

# Εκτίμηση κατάστασης δικτύου – προηγμένες μετρητικές υποδομές

Δρ Θεμιστοκλής Ξύγκης | ΕΜΠ



# Εκτίμηση κατάστασης δικτύου

Επίδειξη λειτουργίας του ελληνικού  
πιλοτικού έργου (Greek demo)



# Περιεχόμενα

**Εισαγωγή**

Μετρητικές υποδομές

Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης

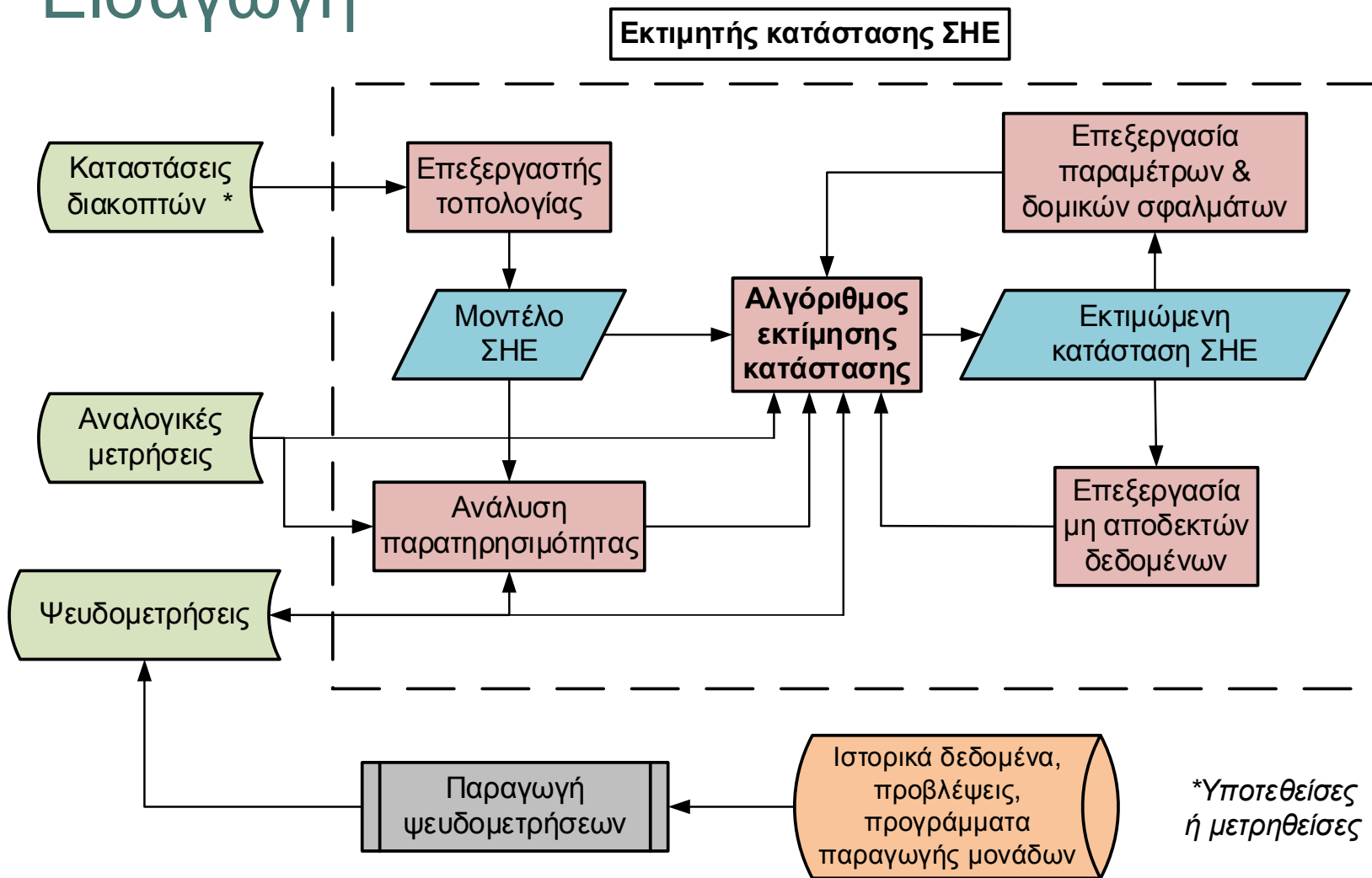
Εφαρμογή - αποτελέσματα

Συμπεράσματα





# Εισαγωγή



## Εκτιμητής κατάστασης: υπολογιστική διαδικασία ΚΕΕ

- πυρήνας ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης
- λειτουργία πραγματικού χρόνου
- εκτίμηση της κατάστασης ΣΗΕ (μοντέλο, μέτρα/γωνίες τάσης) & των μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών
- αναγκαίος ο πλεονασμός μετρήσεων





# Περιεχόμενα

Εισαγωγή

**Μετρητικές υποδομές**

Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης

Εφαρμογή - αποτελέσματα

Συμπεράσματα



## Μετρητικές υποδομές

- **Δομή:** τερματικές μετρητικές μονάδες, τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι, τοπικοί συγκεντρωτές δεδομένων, βάσεις δεδομένων ΚΕΕ
- **Απαιτήσεις:** συγχρονισμένες μετρήσεις, γνώση ακρίβειας κάθε επιμέρους μέτρησης, ανοχή σε μικρές καθυστερήσεις διαθεσιμότητας στα ΚΕΕ (π.χ. <5 min)
- **Συστήματα μεταφοράς:**
  - επαρκής διαθεσιμότητα μετρήσεων από συστήματα SCADA, RTUs σε ΚΥΤ, Υ/Σ ΥΤ & ΥΤ/ ΜΤ
  - ανάπτυξη συστημάτων PMUs & χρήση διατάξεων πολλαπλής λειτουργικότητας IEDs
  - περιορισμένη χρήση ψευδομετρήσεων
- **Δίκτυα διανομής:**
  - περιορισμένη διαθεσιμότητα μετρήσεων από συστήματα SCADA, RTUs σε ΥΣ ΥΤ/ ΜΤ
  - αναγκαία η εκτεταμένη χρήση ψευδομετρήσεων



## Μετρητικές υποδομές

### — Αναβάθμιση υποδομών στη διανομή:

- συστήματα αυτόματης προσπέλασης μετρητών ΧΤ (automated meter reading - AMR)
- συστήματα έξυπνων μετρητών ΧΤ (smart metering)
- ανάπτυξη προηγμένων μετρητικών υποδομών (advanced metering infrastructure - AMI)
- εγκατάσταση μPMUs

### — Αξιοποίηση στο πλαίσιο των εκτιμητών κατάστασης:

- παραγωγή ψευδομετρήσεων αυξημένης ακρίβειας βάσει ιστορικών δεδομένων από συστήματα AMR & έξυπνους μετρητές
- χρήση μετρήσεων πραγματικού χρόνου από συστήματα AMI και μPMUs → ενίσχυση αριθμού πραγματικών μετρήσεων → περιορισμός χρήσης ψευδομετρήσεων

### — Εφικτή η ανάπτυξη εκτιμητών κατάστασης υψηλής ακρίβειας σε δίκτυα διανομής





Περιεχόμενα

Εισαγωγή

Μετρητικές υποδομές

**Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης για το ελληνικό πιλοτικό έργο**

Εφαρμογή - αποτελέσματα

Συμπεράσματα



## Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης

- Μοντέλο μετρήσεων:

$$z = h(x) + e$$

$z$  : διάνυσμα μετρήσεων,  $x$  : διάνυσμα κατάστασης,  $h$  : διάνυσμα μη γραμμικών συναρτήσεων (εξισώσεις ρών φορτίου),  $e$  : διάνυσμα σφαλμάτων.

- Θεωρητικό υπόβαθρο: εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας
- Διατύπωση: μέθοδος σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (weighted least squares – WLS)

$$\min J(x) = (z - h(x))^T \mathbf{R}^{-1}(z - h(x))$$

$\mathbf{R}$  : διαγώνια μήτρα διασποράς σφαλμάτων,  $R_{ii} = 1 / \sigma_i^2$  και  $\sigma_i^2$  η διασπορά της μέτρησης  $i$

- Επίλυση: επαναληπτικός αλγόριθμος Newton-Raphson

$$x_{k+1} = x_k + \mathbf{G}^{-1}(x_k) \mathbf{H}^T(x_k) \mathbf{R}^{-1}(z - h(x_k))$$

$\mathbf{H}$  : Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων,  $\mathbf{G}$  : μήτρα κέρδους



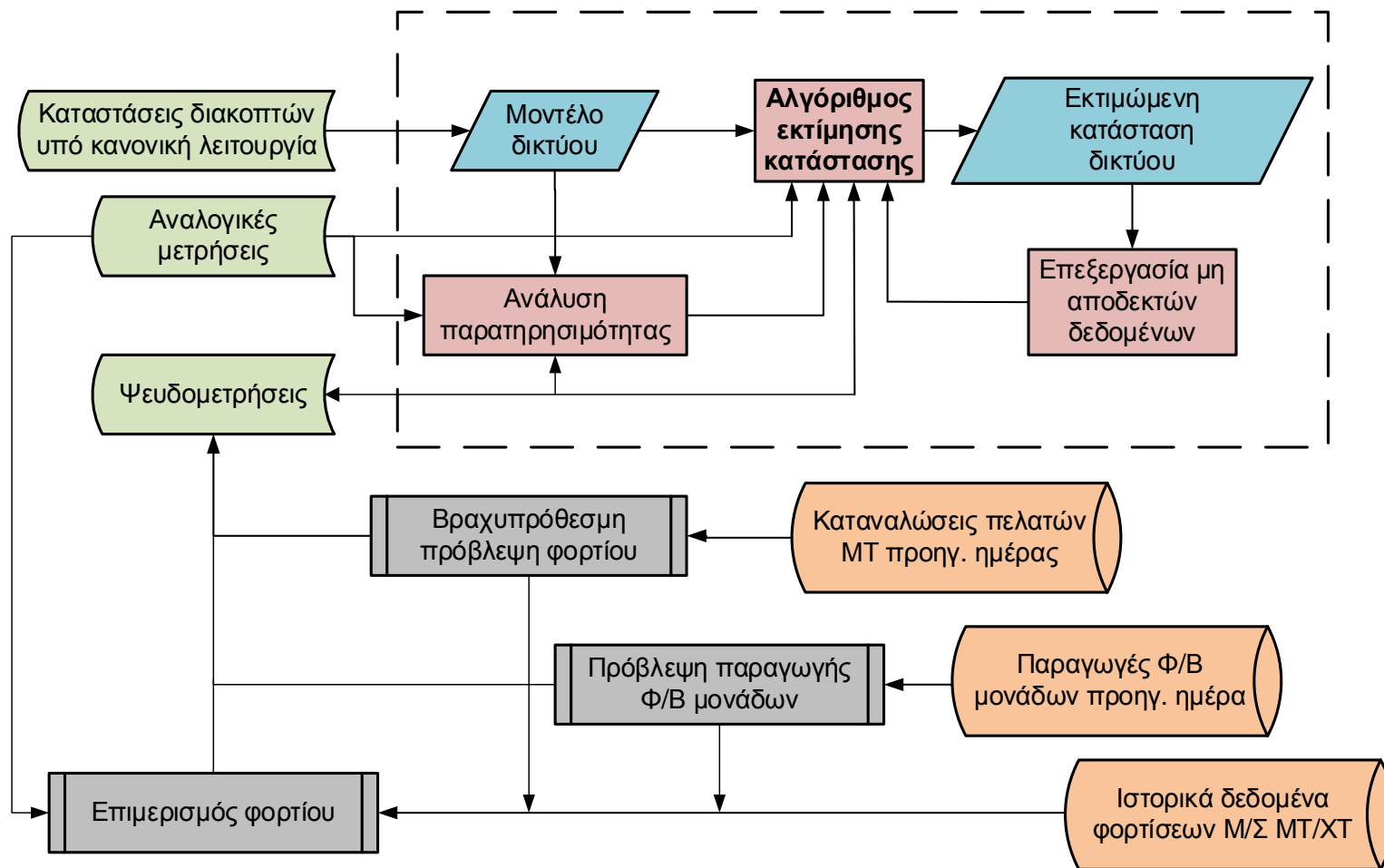
# Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης

- **Ανάλυση παρατηρησιμότητας:**
  - κριτήριο η αντιστρεψιμότητα της μήτρας  $G$
- **Παραγωγή ψευδομετρήσεων:**
  - εφαρμογή τεχνικών πρόβλεψης και επιμερισμού φορτίου βάσει ιστορικών δεδομένων καταναλώσεων, ονομαστικών στοιχείων M/Σ MT/XT, καιρικών στοιχείων κ.τλ.
  - εκτίμηση/ πρόβλεψη παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ
- **Χαρακτηριστικά εκτίμησης κατάστασης:**
  - ακρίβεια: η αντίστροφη μήτρα  $G^{-1}$  είναι η μήτρα διασποράς της εκτίμησης  $x_{est}$
  - σύγκλιση: αν και πόσο γρήγορα συγκλίνει ο αλγόριθμος επίλυσης στη βέλτιστη λύση  $x_{est}$
  - στάθμιση μετρήσεων: στοιχεία της  $\mathbb{R}$   $\rightarrow$  βάρη μετρήσεων ανάλογα της ακρίβειας τους, κομβικής σημασίας η κατάλληλη ρύθμισή τους (τύπος υπολογισμού, διαβάθμιση)





# Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης



## Δίκτυο και σύνολο μετρήσεων:

- τμήμα δικτύου Μεσογείων, αναχωρήσεις 210, 490 του ΚΔ Νέας Μάκρης, 335 κόμβοι
- διαθέσιμες μετρήσεις :
  - i. πραγματικού χρόνου: μέτρο τάσης & ρεύματος, Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ
  - ii. προηγ. ημέρας: εγχύσεις ενεργού/ αέργου ισχύος, πελάτες ΜΤ & Φ/Β μονάδες
  - iii. ιστορικά δεδομένα φορτίσεων Μ/Σ ΜΤ/ ΧΤ
  - iv. εικονικές: μηδενικές εγχύσεις >50% επί του συνόλου



Περιεχόμενα

Εισαγωγή

Μετρητικές υποδομές

Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης για το ελληνικό πιλοτικό έργο

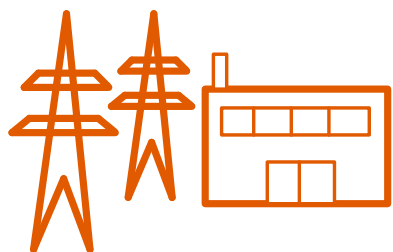
**Αποτελέσματα – τμήμα δικτύου Μεσογείων**

Συμπεράσματα



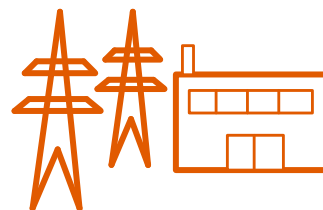
# Αποτελέσματα – τμήμα δικτύου Μεσογείων

## SCADA Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ

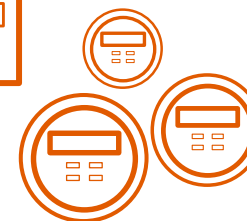


+

## μετρητές AMR



+



## 20 μPMUs



### Προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή

- ελάχιστες πραγματικές μετρήσεις
- μεγάλος αριθμός ψευδομετρήσεων
- πλεονασμός μετρήσεων οριακά >1
- παρατηρήσιμο δίκτυο, απώλεια μετρήσεων SCADA → μη παρατηρησιμότητα

### Προσθήκη μPMUs

- ικανοποιητικός αριθμός πραγματικών μετρήσεων
- μειωμένος αριθμός ψευδομετρήσεων
- πλεονασμός μετρήσεων αυξημένος κατά 8%
- παρατηρήσιμο δίκτυο ακόμη και σε περίπτωση απώλειας μετρήσεων SCADA



# Αποτελέσματα – τμήμα δικτύου Μεσογείων

## – Προσομοιώσεις:

- προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή: χρήση πραγματικών μετρήσεων και πληροφοριών (καιρός κ.α.) μίας ολόκληρης εβδομάδας του Ιουλίου 2019, ωριαία λειτουργία
- με προσθήκη μPMUs: προσομοίωση τύπου Monte Carlo, χρήση τυπικών προφίλ φορτίου από το δίκτυο, λειτουργία τετάρτου για μία ολόκληρη μέρα

## – Κριτήρια αξιολόγησης: ακρίβεια και σύγκλιση

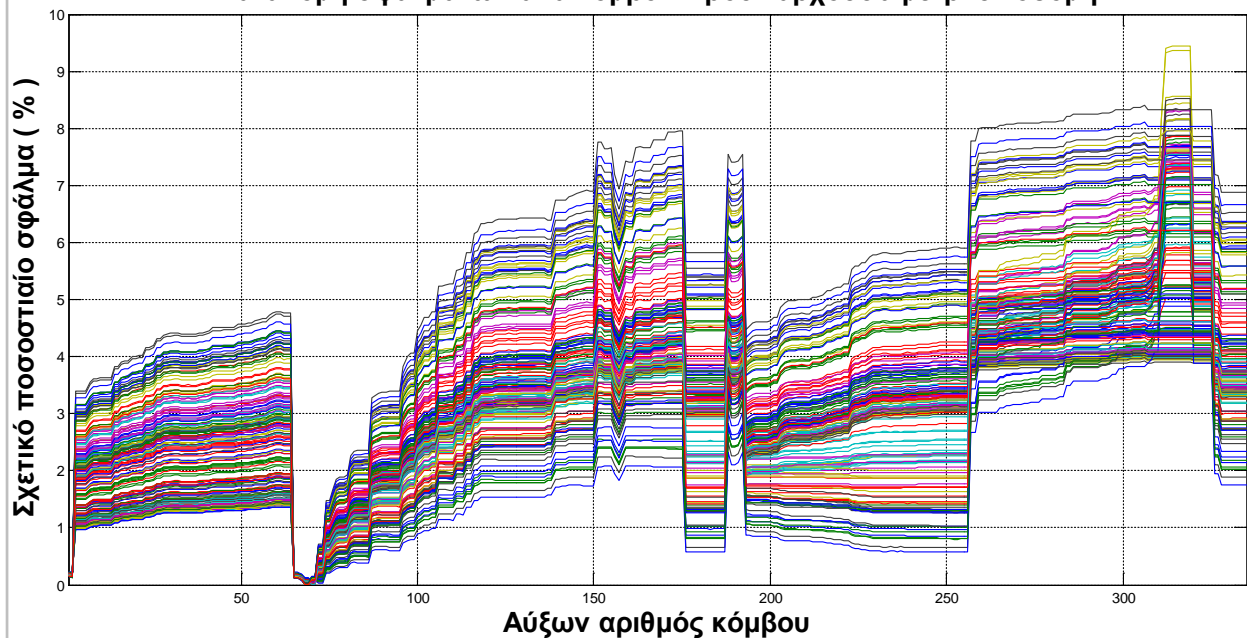
## – Στρατηγική τοποθέτηση μPMUs: ενδιάμεσοι κόμβοι με μη μηδενική έγχυση ισχύος

Τμήμα δικτύου	No. μPMUs	Κόμβοι και προσκείμενοι κλάδοι
Αναχώρηση 490	5	125 {125–130}, 141 {141–154}, 223 {223–227}, 279 {279–283}, 302 {302–306}
Αναχώρηση 210	14	605 {605–609}, 734 {734–739}, 761 {761–765}, 1037 {1037–1041}, 1103 {1103–1107}, 1289 {1289–1293}, 1304 {1304–1990}, 2028 {2028–2032}, 2889 {2889–2893}, 2928 {2928–2932}, 3015 {3015–3019}, 3155 {3155–3159}, 3209 {3209–3213}, 3506 {3506–3510}
ΥΣ ΥΤ/ΜΤ	1	1 {1–2}, {1–583}

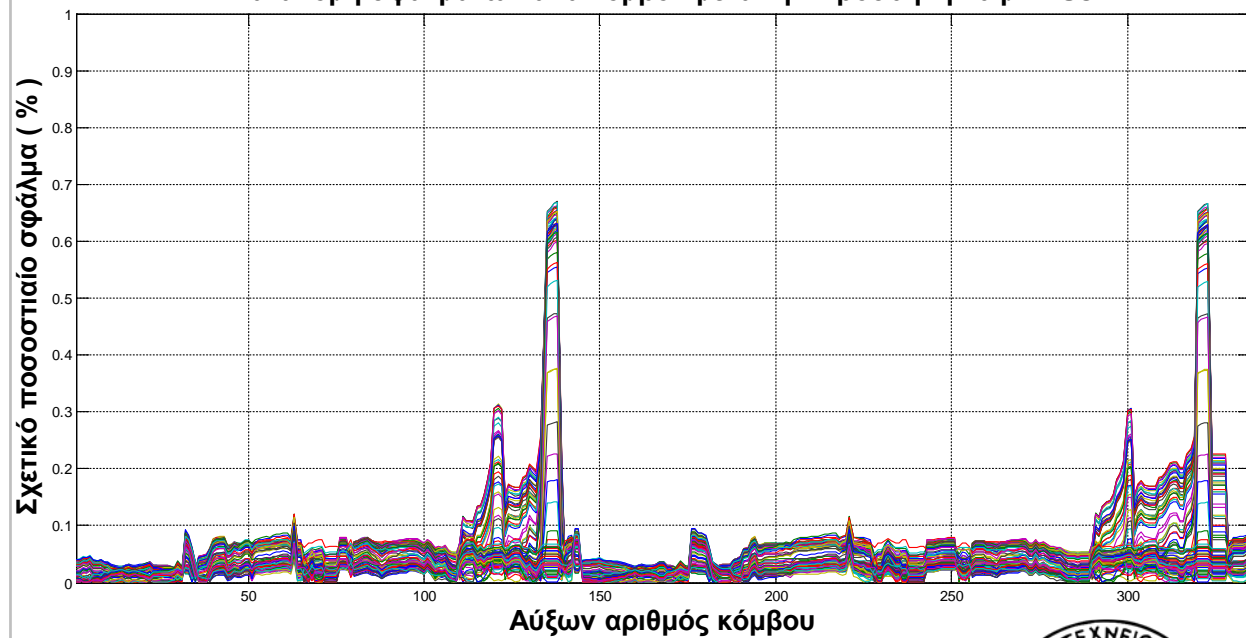
# Αποτελέσματα – τμήμα δικτύου Μεσογείων

- Δείκτης ακρίβειας:** σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα μέτρου τάσης κόμβου  $j = \left| \frac{V_j - V_{j,e}}{V_j} \right| 100\%$ ,  
 $V_i, V_{i,e}$  πραγματική και εκτιμώμενη τιμή μέτρου τάσης κόμβου  $j$

Κατανομή σφαλμάτων ανά κόμβο - προϋπάρχουσα μετρ. υποδομή



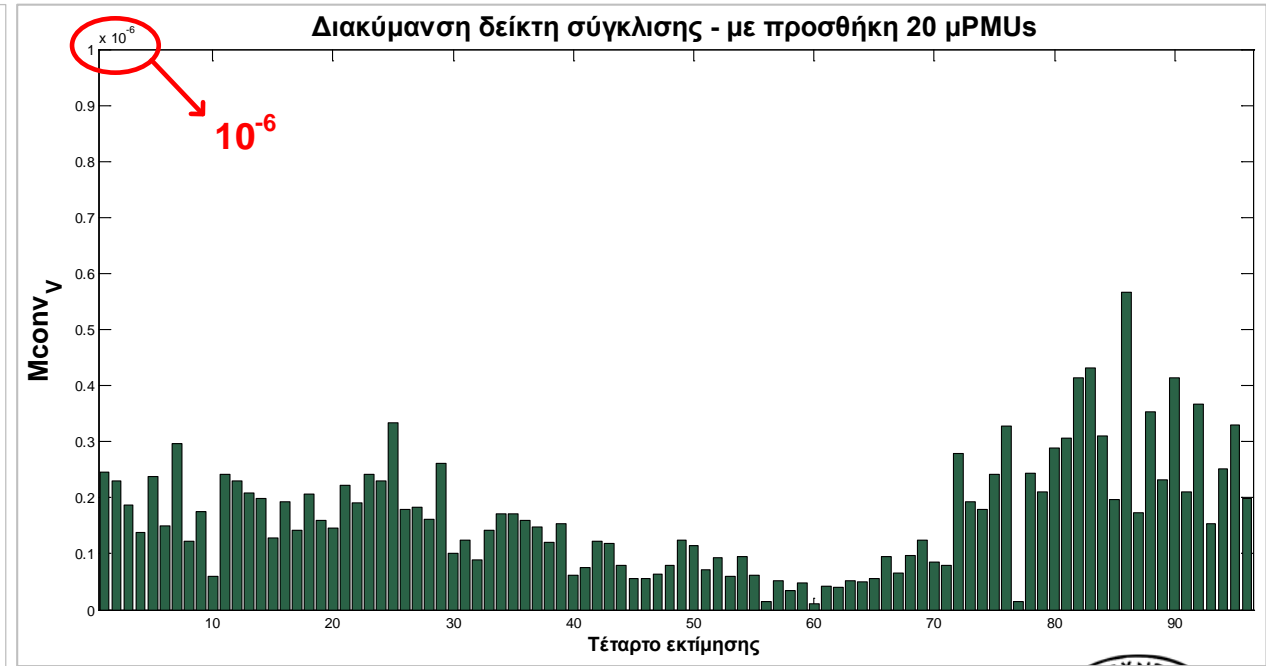
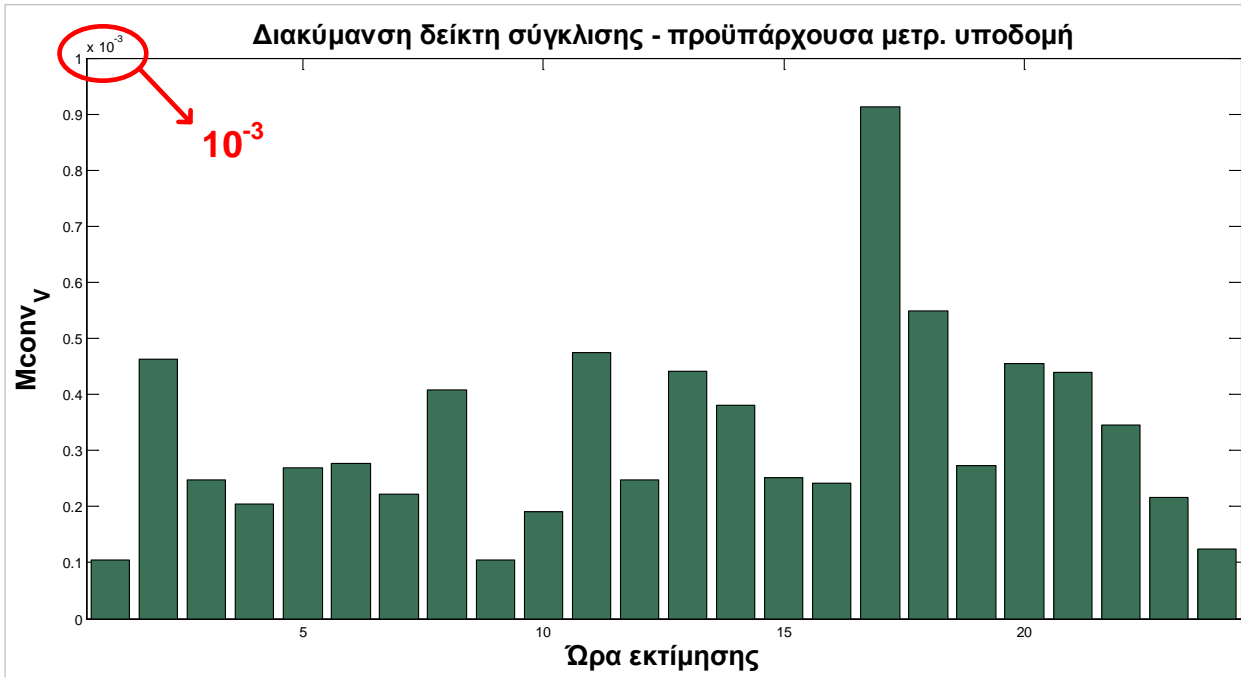
Κατανομή σφαλμάτων ανά κόμβο - μετά την προσθήκη 20 μPMUs



# Αποτελέσματα – τμήμα δικτύου Μεσογείων

- Δείκτης σύγκλισης:** μέγιστη σχετική μεταβολή μέτρου τάσης κατά την τελευταία επανάληψη του αλγόριθμου επίλυσης WLS  $k_{term}$ ,  $k_{term}-1$  οι δυο τελευταίες ανακυκλώσεις

$$Mconv_V = \max_j \left| 1 - \frac{V_j^{k_{term}}}{V_j^{k_{term}-1}} \right|$$





# Περιεχόμενα

Εισαγωγή

Μετρητικά συστήματα

Σχεδιασμός εκτίμησης κατάστασης για το ελληνικό πιλοτικό έργο

Αποτελέσματα – τμήμα δικτύου Μεσογείων

**Συμπεράσματα**



## Συμπεράσματα

- Η αναβάθμιση των μετρητικών υποδομών στα δίκτυα διανομής καθιστά ρεαλιστική την προοπτική ανάπτυξης εκτιμητών κατάστασης
- Με βάση την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή, η λειτουργία ενός εκτιμητή κατάστασης για το δίκτυο των Μεσογείων κρίνεται επισφαλής
- Με την προσθήκη 20 μPMUs, είναι δυνατή η λειτουργία ενός αξιόπιστου και ακριβούς εκτιμητή κατάστασης για το εν λόγω δίκτυο
- Τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια από τις εφαρμογές ΚΕΕ που απαιτούν μία αξιόπιστη εικόνα της κατάστασης του δικτύου
- Επόμενα βήματα: εγκατάσταση και ενσωμάτωση των μPMUs στη μετρητική υποδομή, νέος κύκλος δοκιμών με πραγματικές μετρήσεις, λειτουργία σε πραγματικό χρόνο





Σας ευχαριστώ!

[www.platone-h2020.eu](http://www.platone-h2020.eu)

Δρ Θεμιστοκλής Ξύγκης

ΕΜΠ

[txygkis@power.ece.ntua.gr](mailto:txygkis@power.ece.ntua.gr)

## Contact

[info@platone-h2020.eu](mailto:info@platone-h2020.eu)

### Project Coordinator

RWTH Aachen University  
Templergraben 59  
52062 Aachen, Germany



The project PLATform for Operation of distribution NETworks (Platone) receives funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 864300

All information provided reflects the status of the Platone project at the time of writing and may be subject to change. All information reflects only the author's view and the Innovation and Networks Executive Agency (INEA) is not responsible for any use that may be made of the information contained in this publication.