



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Περιβάλλον και Ανάπτυξη»

*«Διερεύνηση δυνατοτήτων βέλτιστης αξιοποίησης υδρο-ενεργειακών
πόρων περιοχής Αχελώου-Θεσσαλίας»*

Μαρία Καραναστάση,
Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων : Κουτσογιάννης Δ., Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Ευστρατιάδης Α., Δρ, ΕΔΙΠ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2017

- Σκοπός εργασίας: Ο προσδιορισμός του βέλτιστου οικονομικά τρόπου ικανοποίησης των υδατικών και ενεργειακών ζητήσεων μια περιοχής, αξιοποιώντας κατάλληλα τους διαθέσιμους υδατικούς και ανανεώσιμους ενεργειακούς της πόρους
- Βέλτιστος τρόπος;
 - διαχείριση υφιστάμενων υδραυλικών και ενεργειακών έργων
 - διαστασιολόγηση νέων ενεργειακών έργων (ΑΠΕ)

Γιατί η εξέταση του νερού και της ενέργειας σε κοινό πλαίσιο;

- Συνδέονται, και σε τι βαθμό;

Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, γεωτρήσεις, αντλήσεις...

ΑΠΕ και αντλησιοταμίευση;

Στόχοι και δεδομένα εθνικής ενεργειακής πολιτικής

- ✓ 10% συμμετοχή ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, στόχος 20% μέχρι το 2020 → 7.5 GW
- ✓ Διείσδυση > 8 GW → απορρίψεις ενέργειας ίσες ή μεγαλύτερες του 35% (Anagnostopoulos & Parantonis, 2012)
- ✓ Εθνικός ενεργειακός οδικός χάρτης για το 2050: συμμετοχή ΑΠΕ 75% - 100% (ΥΠΕΚΑ, 2012)
→ Ισχυρές διασυνδέσεις με άλλα δίκτυα για απορρόφηση πλεονασμάτων ενέργειας, αποθήκευση...

- ✓ Ευρώπη?
Συμφωνίες για ισχυρές διασυνδέσεις ηλεκτρικών δικτύων (Γερμανία, Αυστρία, Ελβετία, κ.ά)
Έργα αποθήκευσης (Υποβρύχια καλώδια για σύνδεση με Σκανδιναβικές χώρες → μεγάλες δυνατότητες ταμίευσης, κ.ά)

- ✓ Ελλάδα?
Διασύνδεση μέσω βαλκανικών δικτύων;
Απαιτήσεις αποθήκευσης 2 έως 5 GW (ΥΠΕΚΑ, 2012) για επίτευξη των παραπάνω στόχων

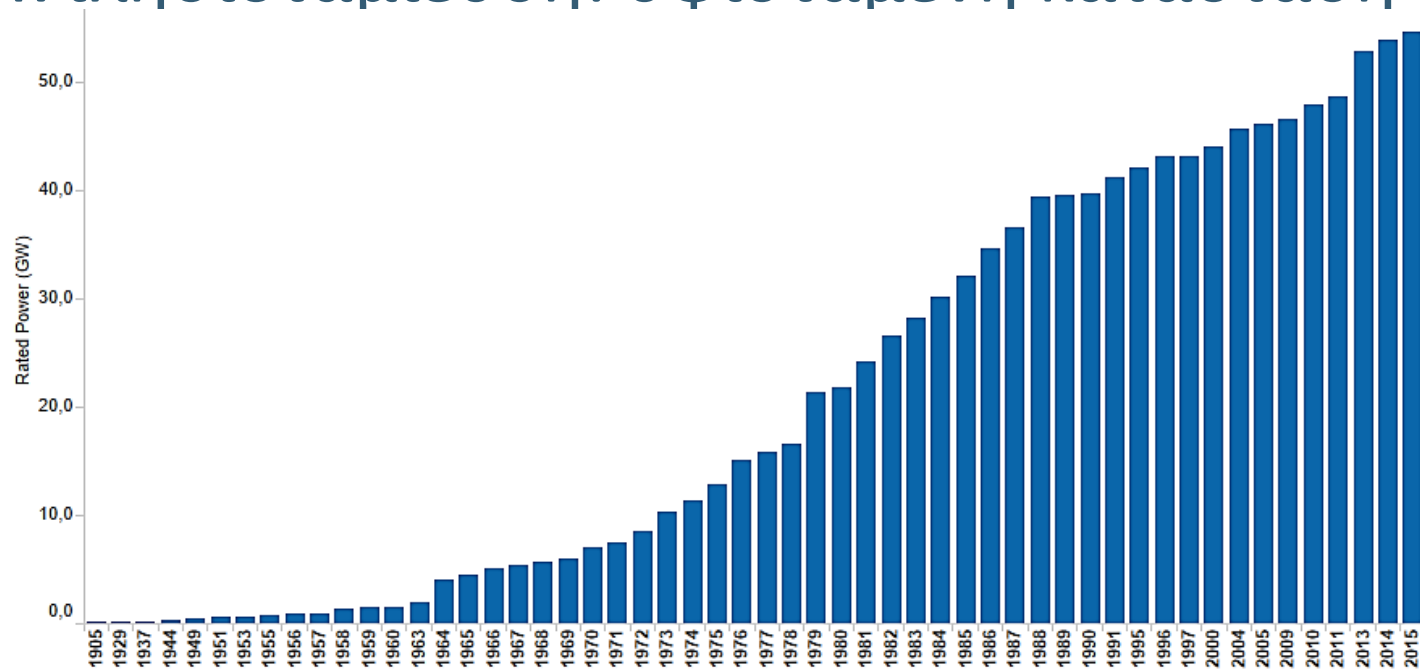
Αντλησιοταμίευση

- ✓ Δυνατότητα αποθήκευσης σε μεγάλη κλίμακα, εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός (αντλησιοταμίευση, τεχνολογία πεπιεσμένου αέρα)
- ✓ Υψηλές επιδόσεις (65-85%)

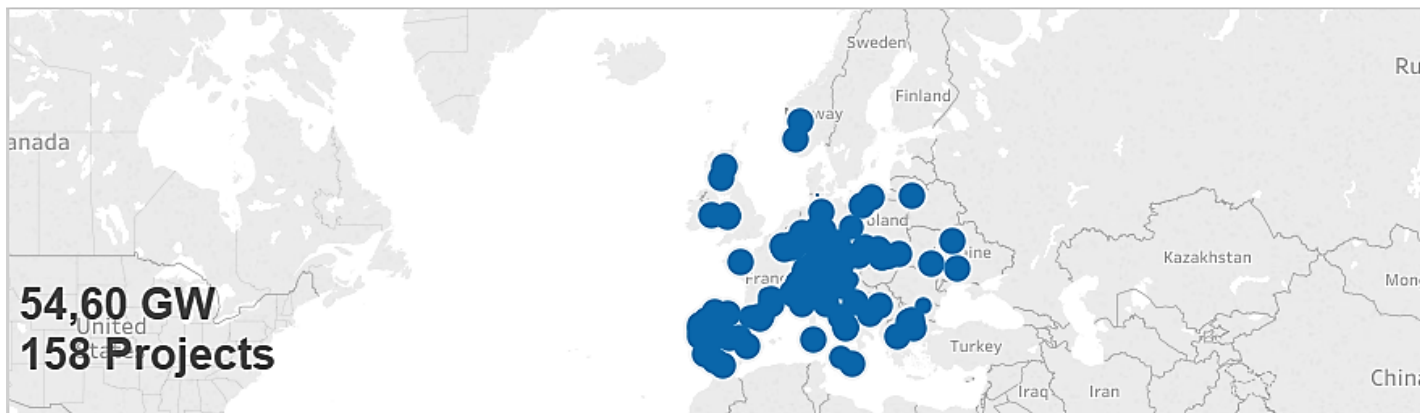


Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό έργο Σφηκιάς (Πηγή: dei.gr)

Αντλησιοταμίευση: υφιστάμενη κατάσταση & προοπτικές



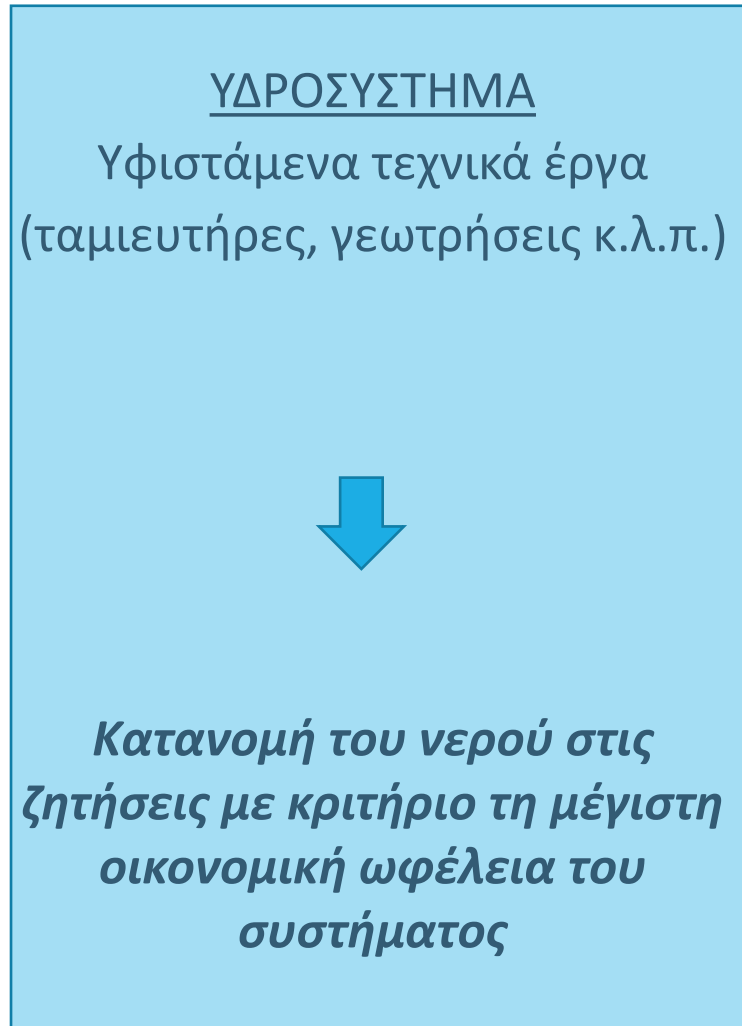
- ✓ Παγκοσμίως
 - Κίνα (32 GW), Ιαπωνία (28 GW), ΗΠΑ (25 GW)
 - 2020: επιπλέον 18.84 GW, 13% ΑΠΕ
- ✓ Ευρώπη
 - 54.60 GW σήμερα
 - Σημαντική αύξηση από 2010 7.98 GW - 33% ΑΠΕ
 - 2020: επιπλέον 5.12 GW, 29% ΑΠΕ, Ελβετία, Ισπανία, Ιταλία, Πορτογαλία, Ελλάδα (Αμφιλοχία, Αμάρι Ρεθύμνου)



Εν λειτουργία έργα αντλησιοταμίευσης στην Ευρώπη

(<http://www.energystorageexchange.org/>)

Μεθοδολογική προσέγγιση



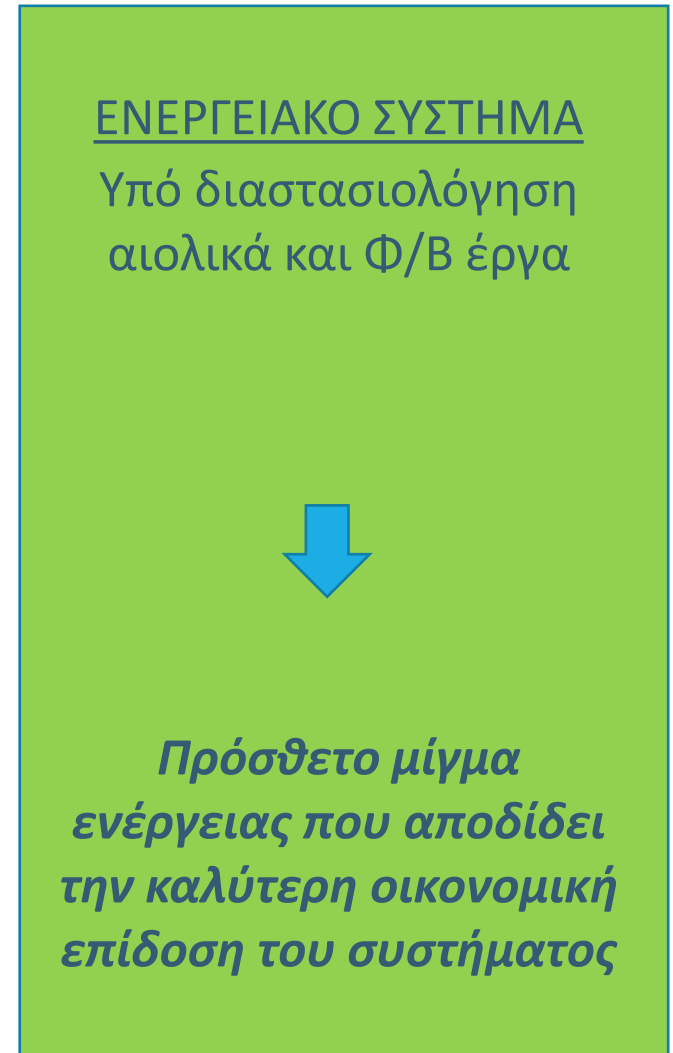
Αποθήκ. ενέργειας



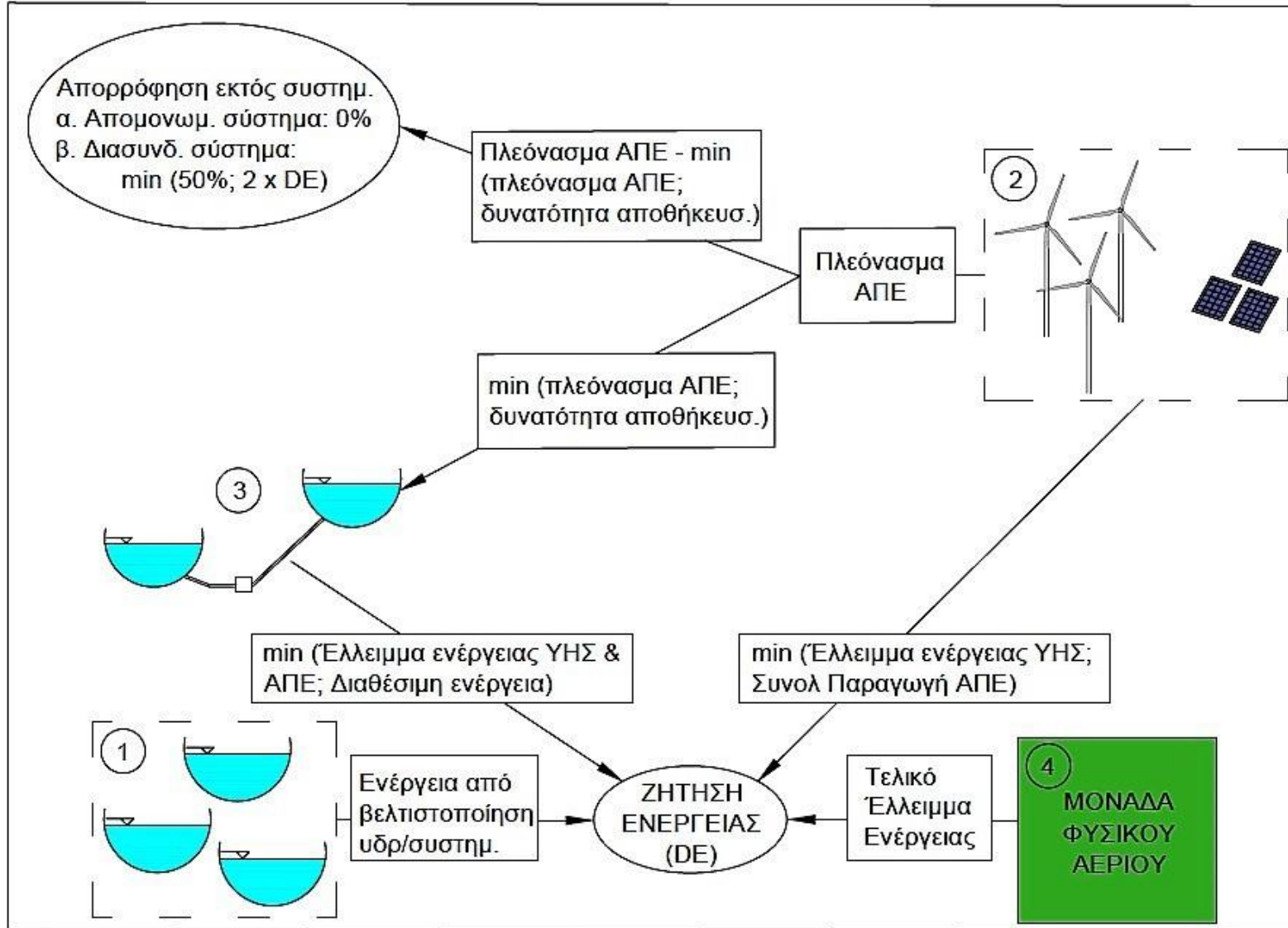
Υ/Η ενέργεια



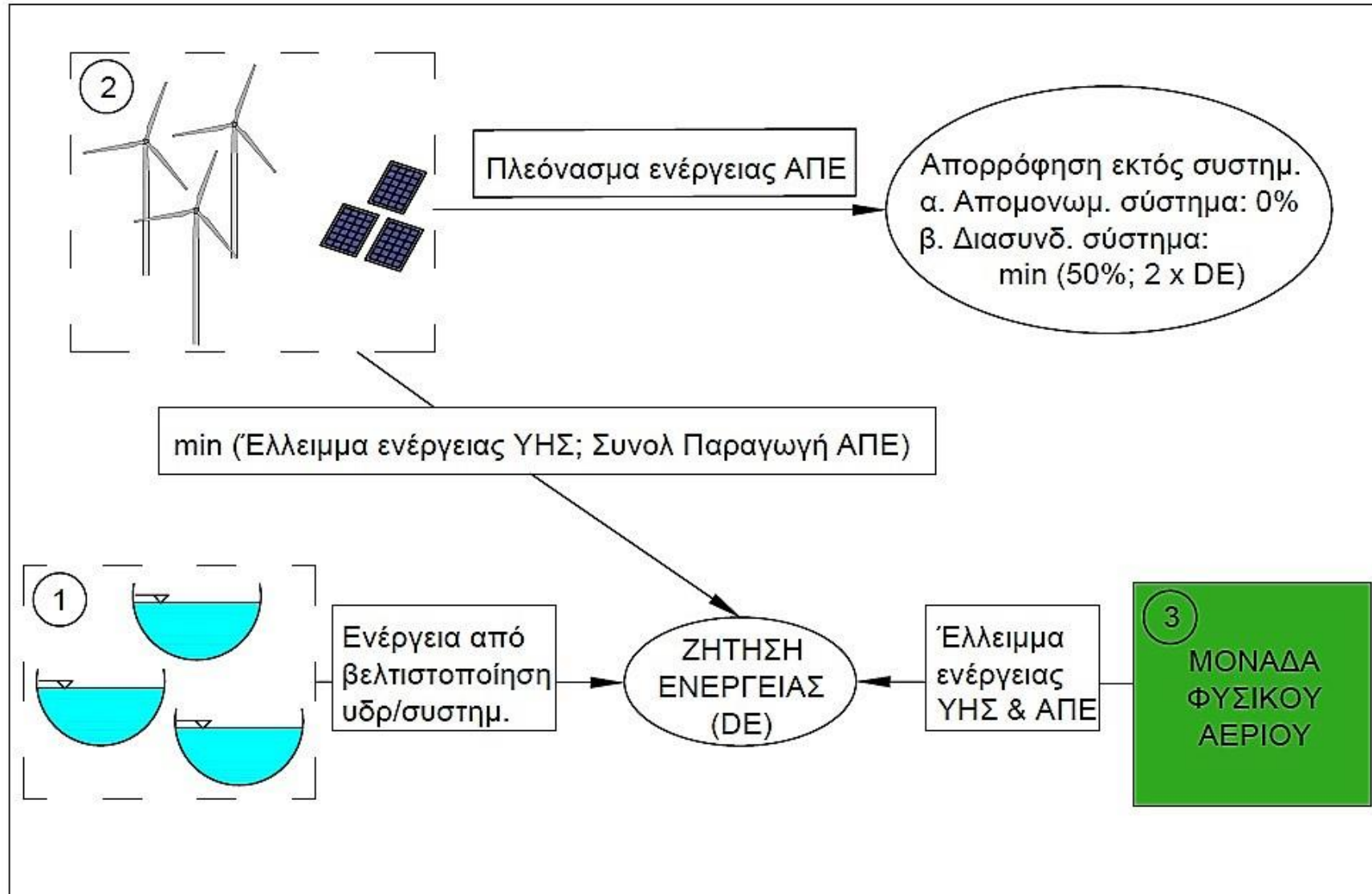
ΖΗΤΗΣΗ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εξεταζόμενο ενεργειακό σύστημα: Γενική Διάταξη



Εξεταζόμενο ενεργειακό σύστημα: Ειδική Διάταξη



Περιοχή μελέτης: ΛΑΠ Αχελώου - Θεσσαλία

- Μελέτη ως ενιαίου διασυνδεδεμένου υδρο- ενεργειακού συστήματος, με θεώρηση της λεγόμενης «ήπιας» εκτροπής του Αχελώου (250 hm^3 ετησίως $\sim 6 \%$)

• ΛΑΠ Αχελώου:

- ✓ ΥΗΣ Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου
- ✓ Κατάντη Στράτου γεωργικές εκτάσεις (Αιτωλοακαρνανία)
- ✓ Ύδρευση Αγρινίου

• Θεσσαλία:

- ✓ Άρδευση κάμπου
- ✓ Ύδρευση Καρδίτσας
- ✓ Διαθέσιμοι ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι (άνεμος, ενέργεια)

• Έργα εκτροπής

- ✓ ΥΗΣ Μεσοχώρας, Συκιάς, Μουζακίου, Πευκοφύτου



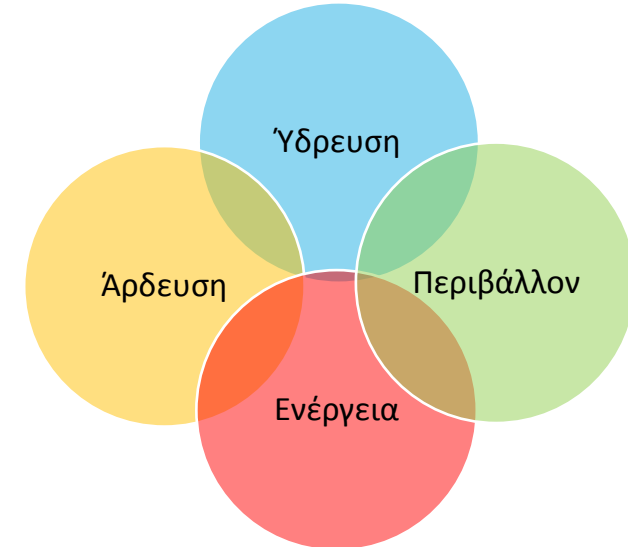
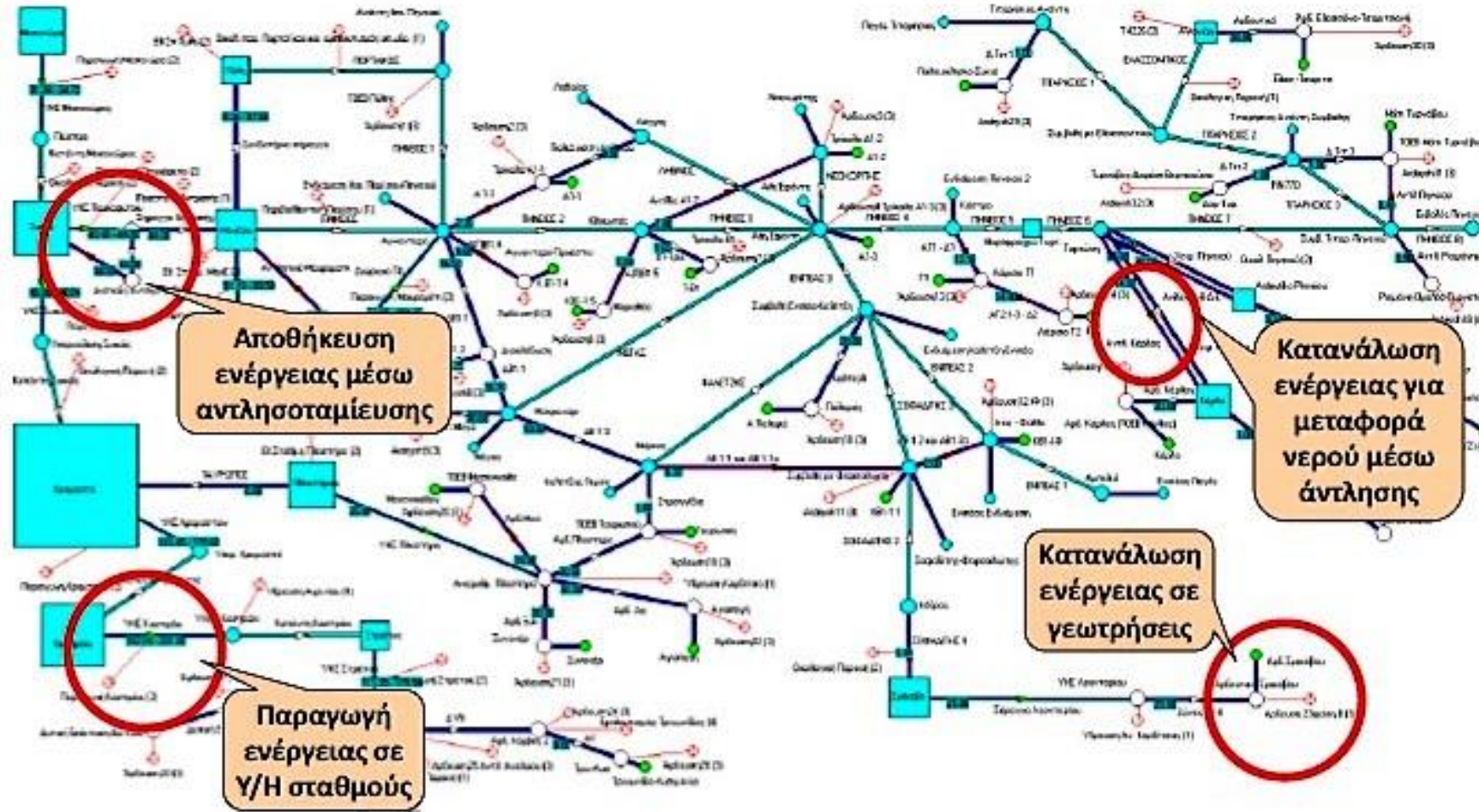
Περιοχή μελέτης: ΛΑΠ Αχελώου - Θεσσαλία

- Αχελώος: 42% της συνολικά παραγόμενης Υ/Η ενέργειας
- Θεσσαλία: 14 % της συνολικής αγροτικής παραγωγής
αρδευτική λειψυδρία → ασύμφορη, μη βιώσιμη και περιβαλλοντικά επιζήμια υδρομάστευση υπόγειων υδροφορέων
- Έργα εκτροπής Αχελώου (;)
- Χαμηλό αιολικό δυναμικό: 1% συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος



Σύνθετο, πολλαπλών και αντικρουόμενων ζητήσεων υδρο-ενεργειακό σύστημα

Λειτουργία υδροσυστήματος



Πρωτότυπα σημεία:

- ✓ Ημερήσιο βήμα προσομοίωσης
- ✓ Εισαγωγή ζήτησης ενέργειας (απομειωμένη χρονοσειρά ζήτησης ενέργειας Θεσσαλίας)

Διαχειριστική πολιτική υδροσυστήματος

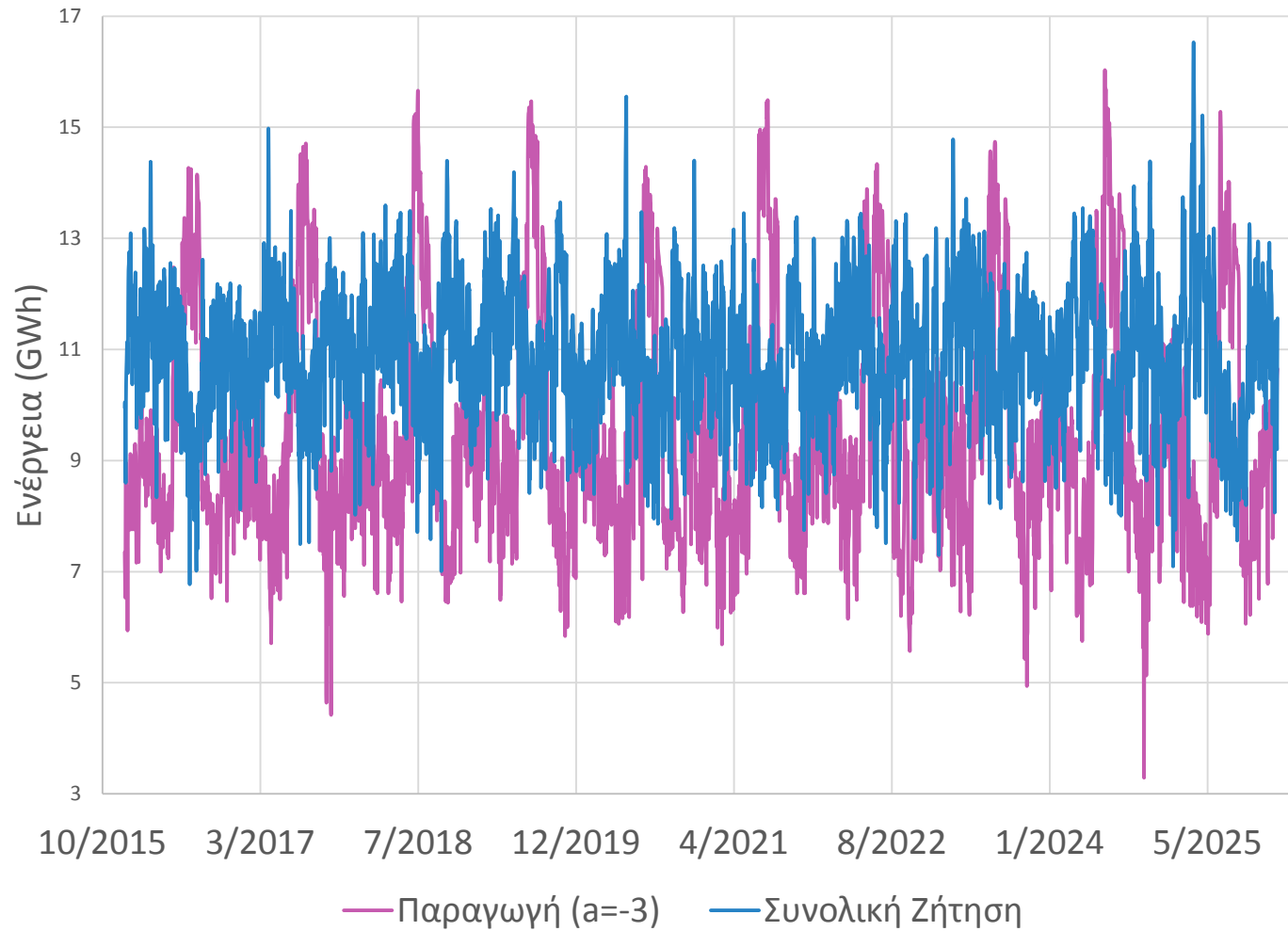
- Βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος σε όρους κόστους/οφέλους
- Οικονομική αποτίμηση όλων των χρήσεων νερού

- Θεώρηση κόστους σε περίπτωση ελλείμματος
 - ΥΔΡΕΥΣΗ: κόστος μεταφοράς με υδροφόρα από υδατικούς πόρους εκτός συστήματος
 - ΑΡΔΕΥΣΗ: αποζημίωση αγροτών
 - ΕΝΕΡΓΕΙΑ: κόστος συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής από φυσικό αέριο
πραγματικό κόστος παραγωγής + εξωτερικό κόστος ηλεκτροπαραγωγής
 - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (οικολογικές ροές οικοσυστημάτων, ελάχιστες στάθμες ταμιευτήρων):
Χρήση μεθόδων Περιβαλλοντικής Οικονομίας
- Θεώρηση οφέλους όταν το νερό συμμετέχει στην αγορά ως παραγωγικό μέσο → άρδευση, ενέργεια
 - ΑΡΔΕΥΣΗ: Διαφορά εσόδων μη ξηρικών από ξηρικές καλλιέργειες
 - ΕΝΕΡΓΕΙΑ: Συμβατικές τιμές πώλησης Υ/Η ενέργειας

Διαχειριστική πολιτική υδροσυστήματος

	Κόστος από τη μη παροχή νερού	Όφελος από τη παροχή νερού
Ύδρευση	5 €/m ³	
Άρδευση	1 €/m ³	0.065 €/m ³
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	0.130 €/kWh	Τιμή στόχος: 0.045 €/kWh Επιπλέον ενέργεια: 0.023 €/kWh
Περιβάλλον	0.001 - 0.071 €/m ³	

Αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση του κριτηρίου κόστους/οφέλους

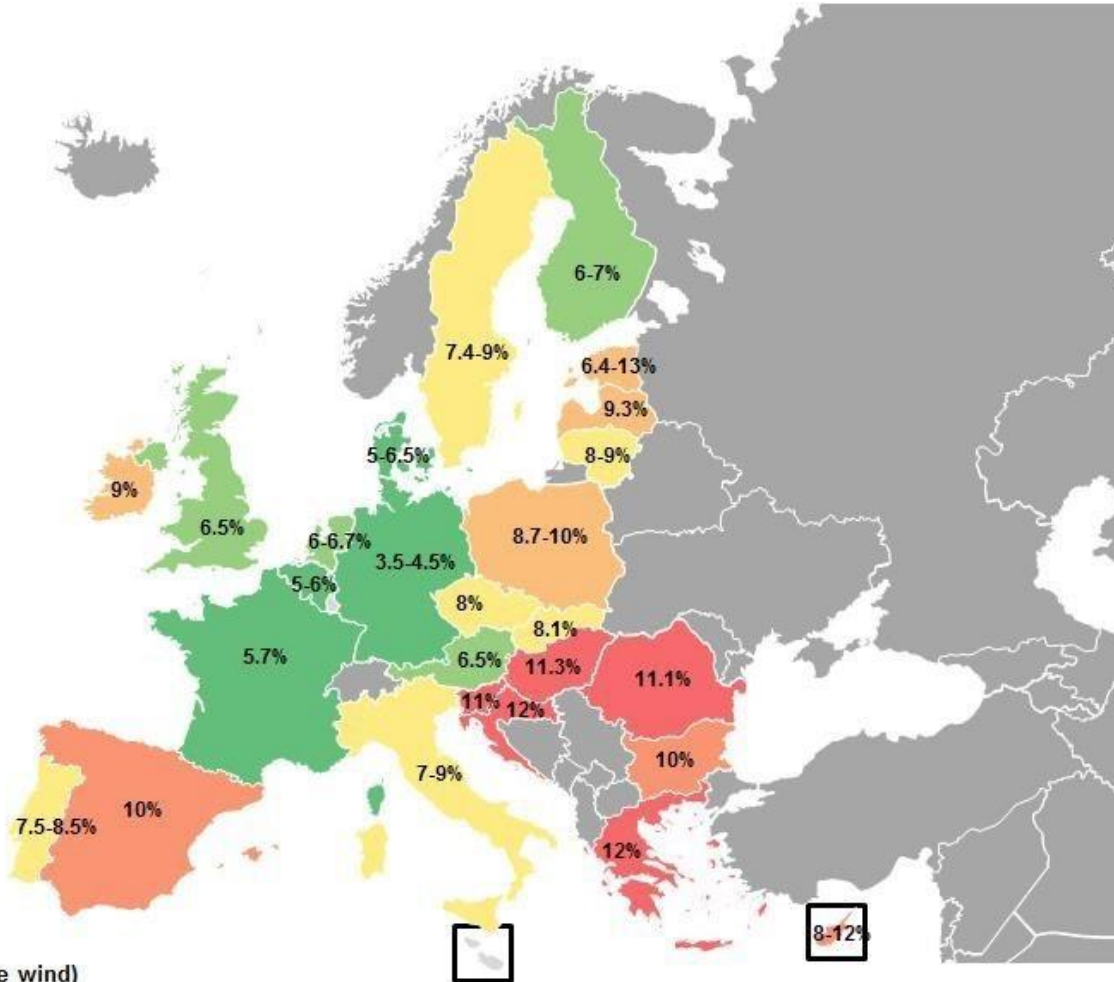
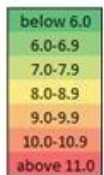


- Η παραγωγή ενέργειας των ΥΗΣ καλύπτει το 75% της μέσης ημερήσιας ζήτησης ενέργειας της Θεσσαλίας
- Μέγιστα ακρότατα ζήτησης σχεδόν συμπίπτουν με ελάχιστα ακρότατα παραγωγής
- Αστοχίες (ετήσιο έλλειμμα/ετήσια ζήτηση)
 - ΥΔΡΕΥΣΗ: 1.0 %
 - ΑΡΔΕΥΣΗ: 5.1 %
 - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: 1.6 %

Ενεργειακό σύστημα: Επιλογή προκαταρκτικών δεδομένων

- Επιτόκιο αναγωγής (μέσο σταθμικό κόστος κεφαλαίων) = σταθμισμένος μέσος επιτοκίου δανεισμού & κόστους κεφαλαίου → αποπληθωρισμένο εκφράζει το ρίσκο της επένδυσης μέσω της μείωσης της παρούσας αξίας μελλοντικών ποσών
πόσο επηρεάζει τα οικονομικά του συστήματος;
- Παραγωγή ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας → συνάρτηση των τεχνικών χαρακτηριστικών της
- Παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκό πλαίσιο → συνάρτηση της γωνίας κλίσης του

Μέσο σταθμικό κόστος κεφαλαίων για επενδύσεις σε ΑΠΕ



WACC across the EU-28 (interview results for onshore wind)

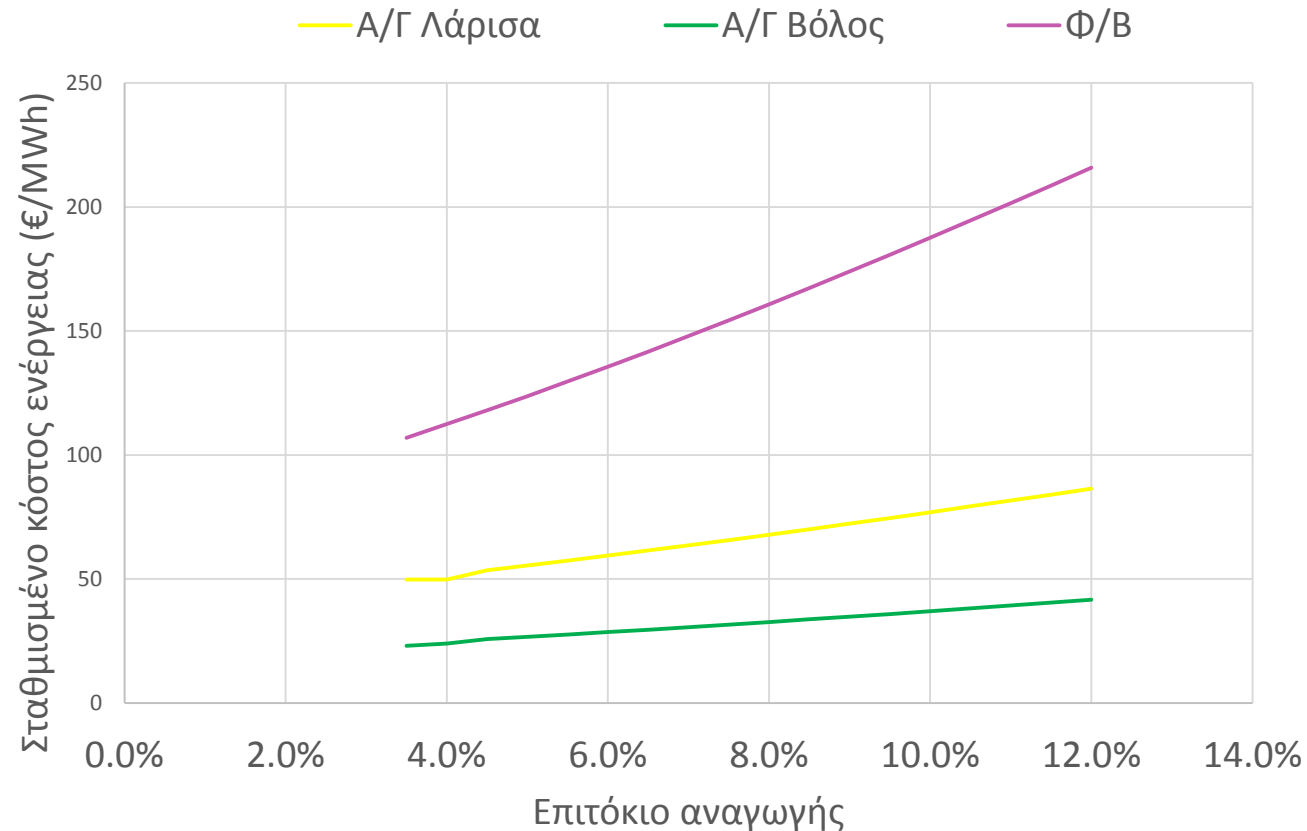
Το μέσο σταθμικό κόστος στην ΕΕ για χερσαία αιολικά πάρκα το 2014 (Noothout et al., 2016)

Εκφράζει το ρίσκο που συνδέεται:

- με τη χώρα επένδυσης,
- τη κοινωνική αποδοχή του έργου,
- τη γραφειοκρατεία, τη νομοθεσία,
- το οικονομικό ρίσκο,
- το ρίσκο της ξαφνικής αλλαγής κρατικής πολιτικής στο θέμα των ΑΠΕ.

Ελλάδα: 12%, το υψηλότερο της ΕΕ
Ευρωπαϊκός μέσος όρος: ~ 8%

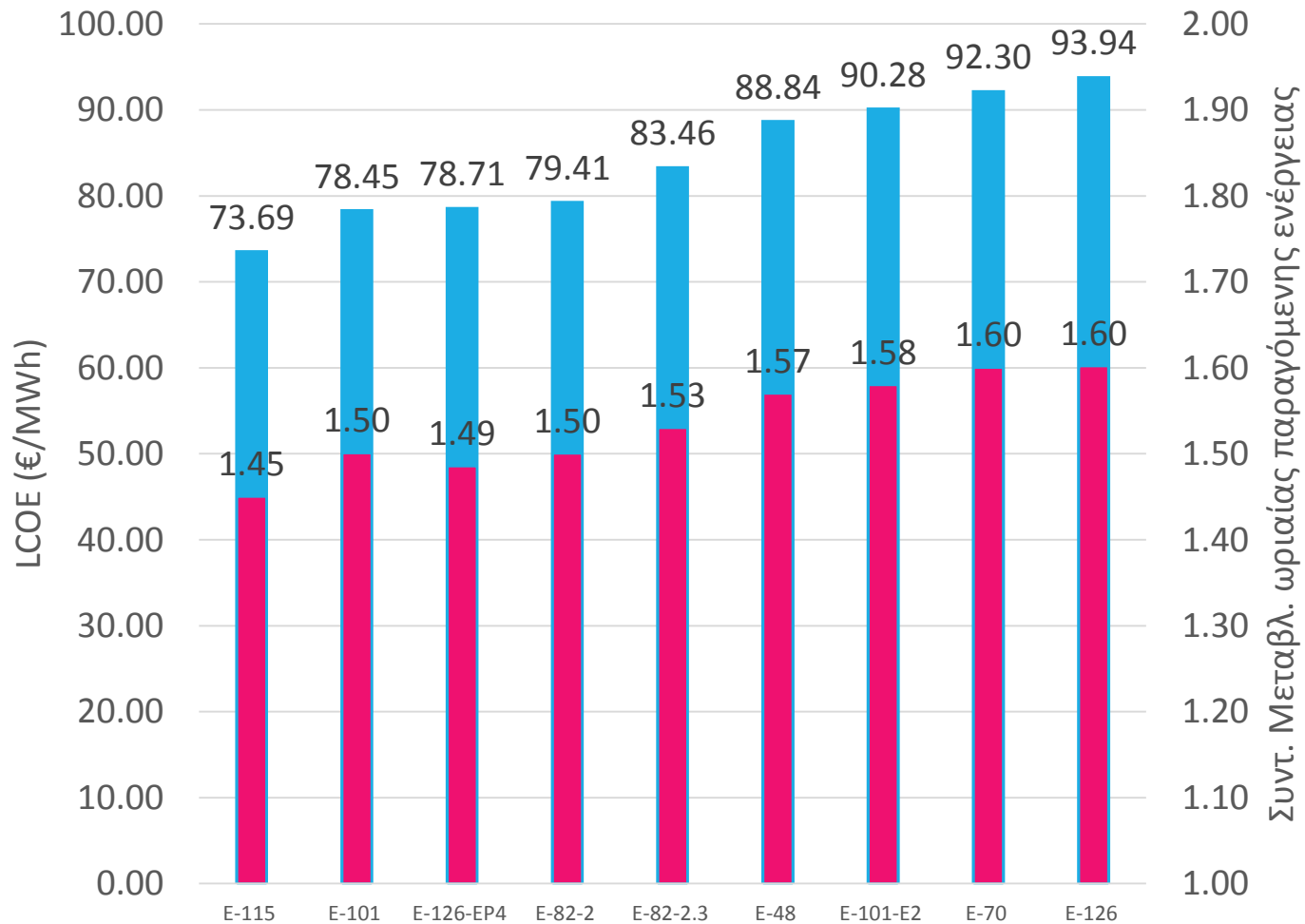
Ανάλυση ευαισθησίας σταθμισμένου κόστους ενέργειας στη περιοχή μελέτης ως προς το επιτόκιο αναγωγής



- Επιτόκιο αναγωγής 12%: Αύξηση κατά περίπου 30% του σταθμισμένου κόστους παραγωγής (LCOE) σε όλες τις μορφές ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο
- Επιλογή για τη διαστασιολόγηση των μονάδων ΑΠΕ της εργασίας του ευρωπαϊκού μέσου όρου, 8%

LCOE: Σταθμισμένο κόστος ενέργειας = Συνολικό κόστος επένδυσης ανηγμένο σε παρούσα αξία / Αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας στο σύνολο της διάρκειας ζωής του έργου

Επιλογή οικονομοτεχνικά βέλτιστης ανεμογεννήτριας για τις πεδινές, χαμηλού αιολικού δυναμικού, περιοχές της Θεσσαλίας

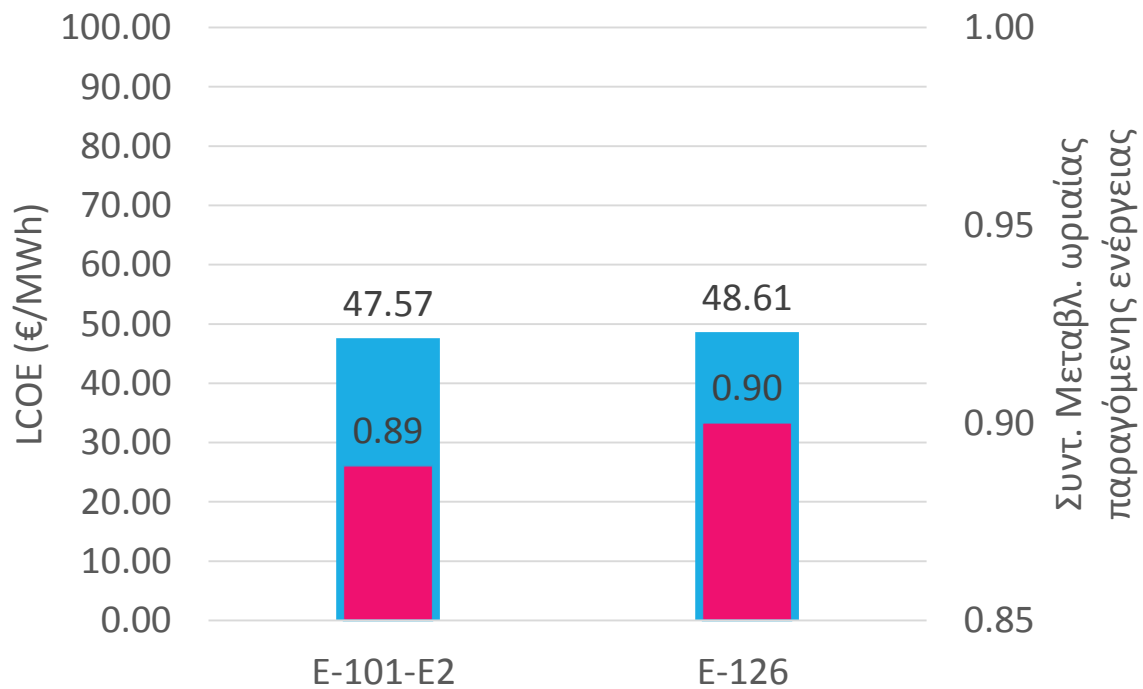


Κριτήρια:

- min LCOE
- min Συντελ. Μεταβλητότητας για πιο επιμερισμένη παραγωγή ενέργειας
- Συνολική παραγωγή ενέργειας

Προκρίνεται η E-115/ 3 MW/ Enercon

Επιλογή οικονομοτεχνικά βέλτιστης ανεμογεννήτριας για τις ορεινές, υψηλού αιολικού δυναμικού, περιοχές της Θεσσαλίας



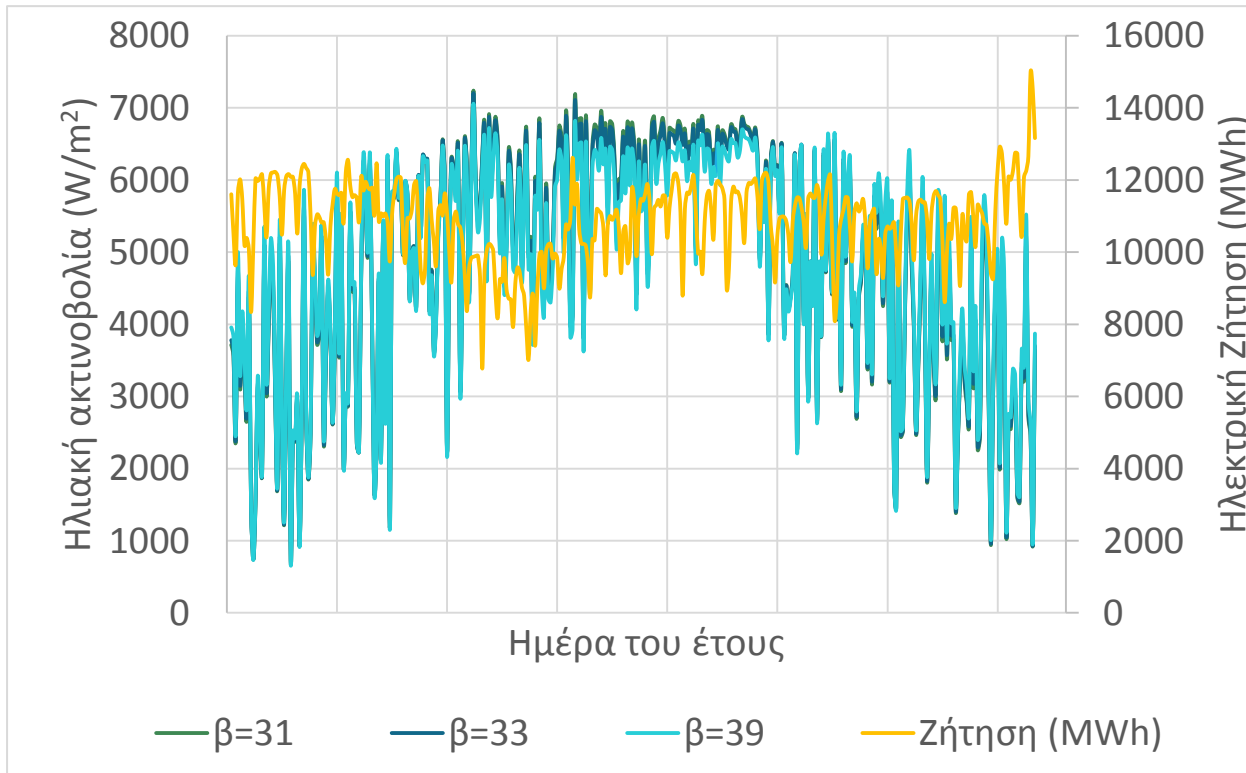
Κριτήρια:

- min LCOE
- min Συντελ. Μεταβλητότητας για πιο επιμερισμένη παραγωγή ενέργειας
- Συνολική παραγωγή ενέργειας

Προκρίνεται η E-126/ 7.58 MW/ Enercon, μια από τις δυνατότερες Α/Γ που κυκλοφορούν

Οι επιλογές είναι λιγότερες γιατί λίγες είναι κλάσης IEC-I που απαιτείται για αυτή τη περιοχή

Επιλογή οικονομοτεχνικά βέλτιστης κλίσης φωτοβολταϊκού πλαισίου για τη περιοχή της Θεσσαλίας



	39°	33°	31°
Ετήσια εξωγήινη ακτινοβολία (kW/m²)	3663.7	3636	3617.8
Μέση ετήσια πραγματική ακτινοβολία (kW/m²)	1739	1748.8	1748.9
LCOE (€/MWh)	160.76	160.09	160.16



Πιο επιμερισμένη κατανομή παραγωγής έχει η γωνία των 39° - Επίσης είναι πιο κοντά στη ζήτηση ενέργειας η κατανομή της

Προκρίνεται η η γωνία των 39°

Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης ενεργειακού συστήματος

- Κριτήρια βελτιστοποίησης
 - Μεγιστοποίηση οικονομικού κέρδους συστήματος θεωρώντας μηδενική απορρόφηση ενέργειας εκτός του συστήματος
 - Μεγιστοποίηση οικονομικού κέρδους συστήματος θεωρώντας μερική απορρόφηση ενέργειας εκτός του συστήματος

*Για ποιες τιμές αποζημίωσης της ανανεώσιμης ενέργειας;
Ο Ν.3851/10 παύει να ισχύει και οι τιμές αποζημίωσης των Φ/Β είναι
μικρότερες του σταθμισμένου κόστους παραγωγής στη Θεσσαλία!*

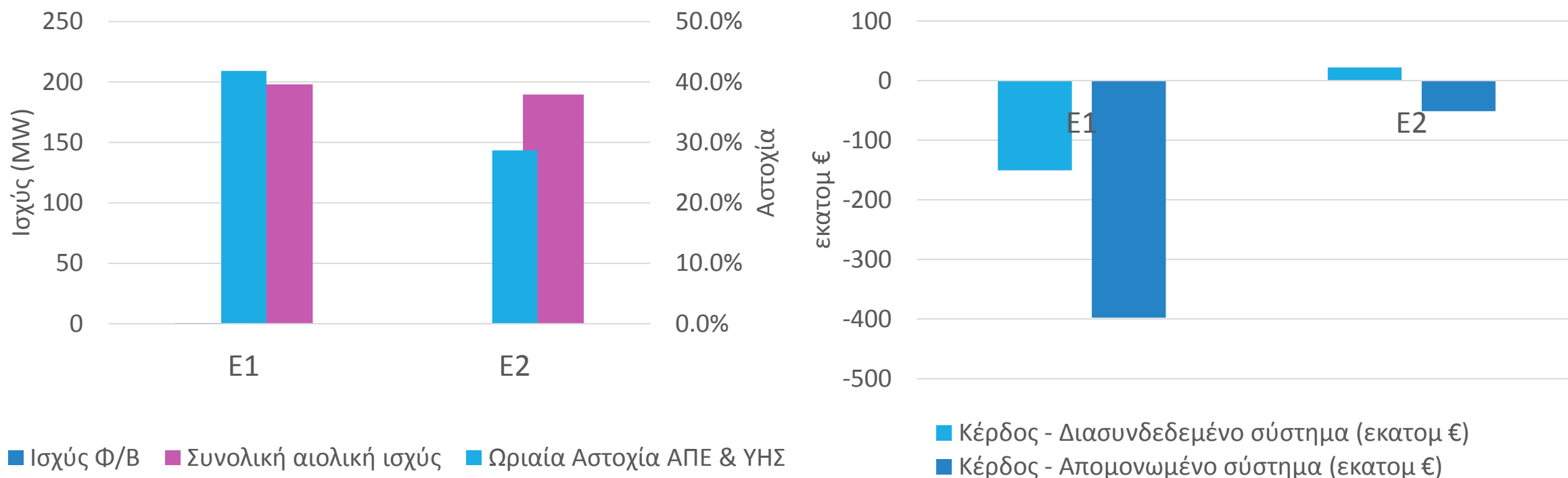
- Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους ΑΠΕ με περιορισμό της ωριαίας αστοχίας του συστήματος
- Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους ενέργειας*
- Ελαχιστοποίηση της ωριαίας αστοχίας των ΑΠΕ και ΥΗΣ (ενδεικτικά)

* σε όλα τα σενάρια η ύπαρξη ωριαίων ελλειμμάτων ενέργειας θεωρείται ότι καλύπτεται από μονάδες φυσικού αερίου → εισαγωγή αντίστοιχου κόστους παραγωγής

Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης ενεργειακού συστήματος

- Μεταβλητές βελτιστοποίησης
 - Ισχύς Φ/Β πλαισίων με αναφορά το σύνολο της Θεσσαλίας
 - Ισχύς Α/Γ με αναφορά πεδινές εκτάσεις της
 - Ισχύς Α/Γ με αναφορά ορεινές εκτάσεις της
- Περιορισμοί βελτιστοποίησης
 - Επιτρεπόμενες εκτάσεις χωροθέτησης σταθμών ΑΠΕ στη Θεσσαλία (Δασκάλου, 2016)

Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους ενέργειας

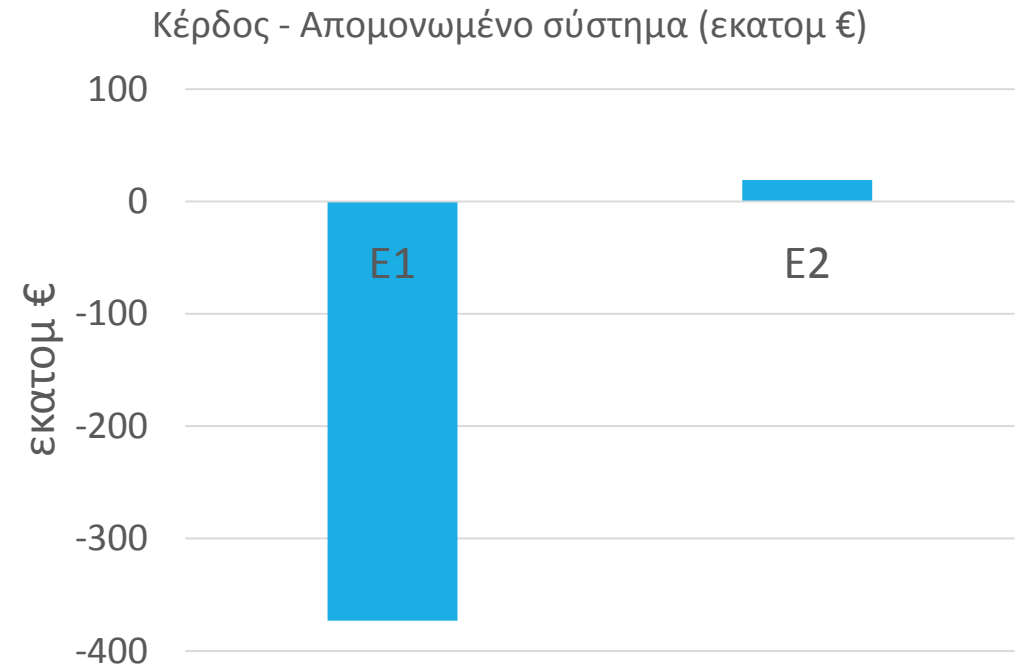
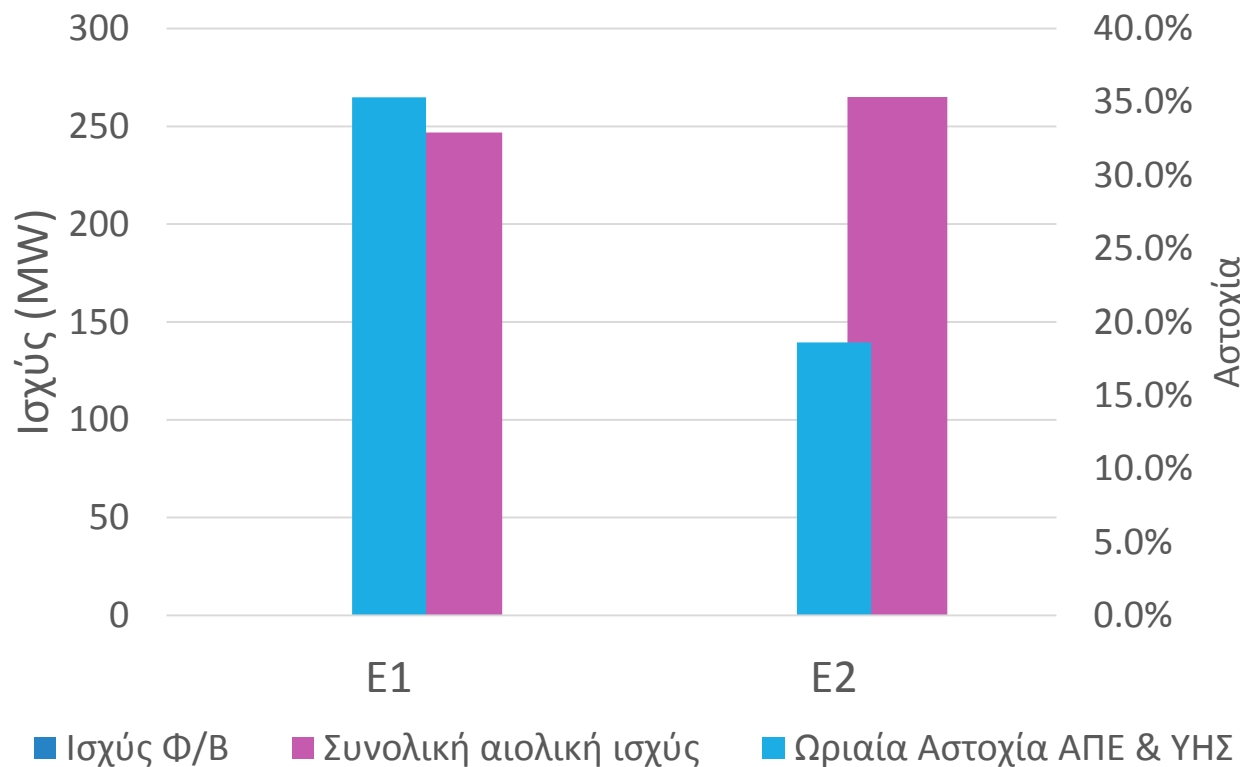


Με τη θεώρηση αποθήκευσης ενέργειας (E2)

- Μείωση αστοχίας κατά 31%
- Αύξηση οφέλους κατά 115% στο διασυνδεδεμένο, κατά 87% στο απομονωμένο για τις υφιστάμενες τιμές αποζημίωσης
- Τιμή αποζημίωσης αιολικής ενέργειας ώστε να είναι οριακά επωφελείς οι διατάξεις

E1: 104.20 €/ MWh , E2: 62.88 €/ MWh < 87.85 (υφιστάμενη τιμή)

Μεγιστοποίηση οικονομικού κέρδους συστήματος θεωρώντας μηδενική απορρόφηση ενέργειας εκτός του συστήματος



Με τη θεώρηση αποθήκευσης ενέργειας (E2)

- Μείωση αστοχίας κατά 47%
- Αύξηση οφέλους κατά 105%

Συμπεράσματα - Προτάσεις

- Η ωριαία ενεργειακή ζήτηση της Θεσσαλίας μπορεί να καλυφθεί σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% με οικονομικά κερδοφόρο τρόπο εάν θεωρηθεί δυνατότητα αποθήκευσης.
 - Τα Φ/Β με τις υφιστάμενες τιμές αποζημίωσης είναι μη ελκυστικά για τη περιοχή της Θεσσαλίας.
 - Μεγάλη αξιοπιστία (< 10%) ένος συστήματος όπως αυτό που εξετάσαμε με μεγάλη συμμετοχή ΑΠΕ είναι ακόμα οικονομικά μη συμφέρουσα.
- προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση και εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων όσον αφορά αυτό το συμπέρασμα
- α) μεγαλύτερες δυνατότητες διασύνδεσης,
 - β) μεγαλύτερος προβλεπόμενος όγκος για αντλησιοταμίευση

Αναφορές

Anagnostopoulos, J., Papantonis, D., (2012), Study of pumped storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece, Energy, vol. 45, pp. 416-423

ΥΠΕΚΑ, (2012), Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός – Οδικός Χάρτης για το 2050

Noothout, P., Jager, D., Tesnière, L., Rooijen, S., Karypidis, N., Brückmann, R., Jirouš, F., Breitschopf, B., Angelopoulos, D., Doukas, H., Konstantinavičiūtė, I., Resch, G., (2016), The impact of risks in renewable energy investments and the role of smart policies, DiaCore Project

Δασκάλου, Ο., (2016), Μεθοδολογία βέλτιστης χωροθέτησης και διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών & αιολικών πάρκων με χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) - Εφαρμογή στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας.