πιο άμεση διόρθωση ειδικά για αυτή τη γραμμή.

Τα μη τεκμηριωμένα μέτρα σύγκρισης για τον συντελεστή φορτίου και τον λόγο αιχμής προς μέσο όρο θα χρειάζονταν είτε δημοσιευμένο κείμενο σχεδιασμού από διαχειριστή δικτύου ή ρυθμιστική αρχή ειδικά για οικιακούς τροφοδότες XT αυτού του μεγέθους (η αναζήτηση εδώ βρήκε γενικούς ισχυρισμούς επαγγελματικής πρακτικής αλλά τίποτε παραπέμπσιμο), είτε ειδικό υπολογισμό από πραγματικά δεδομένα έξυπνων μετρητών ενός συγκρίσιμου πληθυσμού. Κανένα από τα δύο δεν ήταν διαθέσιμο εντός αυτού του ελέγχου. Καμία από τις αλλαγές αυτές δεν θα απαιτούσε να θιγεί ο ίδιος ο μηχανισμός χωρητικότητας: όλες βρίσκονται ανάντη, στο μοντέλο πληθυσμού και ζήτησης πάνω στο οποίο ο μηχανισμός εδράζεται.

A.7 Επίδραση του μηχανισμού χωρητικότητας στην ευλογοφάνεια

Η σύγκριση της βάσης αναφοράς με το `capacity_both` ($k = 1.0$, `broker_count = 3`, το κύριο κελί της σάρωσης) δεν μετακινεί κάθε στατιστικό σχήματος τροφοδότη που μετρήθηκε εδώ προς πιο τυπικές τιμές. Από τις δέκα γραμμές της Ενότητας A.3, η ώρα της ημερήσιας αιχμής δεν μετακινείται καθόλου (από 20:00 σε 20:00), ενώ η εποχή της ετήσιας αιχμής μετακινείται από τον Δεκέμβριο στον Ιανουάριο, δηλαδή μακριά από το πραγματικό ελληνικό μέτρο σύγκρισης του Αυγούστου και όχι προς αυτό. Τα στατιστικά που όντως μετακινούνται προς την κατεύθυνση που θα έδειχνε ένας συμπεριφορικά πιο διαφοροποιημένος τροφοδότης είναι ο συντελεστής φορτίου, ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο και ο συντελεστής ταυτοχρονισμού μαζί με τον αντίστροφό του, τον συντελεστή διαφοροποίησης. Ο συντελεστής φορτίου ανεβαίνει από 0.287 σε 0.315, ο λόγος αιχμής προς μέσο όρο πέφτει από 3.483 σε 3.172486, και ο συντελεστής ταυτοχρονισμού πέφτει από 0.951 σε 0.906, με τον συντελεστή διαφοροποίησης να ανεβαίνει από 1.051 σε 1.104.

Και οι τρεις μεταβολές έχουν την κατεύθυνση που θα έδειχνε ένας πραγματικός, συμπεριφορικά πιο διαφοροποιημένος τροφοδότης, επειδή το κανάλι αναβολής ζήτησης (απόφαση D7) μετατοπίζει μέρος του φορτίου του πληθυσμού έξω από τις ώρες που ενεργοποιείται η προσαύξηση σπανιότητας. Η Ενότητα 7.3 αναφέρει τον ίδιο μηχανισμό να παράγει τη βελτίωση του συντελεστή μεταβλητότητας της σάρωσης, ενώ το κανάλι της βελτίωσης του λόγου αιχμής προς μέσο όρο είναι, σε αυτόν τον σχεδιασμό και σε αυτούς τους συντελεστές, ο ίδιος ο όγκος της αναβεβλημένης ενέργειας και όχι ο αποσυγχρονισμένος χρονισμός της αναβολής μεταξύ παρόχων, σύμφωνα με το σκέλος ελέγχου της απόφασης D10. Το μέγεθος όμως της μετακίνησης είναι μικρό σε σχέση με το μέγεθος του κενού: ο συντελεστής ταυτοχρονισμού μετακινείται κατά 0.045 μέσα σε ένα κενό περίπου 0.79 (0.951 μείον την τιμή περίπου 0.16 της πρακτικής σχεδιασμού), και ο μηχανισμός δεν αγγίζει τις αιτίες των δύο μεγαλύτερων αποκλίσεων που εντοπίστηκαν παραπάνω, αφού ούτε το κοινό σχήμα χρονισμού της ζήτησης ούτε ο χειμερινός εποχικός πολλαπλασιαστής είναι κάτι που ο μηχανισμός χωρητικότητας διαβάζει ή αγγίζει. Η ειλικρινής ανάγνωση είναι ότι ο μηχανισμός χωρητικότητας μετακινεί αυτόν τον τροφοδότη ένα μικρό βήμα προς την ευλογοφάνεια στα στατιστικά που μπορεί να φτάσει, και αφήνει τις δύο δομικές αποκλίσεις που οφείλονται στα δεδομένα ακριβώς εκεί που τις βρήκε.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Συνοπτική αναφορά επαλήθευσης

Β.1 Τι σημαίνει επαλήθευση εδώ

Η φάση επαλήθευσης έτρεξε κάτω από έναν σκληρό περιορισμό: καμία αλλαγή συμπεριφοράς κάτω από `src/` ή `scripts/`. Το ερώτημα ήταν αν μια γραμμή που φέρει ισχυρισμό και υπολόγιζε αύριο σιωπηλά λάθος αριθμό θα έκανε κάτι να αποτύχει. Το `baseline_manifest.txt` καταγράφει sha256 για 45 αρχεία στην αρχή της φάσης.

Επαλήθευση σημαίνει εδώ τρία είδη τεκμηρίου, χωριστά αναφερόμενα επειδή κανένα δεν υποκαθιστά τα άλλα: η κάλυψη (μια γραμμή εκτελέστηκε υπό έλεγχο, που δεν λέει αν εκτελέστηκε σωστά), ο έλεγχος μεταλλάξεων (σκόπιμο σφάλμα σε καλυμμένη γραμμή εντοπίστηκε, τεκμήριο ότι η αριθμητική της δεσμεύεται) και οι άμεσοι ολικοί έλεγχοι: διαφορές ανά byte, ντετερμινισμός, εγκατάσταση από το μηδέν.

Η κατάσταση που περιγράφεται είναι η τελική. Η ζωντανή επίδειξη και η οργάνολογία της αφαιρέθηκαν πλήρως· η σουίτα δίνει έκτοτε, σε φρέσκο αντίγραφο με νέο εικονικό περιβάλλον από το δεσμευμένο `requirements.txt`, 461 επιτυχημένους και 3 παραλειπόμενους ελέγχους, έναντι 468 και 3 πριν, με τη διαφορά να είναι ακριβώς οι επτά διαγραμμένες συναρτήσεις `test_di_*`. Οι 3 παραλειπόμενοι είναι οι ίδιοι έλεγχοι πίσω από τη σημαία `RUN_SLOW_TESTS`, και οι 45 εγγραφές του μανιφέστου ταιριάζουν: 34 από 34 κάτω από `results/`, 11 από 11 κάτω από `tests/golden/`.

Β.2 Η επιφάνεια που φέρει ισχυρισμούς

Το `surface.md` ορίζει, αρχείο προς αρχείο και εύρος γραμμών προς εύρος γραμμών, ποιος κώδικας επιτρέπεται να αλλάξει έναν αριθμό που καταλήγει στο κείμενο, σε αρχείο αποτελεσμάτων ή σε σχήμα. Εντός: το `capacity.py` ολόκληρο (69 εντολές), το `metrics.py` ολόκληρο (64 εντολές), ο κατά πράκτορα τύπος της μετρικής 4 στο `agents/prosumer.py:90-94`, η διαδρομή D7 στο `agents/consumer.py:90-146`, η `MicrogridModel.step()` (`model.py:246-298`) και ειδικά οι γραμμές 279-281, και στο `scripts/analyze_sweep.py` οι οκτώ στατιστικοί βοηθοί μαζί με την αριθμητική μέσα στις συναρτήσεις που συναρμολογούν τα CSV. Σκόπιμα εκτός: οι συναρτήσεις σχεδίασης, οι διαγνωστικές εκτυπώσεις, κάθε άλλο σενάριο, οι φορτωτές δεδομένων και διαμόρφωσης, και ό,τι στα `consumer.py` και `model.py` δεν είναι η διαδρομή D7 και η `step()`.

Η επιφάνεια ήταν λάθος δύο φορές και διορθώθηκε και τις δύο από επιθεώρηση, όχι από αυτοβεβαίωση: η πρώτη βρήκε το τμήμα «σκόπιμα εκτός» ψευδές για τέσσερις συναρτήσεις που χαρακτηρίζονταν καθαρή ενορχήστρωση ενώ υπολογίζουν δικό τους μέσο, τυπική απόκλιση και διάστημα εμπιστοσύνης, μια σύγκριση ανοχής και κατωφλίου και έναν αριθμό βελτιωμένων ζευγών που το κείμενο παραθέτει άμεσα, μαζί με πέντε από τις έξι ανεξάρτητες θέσεις κλήσης της ζευγαροποίησης ανά σπόρο που ήταν εντελώς ανεκτέλεστες· η δεύτερη βρήκε ότι ο τύπος της μετρικής 4 βρισκόταν εκτός κάθε προηγούμενης έκδοσης και δεν έλαβε καμία από τις 218 υποψήφιες μεταλλάξεις.

Β.3 Έλεγχος μεταλλάξεων

Ο κατάλογος έχει επτά είδη μεταλλάξεων. Η κύρια εκστρατεία παρήγαγε 200 μεταλλάξεις σε σταθερό σπόρο, με βάρος προς τα δύο αρχεία που ήδη ανέφεραν πλήρη κάλυψη: μόλις η κάλυψη απαντήσει «να» για ολόκληρο αρχείο, ο προϋπολογισμός μεταλλάξεων είναι ο μόνος τρόπος να ρωτηθεί αν αυτό που τρέχει είναι σωστό. Κάθε μετάλλαξη τρέχει πρώτα σε στοχευμένο υποσύνολο ελέγχων και, αν

επιζήσει, ξανατρέχει μία φορά στην πλήρη σουίτα πριν αναφερθεί ως επιζώσα· αυτό το δεύτερο στάδιο αφαίρεσε 25 ψευδώς θετικές. Επιθεώρηση βρήκε κατόπιν κενό στη γεννήτρια, η οποία δεν επισκεπτόταν κόμβους επαυξημένης ανάθεσης, οπότε κάθε τέτοιος συσσωρευτής, μαζί με τη γραμμή που το `surface.md` ονομάζει υψηλότερου κινδύνου, είχε λάβει μηδέν υποψήφιος· μετά τη διόρθωση, συμπληρωματική εκστρατεία 18 μεταλλάξεων έδωσε 18 εξουδετερωμένες και 0 επιζώσες. Συνολικά: 218 παραχθείσες, 205 εξουδετερωμένες από την ήδη υπάρχουσα σουίτα, 13 επιβεβαιωμένες επιζώσες.

Διαλογή και των 13: δέκα στο `metrics.py`, όλες μεταλλάξεις οριακών σταθερών (πληθυσμός ενός πράκτορα, ενέργεια ακριβώς 1.0 kWh ή στο διάστημα (0,1] kWh, μέσο τροφοδότη ακριβώς -1, 0 ή 1, ιστορικό 1 ή 2 ωρών, πλήθος βημάτων συσσωρευτή προσάυξεσης ακριβώς 1), ελέγχθηκαν μία προς μία έναντι της καθλωμένης διαμόρφωσης των 200 πρακτόρων και των 8760 ωρών, φυλάσσουν πραγματικό μέγεθος και εξουδετερώθηκαν από πέντε νέους ελέγχους. Τρεις (`metrics.py:87`, `consumer.py:133`, `consumer.py:138`) τεκμηριώνονται αντί να εξουδετερωθούν, επειδή κανένας έλεγχος δεν θα διέκρινε τη μεταλλαγμένη από την αμετάβλητη συμπεριφορά για είσοδο που η γραμμή μπορεί να δει: η πρώτη είναι ισοδύναμη αφού η `np.mean([ ])` επιστρέφει ήδη `nan`, οι άλλες δύο απροσπείλαστες ή ισοδύναμες δεδομένων των αναλλοίωτων μη αρνητικότητας που επιβάλλει το `config/loader.py` σε κάθε παραγωγική είσοδο.

B.4 Κάλυψη κώδικα

Η κάλυψη είναι ανιχνευτής τυφλών σημείων, όχι μέτρο ορθότητας: περιγράφει τι εκτελέστηκε, όχι τι είναι σωστό, και κανένα ποσοστό δεν επιδιώχθηκε ως στόχος. Στο στιγμιότυπο μέτρησης: `capacity.py` 69/69 εντολές και 24/24 διακλαδώσεις· `metrics.py` 64/64 εντολές· η `step()` του `model.py` 100 τοις εκατό σε γραμμές και διακλαδώσεις· η διαδρομή D7 του `consumer.py` επίσης 100 τοις εκατό σε γραμμές και διακλαδώσεις· `analyze_sweep.py` 531 εντολές, 169 χαμένες, 68 τοις εκατό, ως παρενέργεια του ελέγχου δεκατεσσάρων συγκεκριμένων κινδύνων και όχι ως στόχος. Οι αριθμοί είναι το στιγμιότυπο της ενδιάμεσης μέτρησης, με 436 ελέγχους να περνούν τότε, και δεν ξαναμετρήθηκαν στο τέλος της φάσης.

B.5 Ο έλεγχος κενών ισχυρισμών

Το ελάττωμα: ο κεντρικός βοηθός σύγκρισης καθηλώσεων συνέκρινε, στον κλάδο των δεκαδικών, με σχετική και απόλυτη ανοχή $1e-9$ ταυτόχρονα, περνώντας αν ίσχυε οποιαδήποτε από τις δύο. Για τιμή με απόλυτο μέγεθος έως 1 η ενεργή ανοχή καταρρέει στο $1e-9$, και κάτω από $1e-9$ η καθήλωση δεν δεσμεύει τίποτε: περνά οτιδήποτε στο $[-1e-9, 1e-9]$, μαζί με το μηδέν και το λάθος πρόσημο. Σάρωση κάθε τέτοιου πεδίου στα δέκα χρυσά αρχεία που περνούν από αυτόν τον βοηθό βρήκε 7015 τιμές, από τις οποίες 961 ακριβώς μηδενικές· σε 4649 την απόφαση έπαιρνε ο απόλυτος και όχι ο σχετικός κλάδος, και 1005 ήταν πλήρως αδέσμευτες, με χειρότερη μη μηδενική καθήλωση $1.850372e-18$.

Η διόρθωση: καθηλώσεις ακριβούς μηδενός απαιτούν πλέον ακριβή ισότητα, κάθε άλλη περνά από κανόνα μόνο σχετικής ανοχής, πράγμα που κλείνει και τις 4649 κυριαρχούμενες με μία αλλαγή. Η διόρθωση υπερέβαλε, και η υπερβολή εντοπίστηκε από δεύτερη επιθεώρηση: το `capacity_pn1_only` αναπαράγει το `capacity_disabled` ανά bit σε κάθε φυσική μετρική εκ κατασκευής, οπότε η τιμή που καθιλώνεται στις στήλες κατά ζεύγη διαφοράς εκείνων των γραμμών είναι θόρυβος γύρω από αναλυτικό μηδέν, και σχετική συμφωνία σε μέγεθος $1e-17$ θα απαιτούσε περίπου $1e-26$, δώδεκα τάξεις μεγέθους αυστηρότερα από τον θόρυβο. Προστέθηκε δάπεδο απόλυτης ανοχής $1e-12$, μόνο σε γραμμές που σημειώνει ήδη μια προϋπάρχουσα δυαδική στήλη, πάνω από τον κανόνα σχετικής

ανοχής και όχι αντί αυτού. Η αριθμητική περιθωρίου της ίδιας της διόρθωσης ήταν με τη σειρά της λάθος και διορθώθηκε αργότερα από τον έλεγχο πιστοποίησης.

B.6 Αναπαραγωγιμότητα και ντετερμινισμός

Στο στιγμιότυπο της ενδιάμεσης μέτρησης, καθαρό αντίγραφο του αποθετηρίου: ταύτιση με τον κατάλογο εργασίας στο ίδιο commit, 101 παρακολουθούμενα αρχεία, 436 επιτυχίες και 0 αποτυχίες και στις δύο πλευρές. Εγκατάσταση από το μηδέν: νέο εικονικό περιβάλλον έδωσε τις ακριβείς δεσμευμένες εκδόσεις, αλλά η `import mesa` απέτυχε, επειδή το Mesa 3.5.1 εισάγει άνευ όρων μονάδα που απαιτεί `networkx`, το οποίο δεν δηλώνόταν ούτε από τα μεταδεδομένα του Mesa ούτε από το τότε `requirements.txt`. Μετά τη χειροκίνητη προσθήκη του `networkx` 3.6.1 η σουίτα έδωσε 433 επιτυχίες και 3 παραλείψεις, το ίδιο άθροισμα 436, επιβεβαιώνοντας ότι ήταν το μοναδικό σκληρό εμπόδιο. Το εύρημα έχει έκτοτε κλείσει.

Ντετερμινισμός: σταθερή διαμόρφωση (`broker_count 3, capacity_k 1.0, capacity_both`, ορίζοντας 720 ωρών, σπόρος 20260704) εκτελέστηκε δύο φορές στο αντίγραφο και μία στον κατάλογο εργασίας, με όλα τα 12 πεδία του αποτελέσματος σειριοποιημένα σε πλήρη ακρίβεια. Και οι τρεις εκτελέσεις βγήκαν ταυτόσημες ανά byte σε κάθε πεδίο, με τη μέγιστη απόλυτη διαφορά στα δύο πεδία τύπου λεξικού ακριβώς 0.0, και η εκτέλεση ασκούσε πράγματι τον μηχανισμό. Η απόφαση παράλειψης κελιού κατά τη συνέχιση σάρωσης καθηλώνεται πλέον καλώντας τις πραγματικές συναρτήσεις του εκτελεστή, όχι αντιγραμμένη έκφραση σε τοπικό βοήθ.

B.7 Διαδρομές αναπαραγωγής

Εννέα διαδρομές αναπαραγωγής εκτελέστηκαν τότε σε αντίγραφο του αποθετηρίου, ποτέ στα ίδια τα `results/` ή `tests/golden/`, και βγήκαν ταυτόσημες ανά byte, με μία εξαίρεση που ταυτίστηκε μετά την κανονικοποίηση των τελών γραμμής, τεχνούργημα του `checkout`. Η μία από αυτές, η οργανολογία της ζωντανής επίδειξης, αφαιρέθηκε στη συνέχεια, οπότε οκτώ παραμένουν στο παραδιδόμενο αποθετήριο.

Η αντίστροφη αντιστοίχιση χτίστηκε επειδή είναι το σοβαρότερο ερώτημα: από τα 26 πραγματικά τεχνουργήματα κάτω από `results/`, τα 18 έχουν επαληθευμένη διαδρομή, ενώ τα υπόλοιπα 8, σε 6 ονομαστικά αρχεία, έχουν αναγνωρισμένη εντολή παραγωγής που όμως είναι σάρωση, απαγορευμένη στη φάση, οπότε η αναπαραγωγή τους είναι ανεπαλήθευτη, όχι απλώς μη ελεγμένη. Κάθε CSV και σχήμα που εκτελέστηκε και επαληθεύτηκε, επαληθεύτηκε αναπαραγωγίμο από το παραδιδόμενο `parquet` του, το οποίο ανήκει σε εκείνα τα έξι, οπότε «επαληθευμένο» σημαίνει έναντι του τρέχοντος `parquet` και όχι από άκρο σε άκρο από εκτέλεση εξαρχής.

Χωριστά καθηλώνεται η οργανολογία του Παραρτήματος Α: το `scripts/feeder_statistics.py` οδηγεί πραγματικό `MicrogridModel` και αναπαράγει δεκαπέντε από τα δεκαέξι μεγέθη του (το δέκατο έκτο, ο συντελεστής ταυτοχρονισμού, συζητείται παρακάτω), που πριν προέρχονταν από σενάριο μιας χρήσης ποτέ δεσμευμένο στο αποθετήριο. Η έξοδος του καθηλώνεται σε χρυσό αρχείο 20 πεδίων επί 2 ορίζοντες επί 2 διαμορφώσεις, με 82 από 82 ελέγχους διατάραξης να επιβεβαιώνουν ότι η σύγκριση αποτυγχάνει όταν πρέπει· οι τρεις έλεγχοι των 8760 ωρών παραμένουν πίσω από τη σημαία `RUN_SLOW_TESTS`.

B.8 Η ετυμηγορία πιστοποίησης

Ετυμηγορία: PASS. Ο τελικός έλεγχος πιστοποίησης πιστοποίησε τη φάση και, στο ίδιο πέρασμα, βρήκε τρεις ακόμη αδυναμίες, καμία αρκετά σοβαρή ώστε να αλλάξει την ετυμηγορία αλλά καθεμία

πραγματική, και οι τρεις κλεισμένες σε μία επακόλουθη δέσμευση χωρίς αλλαγή αρχείου κάτω από src/. Πρώτον, ενώ το κείμενο δηλώνει ότι ο επιμερισμός του λογιστικού καναλιού είναι αυστηρά ανάλογος του μεριδίου συνεισφοράς, η σουίτα το δέσμευε μόνο δομικά, και ένας διαχωρισμός σταθμισμένος με το τετράγωνο περνούσε και τους 469 ελέγχους της τότε σουίτας· νέος έλεγχος βεβαιώνει τον ίδιο τον λόγο, καθηλώνοντας δηλωμένο μηχανισμό και όχι αναφερόμενο μέγεθος. Δεύτερον και τρίτον, η ανακρίβεια της επιφάνειας για τη μετρική 4 και το λανθασμένο περιθώριο του δαπέδου εκφυλισμένων καθηλώσεων.

Έξι ανταγωνιστικές επιθεωρήσεις έτρεξαν στις επτά συγχωνεύσεις της φάσης και όλες επέστρεψαν ευρήματα που απαιτούσαν διόρθωση, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου πιστοποίησης που τελικά την πέρασε. Ένα PASS εδώ σημαίνει ότι το πακέτο επέζησε έξι γύρων ανταγωνιστικής πίεσης, όχι ότι κανένας γύρος δεν βρήκε τίποτε.

B.9 Τι παραμένει ανεπαλήθευτο

Τα ποσοστά κάλυψης και μια ετυμηγορία PASS δεν είναι τεκμήριο ορθότητας πέρα από ό,τι μέτρησαν. Ακολουθεί ό,τι τα τεκμήρια της φάσης σημειώνουν ως ανέλεγκτο, ελλιπές ή απενεργοποιημένο.

- Οκτώ τεχνουργήματα κάτω από results/, σε 6 αρχεία, αναπαράγονται μόνο με επανεκτέλεση σάρωσης· δύο ακόμη το ίδιο, ένα επίπεδο πίσω, αφού το σενάριο που τα παράγει τρέχει σάρωση 120 εκτελέσεων.
- Το feeder_statistics_pins.json παραμένει εκτός του μανιφέστου κατακερματισμών, επειδή η κεφαλίδα του μανιφέστου προηγείται χρονικά του αρχείου: δομικό κενό, όχι απόκλιση.
- Οι έλεγχοι των 8760 ωρών παραμένουν πίσω από τη σημαία RUN_SLOW_TESTS. Παλινδρόμηση σε κάποιο από τα δεκαέξι μεγέθη του Παραρτήματος A πολύ πιθανόν δεν θα εντοπιζόταν από το υποσύνολο των 240 ωρών που τρέχει προεπιλεγμένα, αφού εκείνος ο ορίζοντας δεν ολοκληρώνει εποχικό κύκλο: αποδεκτό και δηλωμένο κενό.
- Ο συντελεστής ταυτοχρονισμού του Παραρτήματος A τυπώνεται 0.906 έναντι μετρημένου 0.905, τεχνουργημα στρογγυλοποίησης, καλυμμένο από χαλαρή ανοχή 0.5 τοις εκατό.
- Η αναπαραγωγιμότητα ανά byte των results/*.csv σε άλλες πλατφόρμες δεν επαληθεύτηκε: τέσσερα από τα πέντε σενάρια που γράφουν CSV δεν ορίζουν ρητό τερματιστή γραμμής, οπότε μόνο ένα αρχείο είναι εγγυημένα ταυτόσημο ανά byte.
- Τα compare_demand_sources.py και fetch_opsd_demand.py δεν εκτελέστηκαν: το πρώτο επειδή η μόνη του διαδρομή είναι μεγέθους σάρωσης, το δεύτερο επειδή κάνει ζωντανή ανάκτηση από τρίτο μέρος.
- Για τα run_baseline.py, run_sensitivity_sweep.py, run_monopoly_arm.py και analyze_sweep.py επιβεβαιώθηκε μόνο ότι εισάγονται καθαρά: σφάλμα μέσα σε μια main() ή κάτω από πραγματική δεξαμενή διεργασιών δεν καλύπτεται.
- Η υποδομή ελέγχου μεταλλάξεων αναγνωρίζει επτά είδη: σχήμα κινδύνου εκτός αυτών, όπως σφάλμα κατά ένα σε όρισμα βήματος ή λανθασμένη προεπιλεγμένη τιμή, λαμβάνει μηδέν υποψήφιος και είναι αόρατο.
- Οι τρεις επιζώσες τεκμηριώνονται με επιχείρημα, όχι με εξαντλητική απόδειξη· για τις δύο γραμμές του consumer.py το επιχείρημα εξαρτάται από τα τρέχοντα αναλλοίωτα επικύρωσης, και αν εκείνα επέτρεπαν αρνητικό capacity_passthrough ή response_reference_eur_per_kwh θα χρειαζόταν επανέλεγχος.
- Η ζευγαροποίηση ανά σπόρο στη γραμμή analyze_sweep.py:640 εκτελείται, αλλά η ορθότητά της δεν αποδεικνύεται ανεξάρτητα, αφού ο έλεγχος που φτάνει εκεί τυχαίνει να χρησιμοποιεί ταιριαστά σύνολα σπόρων.
- Οι συγκρίσεις ντετερμινισμού και αναπαραγωγιμότητας χρησιμοποίησαν το ίδιο καθολικό περιβάλλον Python και στις δύο πλευρές.
- Καμία σάρωση δεν εκτελέστηκε από άκρο σε άκρο, οπότε τίποτε εδώ δεν λέει κάτι για χρόνο, μνήμη ή ορθότητα σημείων ελέγχου σε πραγματική πολύωρη εκτέλεση.

- Η στήλη `gradient_degenerate` του `surcharge_mode_comparison.csv` δεν συνδέεται με το δάπεδο εκφυλισμένων καθηλώσεων· καμία τρέχουσα τιμή δεν θα χρειαζόταν να φυλαχθεί, οπότε η σύνδεση αφέθηκε ως ανεπαλήθευτη επιφάνεια: λανθάνον κενό, όχι ενεργό.
- Οι αριθμοί κάλυψης εδώ περιγράφουν τι εκτελέστηκε, όχι τι είναι σωστό. Το συνολικό 37 τοις εκατό του αποθετηρίου κυριαρχείται από σενάρια εκτός της επιφάνειας που φέρει ισχυρισμούς και δεν είναι ένδειξη ποιότητας για την επιφάνεια, η οποία αναφέρεται χωριστά στο ή κοντά στο 100 τοις εκατό σε κάθε αρχείο εκτός από τη μία γραμμή που τεκμηριώνεται ως απροσπέλαστη.

Δύο ελλείψεις που η αρχική αναφορά κατέγραφε ως ανοιχτές έχουν έκτοτε κλείσει: το `requirements.txt` δηλώνει πλέον `networkx==3.6.1` και `statsmodels==0.14.5`, και υπάρχει παρακολουθούμενο `README.md` στη ρίζα του αποθετηρίου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πίνακες παραμετροποίησης και αποσπάσματα κώδικα

Γ.1 Εισαγωγή

Το παράρτημα αυτό συγκεντρώνει την πλήρη παραδιδόμενη παραμετροποίηση και τα εκτενή αποσπάσματα κώδικα που συζητά το κύριο κείμενο. Πρόκειται για υλικό που δεν είναι κρίσιμο για να διαβαστεί η εργασία, αλλά είναι απαραίτητο για να ελεγχθεί: κάθε τιμή παρακάτω μεταφέρεται αυτούσια από το `config/default.yaml` και τα έξι σενάρια επικάλυψης κάτω από `config/scenarios/`, και κάθε απόσπασμα είναι πραγματικός κώδικας του αποθετηρίου, αυτούσιος στο δηλωμένο εύρος γραμμών, με τη διαδρομή αρχείου και το εύρος γραμμών δηλωμένα πριν από κάθε παράθεση. Ένα σενάριο δηλώνει ποιο αρχείο επεκτείνει και υπερσχύει μόνο των κλειδιών που αλλάζει· η συγχώνευση γίνεται σε βάθος και το αποτέλεσμα επικυρώνεται πριν χρησιμοποιηθεί, οπότε οι πίνακες που ακολουθούν αρκούν για να ανασυσταθεί η παραδιδόμενη διαμόρφωση και τα έξι σενάρια. Οι διαμορφώσεις των σαρώσεων προκύπτουν από αυτές τις τιμές μαζί με τους άξονες που ορίζουν οι εκτελεστές στο `scripts/` (σπόροι, k , πλήθος παρόχων, τρόπος προσαύξησης, διαίρετης), όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6 και στο Παράρτημα Δ. Στο κύριο σώμα οι τεχνικές ονομασίες του αποθετηρίου δεν χρησιμοποιούνται: οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις `capacity_disabled`, `capacity_pnl_only`, `capacity_pricing_only` και `capacity_both` αναφέρονται εκεί ως βάση αναφοράς, διαμόρφωση μόνο του λογιστικού καναλιού, διαμόρφωση μόνο του καναλιού τιμολόγησης και πλήρης μηχανισμός αντίστοιχα, και κάθε κλειδί παραμετροποίησης αναφέρεται με την ελληνική του περιγραφή, με την αντιστοίχιση να δίνεται από τους πίνακες αυτού του παραρτήματος.

Γ.2 Γενικές παράμετροι προσομοίωσης, πληθυσμού και δεδομένων

Ο Πίνακας Γ.1 δίνει τα μπλοκ `simulation`, `population`, `switching`, `prosumer_dispatch` και `data`, δηλαδή τον ορίζοντα και τον σπόρο τυχαιότητας, τη σύνθεση του πληθυσμού, τον κανόνα αλλαγής παρόχου, τις σταθερές παραμέτρους αντιδραστικής διαχείρισης των παραγωγοκαταναλωτών και τις διαδρομές των δύο σειρών εισόδου. Ο ορίζοντας των 8760 ωρών και ο πληθυσμός των 200 πρακτόρων κρατιούνται σταθεροί σε κάθε σάρωση. Ο σπόρος του αρχείου (20260704) είναι η βάση της σταθερής λίστας τριάντα σπόρων που χρησιμοποιεί ο εκτελεστής σάρωσης (βάση συν μετατόπιση 0 έως 29), ώστε κάθε κελί να τρέχει σε τριάντα σπόρους σε ζευγαρωτή σχεδίαση. Ό,τι άλλο μεταβάλλεται σε ένα πείραμα δηλώνεται ρητά στο σενάριο ή στη γραμμή εντολών του εκτελεστή.

Κλειδί	Τιμή	Μονάδα	Σχόλιο
<code>simulation.horizon_hours</code>	8760	ώρες	ένα έτος σε ωριαία ανάλυση, σταθερά πλαίσιο
<code>simulation.seed</code>	20260704	-	σταθερός για αναπαραγωγιμότητα, αυθαίρετος, μη ρυθμισμένος
<code>population.num_agents</code>	200	πράκτορες	μέγεθος πληθυσμού
<code>population.prosumer_fraction</code>	0.2	κλάσμα	οι παραγωγοκαταναλωτές είναι μειονότητα, σταθερά πλαίσιο
<code>population.profile_mix.pric_e_sensitive</code>	0.4	κλάσμα	μερίδιο προφίλ ευαίσθητου στην τιμή

Κλειδί	Τιμή	Μονάδα	Σχόλιο
population.profile_mix.stability_oriented	0.3	κλάσμα	μερίδιο προφίλ προσανατολισμένου στη σταθερότητα
population.profile_mix.green_preferring	0.3	κλάσμα	μερίδιο προφίλ με προτίμηση στο πράσινο
switching.enabled	true	-	D1: επανεξέταση παρόχου υπό παρατεταμένη παραβίαση ανοχής
prosumer_dispatch.reserve_fraction	0.2	κλάσμα	βραδινό απόθεμα μπαταρίας, κοινό σε όλους (D3)
prosumer_dispatch.evening_reserve_hour	18	ώρα	ώρα μέχρι την οποία δεσμεύεται το βραδινό απόθεμα· από αυτήν και μετά η μπαταρία εκφορτίζεται χωρίς παρακράτηση (D3)
data.solar_profile_path	data/samples/solar_thessaloniki_hourly.csv	-	ωριαία ηλιακή σειρά PVGIS
data.demand_profile_path	data/samples/residential_demand_thessaloniki_hourly.csv	-	συνθετικό προφίλ ζήτησης
data.solar_lat	40.64	μοίρες	γεωγραφικό πλάτος, Θεσσαλονίκη
data.solar_lon	22.95	μοίρες	γεωγραφικό μήκος, Θεσσαλονίκη
data.reference_annual_demand_kwh	4000	kWh	ενημερωτικός στόχος για το παραγόμενο προφίλ ζήτησης
data.demand_series	(σε σχόλιο)	-	επιλέγει synthetic ή opsd· μένει εκτός ώστε η προεπιλογή να είναι ακριβώς synthetic

Πίνακας Γ.1: Γενικές παράμετροι προσομοίωσης, πληθυσμού και δεδομένων.

Γ.3 Εύρη παραμέτρων ανά πράκτορα

Ο Πίνακας Γ.2 δίνει τα οκτώ εύρη από τα οποία δειγματοληπτείται ομοιόμορφα κάθε πράκτορας με τη σειρά τυχαίων αριθμών του μοντέλου (ακέραιες τιμές για τις ώρες) (D4). Δύο από αυτά φέρουν σημείωση επαναβαθμονόμησης: το greenness_threshold (F2) και το switching_penalty_eur_per_kwh (F3).

Παράμετρος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδα	Σχόλιο
demand_scale	0.6	1.6	πολλαπλασιαστής	κλίμακα ζήτησης του πράκτορα επί την κοινή σειρά
price_tolerance_eur_per_kwh	0.18	0.32	EUR/kWh	ανοχή τιμής πριν από επανεξέταση
volatility_tolerance_eur_per_kwh	0.01	0.05	EUR/kWh	ανοχή μεταβλητότητας τιμής

Παράμετρος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδα	Σχόλιο
greenness_threshold	0.20	0.55	-	F2: διευρύνθηκε ώστε να περικλείει την πρασινότητα 0.30 του ρυθμιζόμενου παρόχου· το προηγούμενο εύρος δεν επικάλυπτε καμία πραγματική τιμή πρασινότητας, ενώ ο μεταβλητός πάροχος (0.10) παραμένει απορριπτέος
switching_penalty_eur_per_kwh	0.02	0.06	EUR/kWh	F3: επαναβαθμονομήθηκε στην τάξη μεγέθους των παρατηρούμενων διαφορών τιμής, αφού το προηγούμενο εύρος μπλόκαρε 0 από 78 επανεξετάσεις σε ένα έτος
sustained_breach_hours	12	96	ώρες	διάρκεια παρατεταμένης παραβίασης πριν από αλλαγή
prosumer_pv_capacity_kwp	1.5	4.5	kWp	εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β παραγωγοκαταναλωτή
prosumer_battery_capacity_kwh	4.0	12.0	kWh	χωρητικότητα μπαταρίας παραγωγοκαταναλωτή

Πίνακας Γ.2: Τα οκτώ εύρη δειγματοληψίας των παραμέτρων ανά πράκτορα.

Γ.4 Παράμετροι του μηχανισμού χωρητικότητας

Ο Πίνακας Γ.3 δίνει κάθε κλειδί του μπλοκ `capacity_mechanism` με την παραδιδόμενη τιμή του. Ο μηχανισμός είναι απενεργοποιημένος στην προεπιλογή, ώστε το `config/default.yaml` να αναπαράγει τη βάση αναφοράς ανά byte. Τα δύο κανάλια ανάδρασης είναι χωριστές σημαίες ακριβώς για να μπορούν να αφαιρεθούν ανεξάρτητα, ενώ οι δύο τελευταίες γραμμές του πίνακα είναι δομικοί συντελεστές της απόκρισης ζήτησης, σταθεροί σε ολόκληρη την κύρια σάρωση των 1440 εκτελέσεων. Μαζί με το `response_reference_eur_per_kwh` είναι οι τρεις συντελεστές που μεταβάλλει η μεταγενέστερη παραγοντική σάρωση D9 (Ενότητα 6.7).

Κλειδί	Τιμή	Μονάδα	Σχόλιο
enabled	false	-	κύρια σημαία: με false ο μηχανισμός δεν εκτελείται καθόλου
feedback_pnl	false	-	λογιστικό κανάλι, μόνο οικονομικά παρόχου, χωρίς τιμολογιακό σήμα
feedback_pricing	false	-	κανάλι τιμολόγησης: η προσαύξηση επόμενου βήματος, ο φυσικός δρόμος προς τη μετρική 3
window	168	ώρες	κυλιόμενο παράθυρο μίας εβδομάδας για μέσο και τυπική απόκλιση

Κλειδί	Τιμή	Μονάδα	Σχόλιο
k	1.0	-	κατώφλι ίσο με μέσο συν k επί τυπική απόκλιση στο παράθυρο
charge_rate_eur_per_kwh	0.15	EUR/kWh υπέρβασης	ορίζει το μέγεθος της συνολικής χρέωσης
capacity_passthrough	0.10	EUR/kWh (διαστατικά)	συντελεστής ισχύος σήματος: πολλαπλασιάζει το αδιάστατο μερίδιο συνεισφοράς και άρα φέρει ο ίδιος EUR/kWh, αλλά δεν είναι τιμολογιακός συντελεστής (Ενότητα 5.5)
capacity_surcharge_mode	proportional	-	D10: proportional (παραδιδόμενο), synchronized και renormalized μόνο για ανάλυση
capacity_surcharge_divisor	null	-	D11: null σημαίνει ότι στη θέση του διαιρέτη χρησιμοποιείται το πλήθος των παρόχων της εκτέλεσης, όπως ορίζεται στη διαμόρφωση. Ακέραιο M μόνο για το σκέλος εξισωμένης δόσης: τεχνητός έλεγχος ανάλυσης χωρίς ερμηνεία αγοράς, αφού υπό τον παραδιδόμενο κανόνα επιμερισμού ένας πραγματικός μονοπωλητής δεν μπορεί να επιλέξει να λάβει μόνο κλάσμα του σήματος
response_reference_eur_per_kwh	0.05	EUR/kWh	D7: μέγεθος αναφοράς προσαύξησης για τον συντελεστή απόκρισης
deferrable_fraction	0.2	κλάσμα	D7: μέρος της ωριαίας βασικής ζήτησης που μπορεί να αναβληθεί
payback_cap_fraction	0.5	κλάσμα	D7: όριο αποπληρωμής ανά ώρα ως κλάσμα της βασικής ζήτησης

Πίνακας Γ.3: Οι παράμετροι του μηχανισμού χωρητικότητας.

Γ.5 Παράμετροι των τριών παρόχων

Ο Πίνακας Γ.4 δίνει τα τρία μπλοκ παρόχων με όλα τους τα κλειδιά. Οι τιμές επιπέδου τιμής σε EUR/kWh (0.19 για τον ρυθμιζόμενο, 0.12 για τον μεταβλητό, 0.04 προσαύξηση για τον πράσινο) είναι αντιπροσωπευτικές πρόσφατες τιμές αναφοράς, με τις δύο πρώτες αγκυρωμένες σε κατονομασμένες δημόσιες πηγές, και καμία τους δεν προσαρμόστηκε σε αποτέλεσμα. Οι υπόλοιπες παράμετροι σε EUR/kWh είναι αντιπροσωπευτικές δομικές επιλογές, με μία ρητή εξαίρεση: το shock_scale_eur_per_kwh επαναβαθμονομήθηκε (F4) ώστε το δάπεδο τιμής να δεσμεύει σπάνια,

Παραρτήματα

όπως καταγράφει η αντίστοιχη γραμμή του πίνακα. Τα τρία αρχέτυπα διαφέρουν στον κανόνα τιμολόγησης και στην πρασινότητα: εποχική συνάρτηση για τον ρυθμιζόμενο, αυτοπαλίνδρομη διαταραχή με βαριές ουρές για τον μεταβλητό, σταθερή προσαύξηση για τον πράσινο.

Πάροχος	Κλειδί	Τιμή	Σχόλιο
ρυθμιζόμενη επιχείρηση κοινής ωφέλειας	id, type	regulated_utility	αναγνωριστικό και τύπος
	name	Regulated Utility	εμφανιζόμενο όνομα
	greenness	0.30	χαμηλή προς μεσαία, τυπικό μείγμα δικτύου
	base_eur_per_kwh	0.19	βασική τιμή, αντιπροσωπευτική πρόσφατη τιμή αναφοράς
	seasonal_amplitude_eur_per_kwh	0.02	εποχική διακύμανση χειμερινής θέρμανσης
	seasonal_peak_day	15	εποχική αιχμή στα μέσα Ιανουαρίου
μεταβλητός χαμηλού κόστους	id, type	volatile_low_cost	αναγνωριστικό και τύπος
	name	Volatile Low-Cost	εμφανιζόμενο όνομα
	greenness	0.10	η χαμηλότερη των τριών
	baseline_eur_per_kwh	0.12	φθινή βάση κάτω από το ρυθμιζόμενο επίπεδο
	mean_reversion_phi	0.85	εμμονή της AR(1) διαταραχής (D5)
	shock_scale_eur_per_kwh	0.015	F4: μειώθηκε ώστε το δάπεδο τιμής να δεσμεύει ως σπάνιος φύλακας ουράς
	shock_degrees_of_freedom	3	βαθμοί ελευθερίας Student-t, βαριές ουρές (D5)
	price_floor_eur_per_kwh	0.03	κρατά την τιμή θετική υπό μεγάλη αρνητική διαταραχή
	price_cap_multiplier	4.0	ήπιο ανώτατο όριο αιχμής, επί τη βασική τιμή
πράσινος υψηλής χρέωσης	id, type	premium_green	αναγνωριστικό και τύπος
	name	Premium Green	εμφανιζόμενο όνομα

Πάροχος	Κλειδί	Τιμή	Σχόλιο
	greenness	0.95	η υψηλότερη των τριών
	markup_eur_per_kwh	0.04	προσαύξηση πάνω από τη βάση του ρυθμιζόμενου παρόχου

Πίνακας Γ.4: Οι πλήρεις παράμετροι των τριών αρχετύπων παρόχου.

Γ.6 Τα έξι σενάρια επικάλυψης

Κάθε σενάριο δηλώνει extends: ../default.yaml και υπερισχύει μόνο όσων αλλάζει, με τη συγχώνευση να γίνεται σε βάθος από τον φορτωτή. Ο Πίνακας Γ.5 δίνει και τα έξι.

Αρχείο	scenario_name	Τι υπερισχύει
capacity_disabled.yaml	capacity_disabled	enabled: false, δηλωμένο ρητά ώστε οι τέσσερις αφαιρετικές διαμορφώσεις να σχηματίζουν πλήρες σύνολο
capacity_pnl_only.yaml	capacity_pnl_only	enabled: true, feedback_pnl: true, feedback_pricing: false: μόνο οικονομικά παρόχου, καμία κίνηση της μετρικής 3 εκ κατασκευής
capacity_pricing_only.yaml	capacity_pricing_only	enabled: true, feedback_pnl: false, feedback_pricing: true: μόνο το κανάλι που μπορεί να κινήσει τη μετρική 3
capacity_both.yaml	capacity_both	enabled: true και τα δύο κανάλια true, ταυτόχρονα ενεργά
monopoly_baseline.yaml	monopoly_baseline	switching.enabled: false και σύνολο παρόχων με έναν μόνο ρυθμιζόμενο πάροχο (ίδιες τιμές με το default.yaml)
opsd_demand.yaml	opsd_demand_comparison	data.demand_series: opsd, δηλαδή σειρά αντλημένη από μετρημένα δεδομένα OPSD (δύο συναθροισμένα νοικοκυριά) αντί συνθετικού προφίλ· δεν αλλάζει το ζήτημα του ταυτοχρονισμού, αφού κάθε πράκτορας διαβάσει και πάλι την ίδια κοινή σειρά

Πίνακας Γ.5: Τα έξι σενάρια επικάλυψης.

Γ.7 Το άρθρωμα του μηχανισμού χωρητικότητας

Παρατίθεται ολόκληρο το άρθρωμα του μηχανισμού χωρητικότητας, δηλαδή το αρχείο src/microgrid_sim/environment/capacity.py, γραμμές 1 έως 256, αυτούσιο. Είναι ο κώδικας που περιγράφει το Κεφάλαιο 5: η τεκμηρίωση του αρθρώματος, η κλάση αποτελέσματος βήματος, ο έλεγχος των ορισμάτων, το κυλιόμενο παράθυρο με το κατώφλι, την υπέρβαση και τη χρέωση, ο αυστηρά αναλογικός επιμερισμός, οι τρεις τρόποι κατανομής της προσαύξησης με τον διαιρέτη, και ο ρυθμός ενεργοποίησης.

```

"""Capacity mechanism (D6): shared-feeder scarcity charge, billing signal only.

No power flow, no voltage, no line limits: this module only ever consumes a
scalar "feeder net import" figure (already computed elsewhere from demand
minus PV minus battery discharge) and a per-broker contribution breakdown of
that same figure, and produces EUR charge/allocation/surcharge numbers.

Deterministic given feeder state: this module draws ZERO random numbers, so
enabling it, or flipping either feedback channel, never perturbs the RNG
stream consumed elsewhere in the model (broker shocks, population sampling).
All four ablations therefore share an identical RNG draw sequence at a given
seed; any measured difference between them is the mechanism, not divergent
randomness.

capacity_passthrough is a signal-strength coefficient that scales a
dimensionless contribution share into a next-step price adder. It is NOT a
EUR/kWh tariff rate and must never be described as one; charge_rate_eur_per_kwh
(a EUR per kWh-of-excess coefficient) is the separate quantity that sets the
CHARGE magnitude.

surcharge_mode (D10) controls only how the SAME total signal strength is
spread across brokers' next-step surcharges: "proportional" (default, the
original behaviour) splits it by contribution share; "synchronized" and
"renormalized" are analysis-only controls that separate desynchronized
deferral timing from deferred volume (see docs/DECISIONS.md D10). The
allocations (P&L channel) are always strictly proportional, in every mode.

surcharge_divisor (D11) decouples the pricing channel's effective broker
count from the actual one, so a single broker can be evaluated as though it
faced the per-broker signal strength an M-broker market would deliver. It is
an ARTIFICIAL ANALYSIS-ONLY CONTROL WITH NO MARKET INTERPRETATION: under the
shipped allocation rule a broker cannot choose to receive passthrough/M, it
receives the full passthrough its contribution share entitles it to, by
construction. Its only purpose is the D11 dose-matched monopoly arm, which
needs to hold broker_count at 1 (one supplier) while separately dialing the
per-supplier dose to whatever an M-supplier market would deliver, something
the shipped design cannot do because broker_count moves both the supplier
count and the per-broker signal strength at once. Default None means "use the
actual active broker count", which is the shipped behaviour, bit for bit; the
substitution never runs at all in that case (see step() below), and every
existing result and golden-master pin is therefore untouched by this control's
existence. The allocations (P&L channel) are never affected by the divisor,
exactly as they are never affected by surcharge_mode.
"""

from __future__ import annotations

import statistics
from collections import deque
from dataclasses import dataclass, field

@dataclass(frozen=True)
class CapacityStepResult:
    """Everything the mechanism computed for one hourly step.

    threshold_kwh is None while the rolling window is not yet full (no charge
    can be levied yet). It is a threshold on the feeder's own net import
    (mean + k * std over the trailing window), so its unit is kWh, not EUR;
    an earlier name of threshold_eur said otherwise and was wrong.
    allocations_eur and surcharges_eur_per_kwh are keyed
    by the same broker ids as the contributions dict passed into step(), and
    are exactly 0.0 for every broker whenever total_charge_eur is 0.0 or no
    broker has a positive contribution.
    """

    threshold_kwh: float | None
    excess_kwh: float
    total_charge_eur: float
    allocations_eur: dict = field(default_factory=dict)

```

```

    surcharges_eur_per_kwh: dict = field(default_factory=dict)

SURCHARGE_MODES = ("proportional", "synchronized", "renormalized")

class CapacityMechanism:
    """Stateful rolling-window scarcity-charge calculator (D6).

    Owns only: the trailing window of feeder net import samples, and
    run-level audit accumulators (total charge levied, hours observed, hours
    with positive excess). It does NOT own broker ledgers or next-step price
    state; MicrogridModel applies allocations_eur / surcharges_eur_per_kwh
    selectively depending on which feedback channel(s) are ablated in, which
    keeps the two feedback channels cleanly, independently switchable.
    """

    def __init__(
        self,
        window: int,
        k: float,
        charge_rate_eur_per_kwh: float,
        capacity_passthrough: float,
        surcharge_mode: str = "proportional",
        surcharge_divisor: int | None = None,
    ):
        if window < 1:
            raise ValueError(f"window must be >= 1, got {window}")
        if k < 0:
            raise ValueError(f"k must be >= 0, got {k}")
        if surcharge_mode not in SURCHARGE_MODES:
            raise ValueError(f"surcharge_mode must be one of {SURCHARGE_MODES}, got
{s surcharge_mode!r}")
        # bool is an int subclass in Python, so isinstance(x, bool) has to be
        # checked before isinstance(x, int) or True/False would silently pass
        # as 1/0 (the same trap _validate_capacity_mechanism in
        # config/loader.py already guards against for every other numeric key).
        if surcharge_divisor is not None and (
            isinstance(surcharge_divisor, bool) or not isinstance(surcharge_divisor, int) or
            surcharge_divisor < 1
        ):
            raise ValueError(f"surcharge_divisor must be None or an int >= 1, got
{s surcharge_divisor!r}")
        self.window = window
        self.k = k
        self.charge_rate_eur_per_kwh = charge_rate_eur_per_kwh
        self.capacity_passthrough = capacity_passthrough
        self.surcharge_mode = surcharge_mode
        self.surcharge_divisor = surcharge_divisor

        self._history: deque[float] = deque(maxlen=window)

        # Run-level audit accumulators (Phase 5/6 use); see
        # environment/metrics.py's compute_capacity_audit.
        self.total_charge_eur = 0.0
        self.hours_observed = 0
        self.hours_with_excess = 0

    def step(self, feeder_net_import_kwh: float, broker_contributions_kwh: dict) ->
CapacityStepResult:
        """Advance the mechanism by one hourly step.

        feeder_net_import_kwh: the ACTUAL (post-demand-deferral) feeder net
        import for this step (sum over all agents of demand minus PV minus
        battery discharge).
        broker_contributions_kwh: mapping broker_id -> the SIGNED sum of net
        import of that broker's current customers this step (may be negative
        for a broker whose customers net-exported this step).

        Per the order of operations this is called AFTER the sample has

```

```

conceptually occurred, and this call itself both appends the sample to
the rolling window and evaluates the threshold/excess/charge against
that same, just-appended window (i.e. the trailing W hours ending at
and including this step).
"""
self._history.append(feeder_net_import_kwh)
self.hours_observed += 1
broker_ids = list(broker_contributions_kwh.keys())

if len(self._history) < self.window:
    # Window not filled: no charge is levied yet (D6).
    zero_allocations = {broker_id: 0.0 for broker_id in broker_ids}
    zero_surcharges = {broker_id: 0.0 for broker_id in broker_ids}
    return CapacityStepResult(None, 0.0, 0.0, zero_allocations, zero_surcharges)

mean = statistics.fmean(self._history)
std = statistics.pstdev(self._history)
threshold = mean + self.k * std
excess = max(0.0, feeder_net_import_kwh - threshold)
total_charge = self.charge_rate_eur_per_kwh * excess

self.total_charge_eur += total_charge
if total_charge > 0.0:
    self.hours_with_excess += 1

positive_contrib = {broker_id: max(0.0, value) for broker_id, value in
broker_contributions_kwh.items()}
sum_positive_contrib = sum(positive_contrib.values())

if total_charge <= 0.0 or sum_positive_contrib <= 0.0:
    allocations = {broker_id: 0.0 for broker_id in broker_ids}
    surcharges = {broker_id: 0.0 for broker_id in broker_ids}
else:
    # Allocations (the P&L channel) stay strictly proportional to
    # contribution share in every mode: D10 only varies how the
    # pricing channel spreads the same total signal strength across
    # brokers, never how the ledger charge itself is billed.
    allocations = {
        broker_id: total_charge * (contribution / sum_positive_contrib)
        for broker_id, contribution in positive_contrib.items()
    }
    num_brokers = len(broker_ids)
    # D11: the divisor substitutes N_eff (self.surcharge_divisor) for
    # the actual broker count N wherever the pricing-channel formula
    # depends on N, so a broker_count-1 monopolist can be evaluated as
    # though it faced an M-supplier market's per-broker signal
    # strength. When the divisor is None (the default), N_eff is N and
    # the branch below takes the ORIGINAL, pre-D11 expression with no
    # extra arithmetic at all (not a multiply by a computed 1.0), so
    # the divisor being absent from a config is provably a no-op down
    # to the bit, not merely "close" (guardrail 1).
    if self.surcharge_mode == "synchronized":
        # Every broker gets the identical surcharge, including
        # brokers with zero or negative contribution, so long as the
        # step levied a charge at all (the early exit above still
        # zeroes every mode). The sum across brokers is
        # capacity_passthrough up to float rounding, matching
        # proportional's total, so total signal strength is preserved
        # while cross-broker variation is removed entirely (D10).
        # D11: surcharge_b = passthrough / N_eff; N_eff is N when the
        # divisor is unset, which is exactly the pre-D11 expression.
        if self.surcharge_divisor is None:
            surcharges = {broker_id: self.capacity_passthrough / num_brokers for
broker_id in broker_ids}
        else:
            surcharges = {
                broker_id: self.capacity_passthrough / self.surcharge_divisor for
broker_id in broker_ids
            }
    elif self.surcharge_mode == "renormalized":

```

```

# Rescales proportional's share by broker count so the MEAN
# surcharge across brokers stays capacity_passthrough
# regardless of N, holding deferred volume roughly constant
# across broker counts while cross-broker variation survives
# (D10); its own total is therefore capacity_passthrough * N,
# not capacity_passthrough.
#
# D11's substitution (share_b * N/N_eff for share_b, N_eff for
# N) gives passthrough * share_b * (N/N_eff) * N_eff, which is
# algebraically identical to passthrough * share_b * N for any
# N_eff: the N_eff introduced by the substitution and the one
# the formula multiplies back by cancel exactly. Renormalized
# is therefore N-invariant BY CONSTRUCTION, precisely because
# its whole point is a mean surcharge of capacity_passthrough
# regardless of broker count; pretending the count is M cannot
# change that. Computing the substituted form literally
# (divide by N_eff, then multiply by N_eff) would reintroduce
# a division/multiplication round-trip that need not return
# the original float in IEEE754, so this stays written in the
# shipped form (no self.surcharge_divisor reference at all)
# to keep it exactly, not just approximately, unchanged.
surcharges = {
    broker_id: self.capacity_passthrough * (contribution /
sum_positive_contrib) * num_brokers
    for broker_id, contribution in positive_contrib.items()
}
else:
    # proportional. D11: surcharge_b = passthrough * share_b *
    # (N/N_eff); N_eff is N when the divisor is unset, and
    # N/N_eff would then be exactly 1.0, but that branch is
    # written as the literal pre-D11 expression below rather than
    # as this formula times a computed 1.0, so no extra
    # arithmetic happens when the divisor is absent.
    if self.surcharge_divisor is None:
        surcharges = {
            broker_id: self.capacity_passthrough * (contribution /
sum_positive_contrib)
            for broker_id, contribution in positive_contrib.items()
        }
    else:
        surcharges = {
            broker_id: self.capacity_passthrough
            * (contribution / sum_positive_contrib)
            * (num_brokers / self.surcharge_divisor)
            for broker_id, contribution in positive_contrib.items()
        }

return CapacityStepResult(threshold, excess, total_charge, allocations, surcharges)

def fire_rate(self) -> float:
    """Fraction of observed hours with a positive excess (a positive
    charge levied), including the window-not-filled hours as non-firing."""
    if self.hours_observed == 0:
        return 0.0
    return self.hours_with_excess / self.hours_observed

```

Γ.8 Ο ωριαίος βρόχος βήματος

Παρατίθεται η μέθοδος `MicrogridModel.step()` από το `src/microgrid_sim/environment/model.py`, γραμμές 246 έως 298, ολόκληρη και αυτούσια. Είναι η σειρά πράξεων του ωριαίου βήματος που περιγράφουν τα Κεφάλαια 4 και 5: προσφορές τιμών με την προσαύξηση του προηγούμενου βήματος, δράση των πρακτόρων, άθροιση της καθαρής εισαγωγής του τροφοδότη, βήμα του μηχανισμού και εφαρμογή των δύο καναλιών ανάδρασης, καθένα κάτω από τη δική του σημαία.

```

def step(self) -> None:
    hour = self.current_hour
    context: dict = {}
    # Step 1 (D6 order of operations): brokers quote exactly as before (the
    # volatile broker draws exactly one shock regardless, so the RNG
    # stream is identical across all four ablations); each broker's
    # surcharge CARRIED OVER from the previous step (pricing channel only;
    # all-zero otherwise) is added on top afterwards, never inside quote().
    base_prices = {broker_id: broker.quote(hour, context) for broker_id, broker in
self.brokers.items()}
    applied_surcharges = dict(self.broker_surcharges)
    self.current_prices = {
        broker_id: base_prices[broker_id] + applied_surcharges.get(broker_id, 0.0)
        for broker_id in self.brokers
    }
    for broker_id, surcharge in applied_surcharges.items():
        self._surcharge_accum[broker_id] += surcharge
    self._surcharge_steps += 1

    # Step 2: agents act. Every agent (consumer AND prosumer, via the
    # shared Consumer._apply_demand_deferral) reads its own broker's
    # current surcharge (self.broker_surcharges, just applied above) to
    # run the D7 price-elastic demand-deferral channel BEFORE a
    # prosumer's unmodified D3 PV/battery dispatch. Each agent's
    # last_broker_id records which broker actually served it THIS step,
    # even if it switches broker at the tail end of its own step() call.
    self.agents.shuffle_do("step")

    # Step 3: this step's ACTUAL (post-deferral) feeder net import;
    # metric 3 is computed from this same history, unchanged.
    feeder_net_import_kwh = sum(agent.last_net_import_kwh for agent in self.agents)
    self.feeder_net_import_history.append(feeder_net_import_kwh)

    if self.capacity_enabled:
        broker_contributions_kwh = {broker_id: 0.0 for broker_id in self.brokers}
        for agent in self.agents:
            broker_contributions_kwh[agent.last_broker_id] += agent.last_net_import_kwh

        # Step 4: threshold, excess, total charge, allocations.
        result = self._capacity.step(feeder_net_import_kwh, broker_contributions_kwh)

        # Step 5: P&L channel, independently ablatable.
        if self.capacity_feedback_pnl:
            for broker_id, allocation_eur in result.allocations_eur.items():
                self.brokers[broker_id].debit_capacity_charge(allocation_eur)

        # Step 6: pricing channel, independently ablatable; else the
        # next-step surcharges are explicitly zero.
        if self.capacity_feedback_pricing:
            self.broker_surcharges = dict(result.surcharges_eur_per_kwh)
        else:
            self.broker_surcharges = {broker_id: 0.0 for broker_id in self.brokers}

    self.current_hour += 1

```

Γ.9 Ο κανόνας απόκρισης του καταναλωτή

Παρατίθεται ολόκληρη η μέθοδος `Consumer._apply_demand_deferral()` από το `src/microgrid_sim/agents/consumer.py`, γραμμές 105 έως 146, αυτούσια, μαζί με την ενσωματωμένη τεκμηρίωσή της. Ο πυρήνας της διαδρομής D7, δηλαδή οι τρεις κλάδοι της αναβολής, της αποπληρωμής και της αδράνειας που περιγράφει η Ενότητα 5.7, βρίσκεται στις γραμμές 128 έως 146.

```

def _apply_demand_deferral(self, hour: int, base_kwh: float) -> float:
    """Phase 3b (D7): price-elastic intra-day demand deferral, the
    physical channel to metric 3 (replaces D6's prosumer storage-response,
    removed). Shared by Consumer and Prosumer (Prosumer does not override
    this); for a Prosumer this runs BEFORE the unchanged D3 PV/battery
    dispatch (see Prosumer._compute_net_import_kwh), so the prosumer's
    battery/PV logic sees the deferred/served demand, not raw base demand.
    Forecast-free (reacts only to the CURRENT surcharge), deterministic,
    draws no RNG. Inert (served == base every hour) whenever the
    surcharge stays identically zero for the whole run -- exactly the
    capacity_disabled / capacity_pnl_only case -- which preserves the
    baseline byte-for-byte.

    The bucket carries across the day boundary and is not forced to
    empty at any particular clock hour (Phase 3c: an earlier version
    reset the bucket at hour_of_day == 0 and force-repaid any residual at
    hour_of_day == 23; that dumped an evening peak's whole deferred
    residual into a single shoulder hour, manufacturing an artificial
    spike that could itself become the run's global peak). Energy
    conservation is therefore a RUN-level property: total served demand
    equals total base demand up to whatever is still sitting in the
    bucket when the run ends.
    """
    surcharge = self._current_capacity_surcharge()

    if surcharge > 0.0:
        response_reference = getattr(self.model,
        "capacity_response_reference_eur_per_kwh", 0.0)
        deferrable_fraction = getattr(self.model, "capacity_deferrable_fraction", 0.0)
        factor = min(max(surcharge / response_reference, 0.0), 1.0) if response_reference
        > 0.0 else 0.0
        defer_kwh = deferrable_fraction * base_kwh * factor
        served_kwh = base_kwh - defer_kwh
        self.deferred_kwh += defer_kwh
        self.total_deferred_kwh += defer_kwh
    elif surcharge == 0.0 and self.deferred_kwh > 0.0:
        payback_cap_fraction = getattr(self.model, "capacity_payback_cap_fraction", 0.0)
        payback_kwh = min(self.deferred_kwh, payback_cap_fraction * base_kwh)
        served_kwh = base_kwh + payback_kwh
        self.deferred_kwh -= payback_kwh
    else:
        served_kwh = base_kwh

    return served_kwh

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Οδηγός εκτέλεσης του λογισμικού

Δ.1 Απαιτήσεις και εγκατάσταση

Το λογισμικό απαιτεί Python 3.12 ή νεότερη έκδοση. Από τη ρίζα του αποθετηρίου δημιουργείται και ενεργοποιείται εικονικό περιβάλλον και εγκαθίστανται οι εξαρτήσεις:

```
python -m venv .venv
.venv\Scripts\activate      # Windows
source .venv/bin/activate   # Linux/macOS
pip install -r requirements.txt
```

Όλες οι εκδόσεις είναι καθηλωμένες σε αυτές με τις οποίες παρήχθησαν τα αποτελέσματα. Το `networkx` περιλαμβάνεται στο `requirements.txt` παρότι το έργο δεν το εισάγει ποτέ απευθείας: το Mesa το χρειάζεται και δεν το δηλώνει, οπότε μια καθαρή εγκατάσταση αποτυγχάνει στο `import mesa` χωρίς αυτό.

Δ.2 Εκτέλεση των ελέγχων

```
python -m pytest -n 16 -q
```

Η σουίτα ελέγχων ολοκληρώνεται σε περίπου ένα λεπτό σε 16 πυρήνες όταν ο ενδιαμέσος κώδικας είναι ήδη μεταγλωττισμένος, ενώ σε μια πρώτη εκτέλεση μέσα σε καινούριο περιβάλλον αναμένονται λίγα λεπτά. Τρεις έλεγχοι παραλείπονται εξ ορισμού: επαναλαμβάνουν τα στατιστικά τροφοδοτή των 8760 ωρών, διαρκούν αρκετά λεπτά και εκτελούνται όταν έχει τεθεί η μεταβλητή `RUN_SLOW_TESTS=1`.

Δ.3 Εκτέλεση του μοντέλου

```
python scripts/run_baseline.py
```

Η εντολή αυτή εκτελεί τη ντετερμινιστική βάση αναφοράς μονοπωλίου ενός παρόχου για 8760 ώρες, από το `config/scenarios/monopoly_baseline.yaml`, και τυπώνει τις τέσσερις μετρικές: μέσο κόστος ανά πράκτορα, κατανομή φορτίου μεταξύ παρόχων, ευστάθεια τροφοδοτή (στατιστική μεταβλητότητα της σειράς τροφοδοτή, βλ. Ενότητα 4.8) και αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών. Το ανταγωνιστικό σενάριο των τριών παρόχων και ο σταθερός σπόρος τυχαιότητας βρίσκονται στο `config/default.yaml`. Κάθε εκτέλεση είναι ντετερμινιστική δεδομένου του ζεύγους διαμόρφωσης και σπόρου τυχαιότητας: στο ίδιο περιβάλλον Python, ίδια διαμόρφωση και ίδιος σπόρος έδωσαν ταυτόσημες μετρικές στους ελέγχους ντετερμινισμού (βλ. Παράρτημα Β). Η ταυτότητα ανά byte σε άλλη πλατφόρμα ή σε άλλη έκδοση εξαρτήσεων δεν έχει επαληθευτεί.

Δ.4 Εκτέλεση των σαρώσεων

Τα τέσσερα κύρια σημεία εισόδου των σαρώσεων είναι τα `scripts/run_sensitivity_sweep.py`, `scripts/run_structural_sweep.py`, `scripts/run_monopoly_arm.py` και `scripts/run_dose_matched_monopoly.py`. Οι δύο συμπληρωματικές σαρώσεις παράγονται από το `scripts/run_sensitivity_sweep.py` με `--mode full --k-values 0.5,1.0 --broker-counts 2,3,5 --ablations capacity_disabled,capacity_both --modes synchronized,renormalized --output results/sweep_surcharge_mode.parquet` (κατανομή προσαύξησης, D10, 720 εκτελέσεις· η παράλειψη του `--output` θα έγραφε τις γραμμές στο `results/sweep_raw.parquet` της κύριας σάρωσης) και από το `scripts/compare_demand_sources.py` (σύγκριση πηγών ζήτησης, 120 εκτελέσεις). Η σάρωση

ευαισθησίας εκτελεί το ανταγωνιστικό σενάριο σε ολόκληρο το πλέγμα των 1440 εκτελέσεων. Η δομική σάρωση εκτελείται στο σημείο λειτουργίας της κύριας σάρωσης ($k = 1.0$, τρεις πάροχοι) και σαρώνει εκεί τους τρεις δομικούς συντελεστές, δίνοντας 2880 γραμμές από 1510 εκτελέσεις μοντέλου (βλ. Κεφάλαιο 6). Τα δύο σκέλη μονοπωλίου εκτελούν ελέγχους ενός παρόχου απέναντι στο ανταγωνιστικό σενάριο. Πρόκειται για εκτελέσεις πολλών ωρών, για τις οποίες δεν δημοσιεύεται χρόνος τοίχου. Κάθε κελί παραμένει ντετερμινιστικό δεδομένων της διαμόρφωσής του και του σπόρου τυχαιότητάς του. Οι σαρώσεις καταγράφουν σημεία ελέγχου καθώς προχωρούν και έχουν δυνατότητα συνέχισης: μια επανεκτέλεση παραλείπει κάθε κελί (διαμόρφωση, σπόρος τυχαιότητας) που υπάρχει ήδη στο σημείο ελέγχου, οπότε μια διακοπή/σάρωση συνεχίζει από εκεί που σταμάτησε αντί να ξεκινήσει από την αρχή.

Δ.5 Ανάλυση και αποτελέσματα

Το `scripts/analyze_sweep.py` κατασκευάζει τα στατιστικά και τα σχήματα της κύριας σάρωσης από τις εξόδους `parquet` και, όταν υπάρχει το `results/sweep_monopoly.parquet`, γράφει και τη σύγκριση του σκέλους μονοπωλίου. Οι υπόλοιπες σαρώσεις έχουν τα δικά τους σενάρια ανάλυσης, τα `analyze_structural_sweep.py`, `analyze_surcharge_mode.py`, `analyze_dose_matched_monopoly.py` και `compare_demand_sources.py`. Το `family_sensitivity.py` δεν αναλύει σάρωση: διαβάζει τα συγκεντρωτικά CSV και ξαναεφαρμόζει τις διορθώσεις πολλαπλών συγκρίσεων κάτω από επτά ορισμούς οικογένειας (βλ. Κεφάλαιο 3). Οι εξόδοι των σαρώσεων, τα συνοπτικά αρχεία CSV και τα σχήματα βρίσκονται στον κατάλογο `results/`. Τα δεσμευμένα στο αποθετήριο τεκμήρια εκεί είναι οι καθηλωμένες εξόδοι στις οποίες βασίζεται η ανάλυση, και η σουίτα ελέγχων επαληθεύει τους αριθμούς που φέρουν ισχυρισμούς έναντι αντιγράφων χρυσού προτύπου στο `tests/golden/`, ώστε μια αναπαραγωγή της ανάλυσης που αποκλίνει να αποτυγχάνει στους ελέγχους αντί να αντικαθιστά σιωπηλά έναν αριθμό.

Δ.6 Αρχεία αποτελεσμάτων και στήλες μετρικών

Τα έξι αρχεία αποτελεσμάτων των σαρώσεων του Κεφαλαίου 6 είναι, με τη σειρά του πίνακα των σαρώσεων: `results/sweep_raw.parquet` (κύρια σάρωση), `results/sweep_monopoly.parquet` (σκέλος μονοπωλίου), `results/sweep_structural.parquet` (δομικοί συντελεστές D9), `results/sweep_opsd_headline.parquet` (μετρημένη ζήτηση OPSD), `results/sweep_surcharge_mode.parquet` (κατανομή προσαύξεσης D10) και `results/sweep_dose_matched_monopoly.parquet` (μονοπώλιο εξισωμένης δόσης D11). Τα δεσμευμένα συνοπτικά αρχεία της ανάλυσης που επικαλείται το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνουν τα `results/summary_stats.csv` και `results/effect_sizes.csv`, το αρχείο ευαισθησίας οικογένειας είναι το `results/family_sensitivity.csv`, το αρχείο της δομικής ανάλυσης το `results/structural_sensitivity.csv`, το συγκριτικό πηγών ζήτησης το `results/demand_source_comparison.csv` και το αρχείο ελέγχου αναλλοιωσιμότητας το `results/sweep_structural_invariance_check.json`. Οι τρεις συναρτήσεις στατιστικής διόρθωσης του κύριου σεναρίου ανάλυσης είναι οι `holm_bonferroni`, `benjamini_hochberg` και `bootstrap_paired_diff_ci`.

Οι μετρικές του Κεφαλαίου 4 αντιστοιχούν στις εξής στήλες των αρχείων αποτελεσμάτων: μέσο κόστος ανά πράκτορα `avg_cost_per_agent_eur`, μέσο κόστος ανά kWh `avg_cost_per_kwh_eur`, δείκτης συγκέντρωσης φορτίου `HHI_load_concentration_hhi`, συντελεστής μεταβλητότητας `feeder_coefficient_of_variation`, λόγος αιχμής προς μέσο όρο `feeder_peak_to_average_ratio`, μέση ωριαία μεταβολή `feeder_mean_hourly_ramp_kwh`,

αυτάρκεια παραγωγοκαταναλωτών `prosumer_self_sufficiency`. Στήλες ελέγχου: συνολική χρέωση χωρητικότητας `total_capacity_charge_eur`, ρυθμός ενεργοποίησης `capacity_fire_rate`, μέση προσαύξηση ανά πάροχο `mean_broker_surcharge_json`, συντελεστής Gini μεριδίου φορτίου `broker_load_share_gini`, συνολική αναβεβλημένη ενέργεια `total_deferred_kwh`, ονομαστικό πλήθος παρόχων `n_brokers`, ετήσιος ρυθμός αλλαγής παρόχου `switching_rate`, αιχμή μνήμης `peak_rss_mb`, προέλευση γραμμής `row_provenance`.

Δ.7 Διάταξη του αποθετηρίου

- `src/`: το πακέτο `microgrid_sim`, δηλαδή ο φορτωτής διαμόρφωσης, οι φορτωτές δεδομένων, οι πράκτορες, οι πάροχοι, το μοντέλο και οι μετρικές.
- `tests/`: η σουίτα ελέγχων, μαζί με τα χρυσά πρότυπα στο `tests/golden/`.
- `config/`: το `default.yaml` και οι έξι επικαλύψεις σεναρίων στο `config/scenarios/` (`capacity_disabled.yaml`, `capacity_pnl_only.yaml`, `capacity_pricing_only.yaml`, `capacity_both.yaml`, `monopoly_baseline.yaml`, `opsd_demand.yaml`), καθεμία από τις οποίες επεκτείνει το `default.yaml` και υπερισχύει μόνο σε όσα αλλάζει.
- `scripts/`: τα σημεία εισόδου εκτέλεσης, σάρωσης και ανάλυσης.
- `results/`: οι έξοδοι `parquet` των σαρώσεων, τα σημεία ελέγχου, τα συνοπτικά `CSV` και τα σχήματα στο `results/plots/`.
- `data/samples/`: οι αποθηκευμένες σειρές εισόδου, δηλαδή η ωριαία ηλιακή σειρά για τη Θεσσαλονίκη και οι δύο ωριαίες σειρές οικιακής ζήτησης, η συνθετική και η προερχόμενη από τα δεδομένα `OPSD`.