

Ενεργειακή κατανάλωση στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων



Βασίλης Σταμάτης, ΧΜ, ΜSc
Λευτέρης Παπαβασιλόπουλος, Δρ ΠΜ

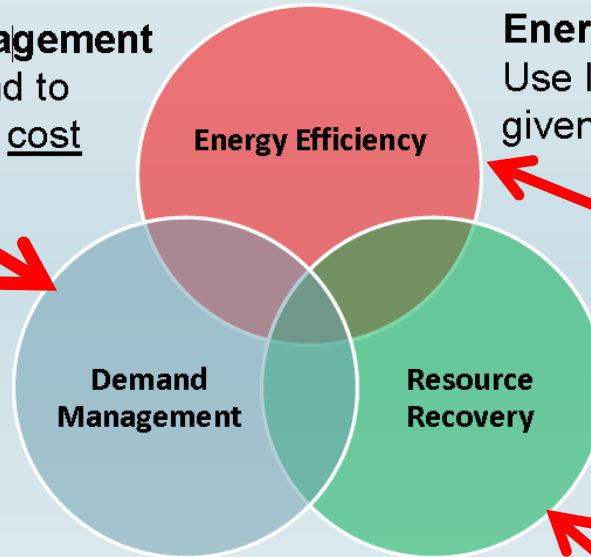
Διαχείριση Ενέργειας

οι 3 βασικές κατηγορίες

Energy Management Falls Into 3 Basic Categories

Demand Management
Control demand to
reduce energy cost

Διαχείριση
της ζήτησης



Energy Efficiency
Use less energy for a
given process

Διαχείριση
του εξοπλισμού

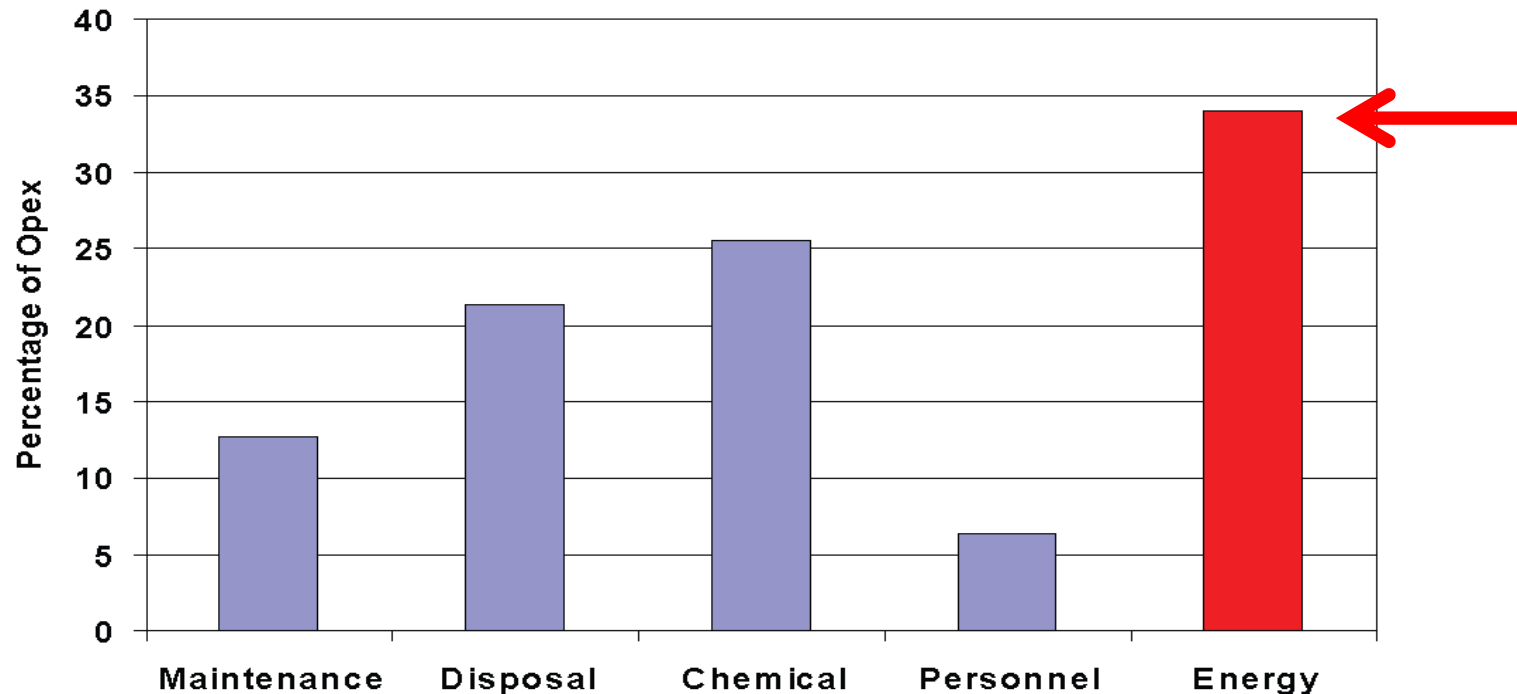
Resource Recovery
Recover waste energy to
offset purchased energy

Ανάκτηση
ενέργειας
(π.χ. βιοαέριο)

Λειτουργικά κόστη στις ΕΕΛ

η συμμετοχή της Ενέργειας στα λειτουργικά κόστη

Ενδεικτική είναι η εμπειρία από τη Γερμανία (ίσως η χώρα με την πιο άρτια παρακολούθηση ΕΕΛ στην ΕΕ) που δείχνει ότι το Ενεργειακό Κόστος αντιπροσωπεύει έως και το **35%** του συνολικού κόστους λειτουργίας.



Ενεργειακή κατανάλωση στις ΕΕΛ

Από μετρήσεις σε 10.200 ΕΕΛ στη Γερμανία:

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 4,4 TWh/έτος

$\approx 35 \text{ kWh}/(\text{Ισοδύναμο Κάτοικο σχεδιασμού και Έτος})$ ή $0,4 \text{ kWh}/\text{m}^3$

$\approx 0,7 \%$ της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στη Γερμανία.

Στις ΗΠΑ η καταναλισκόμενη ενέργεια στη διαχείριση νερού **και** λυμάτων εκτιμάται μεταξύ 3-4% της συνολικής ενέργειας της χώρας, ενώ ανέρχεται σε έως και το 60% των συνολικών λειτουργικών δαπανών των μονάδων επεξεργασίας υδάτων **και** λυμάτων.

Το πλήθος των δημόσιων ΕΕΛ στις ΗΠΑ υπολογίζεται σε πάνω από 16.000 μονάδες, ενώ οι ιδιωτικές μονάδες υπολογίζονται σε 23.000 περίπου (σε βιομηχανίες, συγκροτήματα κατοικιών κτλ). Οι μονάδες πόσιμου νερού είναι περίπου 60.000.

Table 1-2
Summary of Electricity Consumption Projections for Water Supply and Wastewater Treatment



Year	2000	2005	2010	2015	2020	2050	Approx. % Increase 2000-2050
Public Supply and Treatment – Million kWh							
Public Water Supply	30,632	31,910	33,240	34,648	36,079	45,660	50
POTWs	21,006	24,512	24,895	25,277	26,039	29,820	50
Private Supply and Treatment – Million kWh							
Domestic Supply	894	930	965	1,001	1,038	1,274	50
Commercial Supply	476	499	525	553	581	780	50
Industrial Supply	3,341	3,793	4,236	4,731	5,284	10,255	200
Mining Supply	490	509	528	548	569	713	50
Irrigation Supply	23,607	25,639	27,909	30,453	33,314	60,646	150
Livestock Supply	992	1,047	1,095	1,144	1,192	1,510	50
Privately Operated Wastewater Treatment (see note)	42,012	49,025	49,790	50,555	52,078	59,641	50
Total Electricity	123,450	137,864	143,182	148,910	156,174	210,299	100

Note: It was not possible to make electricity consumption projections for privately operated wastewater treatment facilities (see Chapter 3). The figure shown here is a surrogate representing twice the electricity consumption of POTWs. This estimate was used because there are about 50 percent more privately operated wastewater treatment facilities in the U.S. as POTWs, and their unit electricity consumption is estimated to be about 50 percent greater than that of POTWs because of loss of economies of scale and different treatment regimens.

Table 3-1
Unit Electricity Consumption for Wastewater Treatment by Size of Plant

	Treatment Plant Size million gallons/day (cubic meters per day)	Unit Electricity Consumption kWh/million gallons (kWh/cubic meter)			
		Trickling Filter	Activated Sludge	Advanced Wastewater Treatment	Advanced Wastewater Treatment Nitrification
25.000 ικ	1 MM gal/day (3,785 m ³ /d)	1,811 (0.479)	2,236 (0.591)	2,596 (0.686)	2,951 (0.780)
115.000 ικ	5 MM gal/day (18,925 m ³ /d)	978 (0.258)	1,369 (0.362)	1,573 (0.416)	1,926 (0.509)
240.000 ικ	10 MM gal/day (37,850 m ³ /d)	852 (0.225)	1,203 (0.318)	1,408 (0.372)	1,791 (0.473)
470.000 ικ	20 MM gal/day (75,700 m ³ /d)	750 (0.198)	1,114 (0.294)	1,303 (0.344)	1,676 (0.443)
1.150.000 ικ	50 MM gal/day (189,250 m ³ /d)	687 (0.182)	1,051 (0.278)	1,216 (0.321)	1,588 (0.423)
2.250.000 ικ	100 MM gal/day (378,500 m ³ /d)	673 (0.177)	1,028 (0.272)	1,188 (0.314)	1,558 (0.412)

Source: EPRI [1]

Table B.3 Relative Energy Use Projections for a 20 MGD Plant 470.000 ικ

Trickling Filtration		Activated Sludge		Advanced without Nitrification		Advanced with Nitrification	
Trickling filters	30%	Aeration (diffused air)	50%	Aeration (diffused air)	40%	Aeration (diffused air)	30%
Dissolved air flotation	20%	Dissolved air flotation	13%	Dissolved air flotation	13%	Biological nitrification	20%
Wastewater pumping	20%	Anaerobic digestion	12%	Anaerobic digestion	10%	Dissolved air flotation	10%
Anaerobic digestion	14%	Wastewater pumping	11%	Wastewater pumping	10%	Anaerobic digestion	10%
Lights & Buildings	8%	Lights & Buildings	5%	Filter feed pumping	6%	Wastewater pumping	8%
				Lights & Buildings	5%	Filter feed pumping	5%
						Lights & Buildings	4%

(Based on data in Burton 1996)

Table B.4 Relative Energy Use at a 7.5 MGD Secondary Plant 175.000 ικ

Activated sludge	55%
Primary P.S. Clarifier	10%
Heating	7%
Solids dewatering	7%
Raw wastewater pumping	5%
Secondary Clarifiers RAS	4%

(Based on data in California Energy Commission 1994)

Ενεργειακή κατανάλωση στις ΕΕΛ διεθνώς - 1

Μέθοδος Ενεργού ιλύος

0.46 kWh/m³ (Australia)

0.269 kWh/m³ (China)

0.33–0.60 kWh/m³ (USA)

0.30–1.89 kWh/m³ (Japan)

Μέθοδος Οξειδωτικής τάφρου (επιφανειακός αερισμός σε οριζόντιο άξονα)

0.5–1.0 kWh/m³ (Australia)

0.302 kWh/m³ (China)

0.43–2.07 kWh/m³ (Japan)

0.41 kWh/m³ (Taiwan)

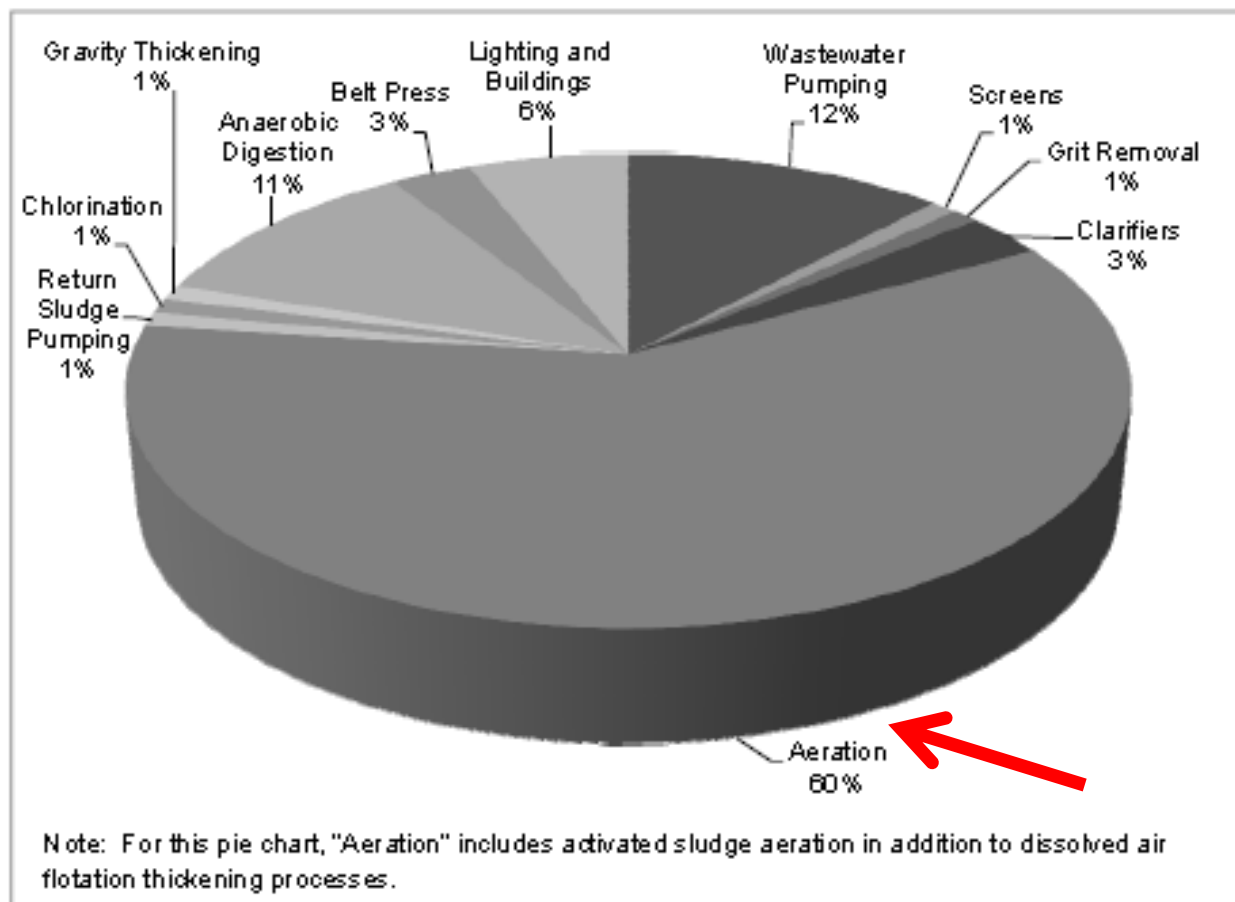
0.49 kWh/m³ (New Zealand)

0.45–0.75 kWh/m³ (Hungary)

Στη Σιγκαπούρη κατανάλωση 0.72–0.92 kWh/m³ για την παραγωγή σχεδόν πόσιμου νερού από την επεξεργασία.

Ενεργειακή κατανάλωση στις ΕΕΛ διεθνώς - 2 τυπική διασπορά κατά υπομονάδα ΕΕΛ

Αερισμός – το HOT SPOT



Ποιοι είναι οι στόχοι ;

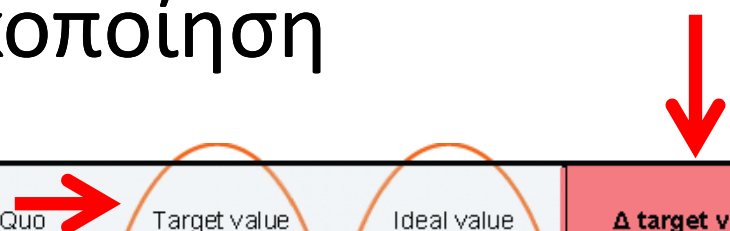
Κύριοι στόχοι

- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας
- Αύξηση «εσωτερικά» της παραγωγής ενέργειας
(να γίνει η ΕΕΛ κατά το δυνατό αυτοδύναμη ενεργειακά, π.χ. αξιοποίηση βιοαερίου, ΑΠΕ)

Δευτερεύοντες στόχοι

- Βελτίωση της ποιότητας εκροής
- Σταθεροποίηση της διεργασίας

Παράδειγμα στόχων στη Γερμανία και ποσοτικοποίηση



Energy evidence (example)		Status Quo	Target value	Ideal value	Δ target value
Total specific energy consumption per p.e.		51 kWh/p.e. a	36 kWh/p.e. a	28 kWh/p.e. a	- 15 kWh/p.e. a
Specific energy consumption aerated basin per p.e.		33 kWh/p.e. a	23 kWh/p.e. a	18 kWh/p.e. a	- 10 kWh/p.e. a
Degree of gas reuse		56 %	98 %	99 %	+ 42 %
Degree of gas conversion to power / electricity		0 %	30 %	31 %	+ 30 %
Specific gas production per kg oSS intake		370 l/kg oSS	450 l/kg oSS	475 l/kg oSS	+ 80 l/kg oSS
Degree of independent supply	Heat	97 %	97 %	98 %	0 %
	Electricity	0 %	49 %	65 %	+ 49 %

Όπου:

- Target Value: μετά από αντιπροσωπευτικό δείγμα ΕΕΛ
- Ideal Value: με βάση μοντέλα από ΕΕΛ που λειτουργούν θεωρητικά ιδανικά και με τα οποία ουσιαστικά γίνεται η μελέτη και ο σχεδιασμός

Παράδειγμα στόχων στην Ελλάδα και ποσοτικοποίηση - 1

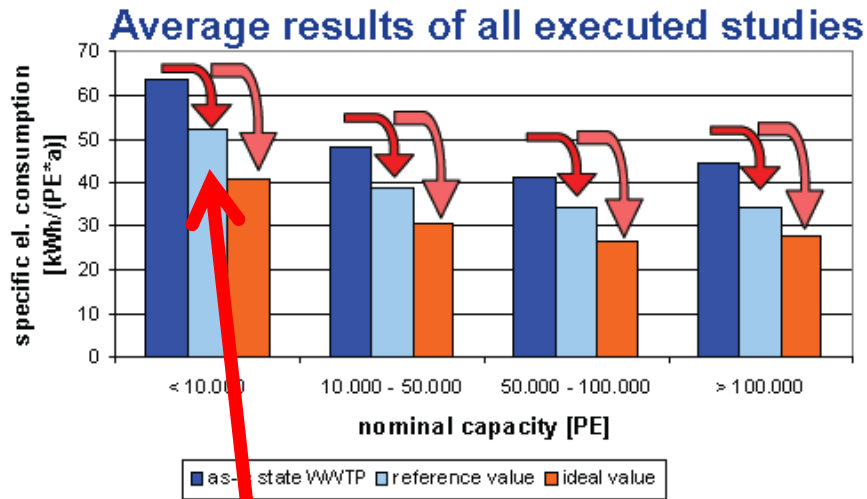
Από έρευνα σε 11 ΕΕΛ του ελλαδικού χώρου (από τις περίπου 300 μονάδες), μικρής (6.000 ικ), μεσαίας (100.000 ικ) και μεγάλης δυναμικότητας (4.000.000 ικ, Ψυτάλλεια), συμπεραίνουμε τα εξής:

- Η πραγματική κατανάλωση ξεπερνά κατά **20-50%** την θεωρητική (βάσει μοντέλων με έμφαση στη βιολογική βαθμίδα/αερισμός και τη γραμμή ιλύος).
- Συμβατικές ΕΕΛ θα μπορούσαν να καλύψουν εσωτερικά (με χρήση του παραγόμενου βιοαερίου) το **43-74%** της καταναλισκόμενης ενέργειας αερισμού και επεξεργασίας ιλύος (που αποτελούν και τους βασικούς καταναλωτές ενέργειας μιας ΕΕΛ)
- Το ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας στη βιολογική βαθμίδα στο σύστημα του **παρατεταμένου αερισμού** κυμαίνεται μεταξύ 60-82%, με τον αερισμό να αποτελεί το 29-75% της συνολικής κατανάλωσης. Αντίστοιχα, τα ποσοστά του **συμβατικού συστήματος** είναι 53-68% και 26-57%.

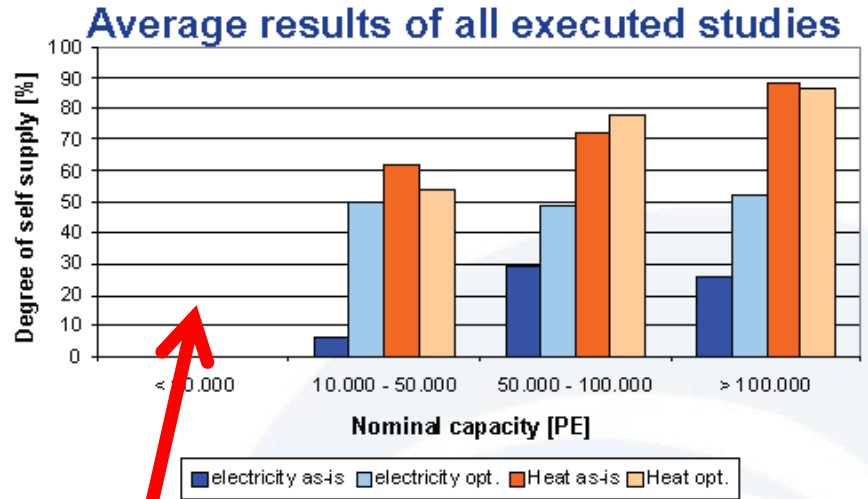
Παράδειγμα στόχων στην Ελλάδα και ποσοτικοποίηση - 2

- Τα ποσοστά κατανάλωσης ενέργειας της διαχείρισης ιλύος για το σύστημα **παρατεταμένου αερισμού** και το **συμβατικό σύστημα** είναι 2-7% και 6-18% επί της συνολικής κατανάλωσης, αντίστοιχα.
- Οι ετήσιες δαπάνες μία μεσαίας μονάδας (100.000 ι.κ.) για τον αερισμό και την ιλύ ανέρχονται σε 25 kW/person.yr.

Δυνατότητες (από την αξιολόγηση στη Γερμανία)



Αυτό μας δείχνει ότι π.χ. για ΕΕΛ < 10.000 ι.κ. μπορούμε να επιτύχουμε έως και **20% μείωση** στο δείκτη kWh/m³ έτος.



Αυτό μας δείχνει ότι για δυναμικότητες < 10.000 ικ δεν έχουμε καμία δυνατότητα self supply (αφού δεν έχουμε έργα όπως χώνευση ιλύος-παραγωγή βιοαερίου κλπ).

Η πίεση για ενεργειακή «χαλιναγώγηση» είναι ιδιαίτερη εδώ λοιπόν.

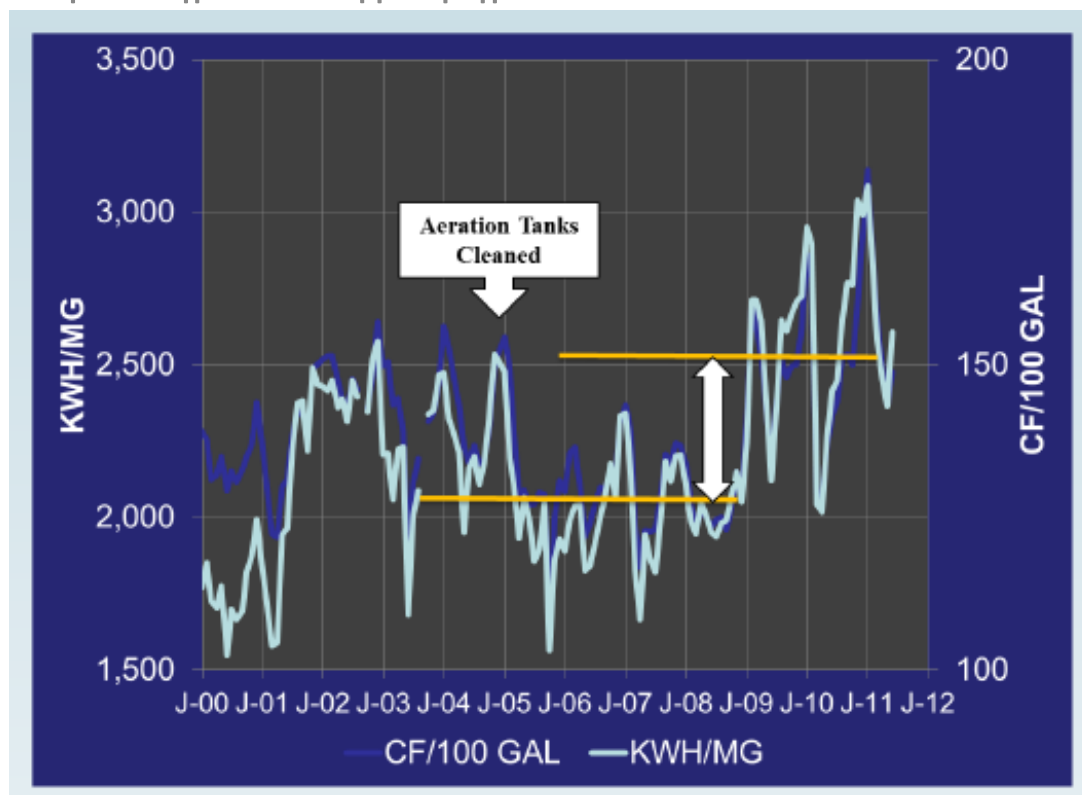
Κύριες ευκαιρίες για μείωση ενεργειακού κόστους - 1

1. Μείωση παρασιτικών εισροών στο δίκτυο αποχέτευσης, άρα μείωση λειτουργίας αντλιών στο δίκτυο και μείωση του όγκου των λυμάτων που πρέπει να διαχειριστούν στην ΕΕΛ.
2. Επικέντρωση στον αερισμό (που αποτελεί πλέον του 50% της ενεργειακής δαπάνης στις ΕΕΛ – παρατεταμένου αερισμού, δηλ. τη συντριπτική πλειοψηφία των ΕΕΛ στην Ελλάδα). Ακριβής κατά το δυνατόν μέτρηση του διαλελυμένου οξυγόνου (ΔO). Αυτοματισμός στο SCADA, ώστε ανάλογα με την τιμή ΔO να προσαρμόζεται η λειτουργία (στροφές) του επιφανειακού αεριστήρα ή του φυσητήρα στην περίπτωση υποβρύχιας διάχυσης. Π.χ. επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 20% στην κατανάλωση ενέργειας με μείωση του ΔO στο τελευταίο τμήμα της δεξαμενής σε 0.5 mg/L (από το 1-3 mg/L).

Κύριες ευκαιρίες για μείωση ενεργειακού κόστους - 2

3. Ορθή διαχείριση του εξοπλισμού στον αερισμό π.χ. καθαρισμός διαχυτήρων στον πυθμένα της δεξαμενής αερισμού (το πότε θα μπορεί να προκύπτει από τη συσχέτιση απόδοσης/κατανάλωσης)

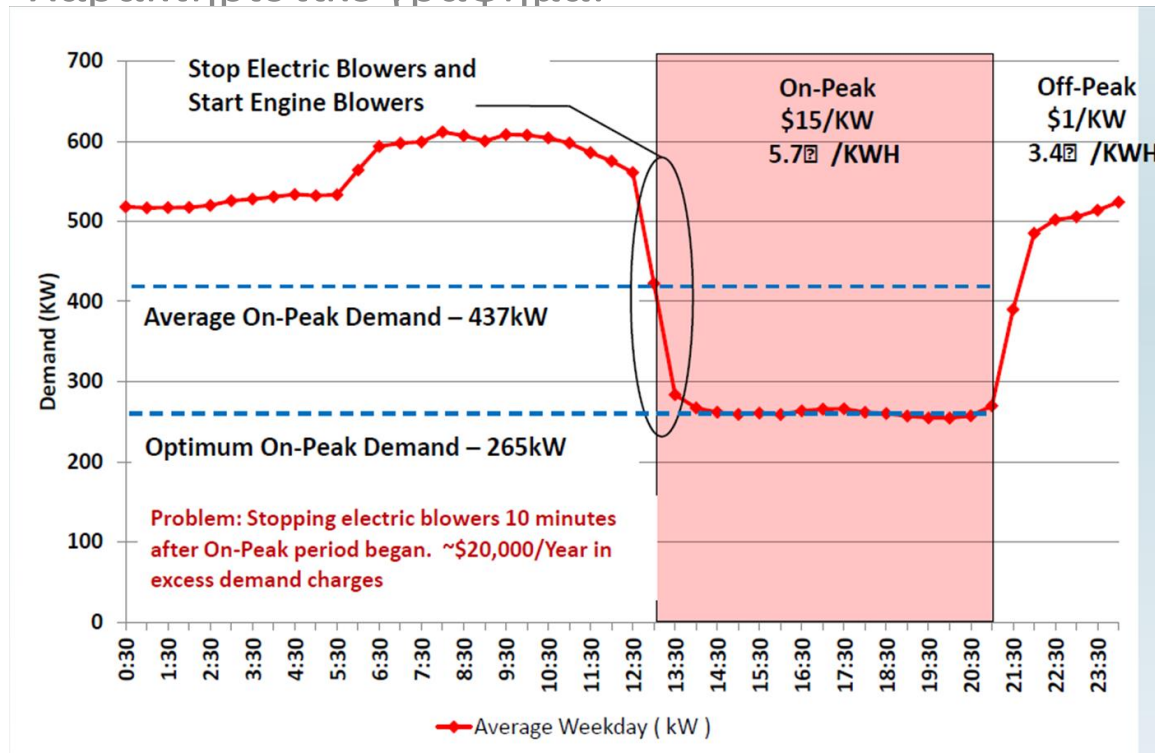
Χαρακτηριστικό γράφημα:



Κύριες ευκαιρίες για μείωση ενεργειακού κόστους - 3

4. Βέλτιστη/ολοκληρωμένη διαχείριση των διαθέσιμων πηγών/παροχών ενέργειας, όταν ο πάροχος ενέργειας εφαρμόζει κλιμακωτή τιμολόγηση ή/και υπάρχει δυνατότητα άλλης πηγής ενέργειας (φυσικό αέριο, ΑΠΕ, εσωτερική παραγωγή βιοαερίου κτλ)

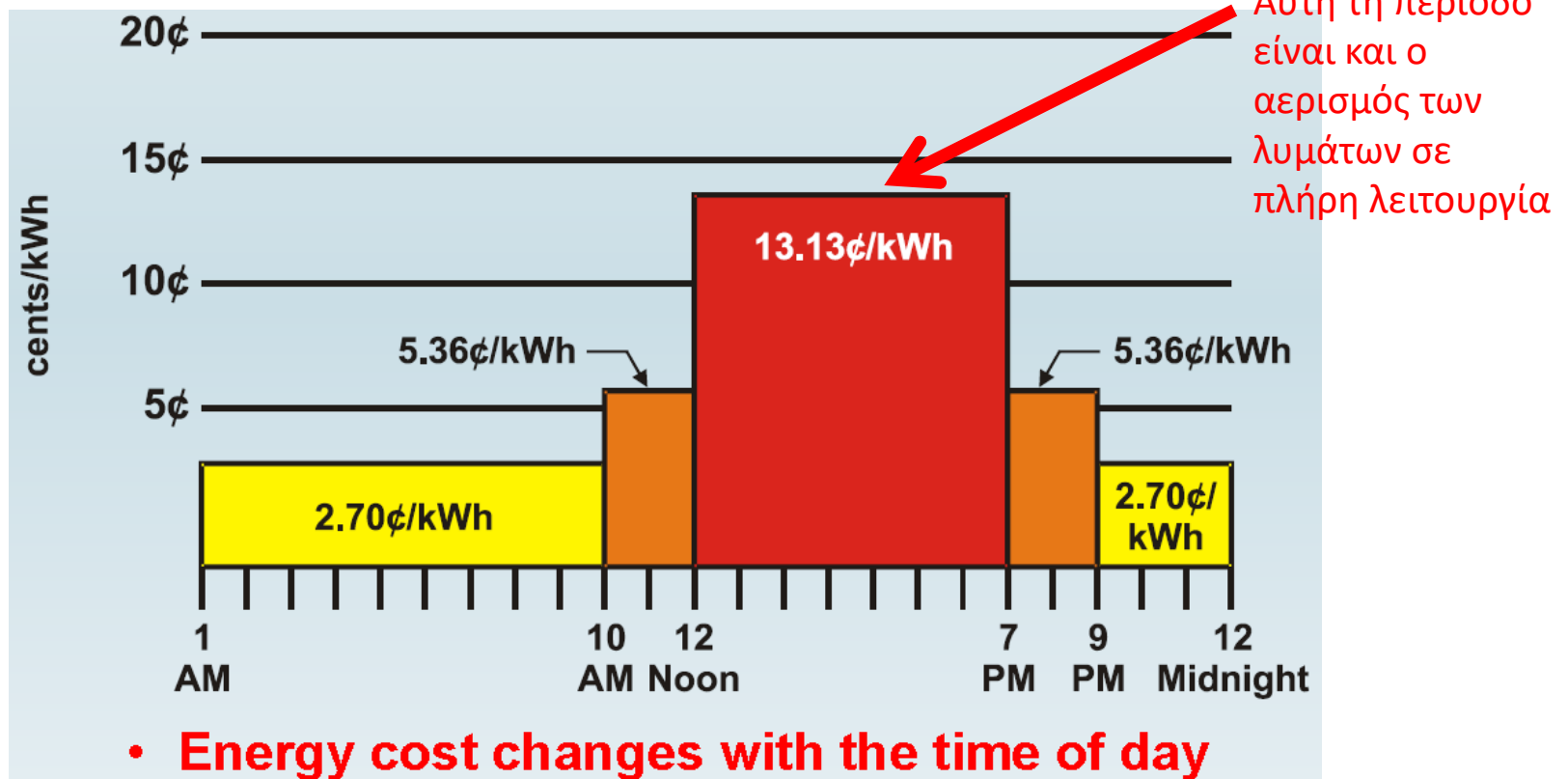
Χαρακτηριστικό γράφημα:



Κύριες ευκαιρίες για μείωση ενεργειακού κόστους - 4

5. Θέλουμε να συσχετίσουμε την ενεργειακή ζήτηση με τις διακυμάνσεις του τιμολογίου (π.χ. της ΔΕΗ) σε μία τυπική μέρα.

Παράδειγμα πως αλλάζει το τιμολόγιο στις ΗΠΑ:



Κύριες ευκαιρίες για μείωση ενεργειακού κόστους - 5

6. Θέλουμε κάθε ΕΕΛ να έχει ένα τέτοιο Πίνακα:

Column	1	2	3	4
	Electric use (kWh)	Average daily flow (MGD)	Average daily influent BOD (lb/day)	Average daily effluent BOD or CBOD (lb/day)
January				
February				
March				
April				
May				
June				
July				
August				
September				
October				
November				
December				
WWTP Efficiency Baseline				
	#DIV/0!	MWh/MG	#DIV/0!	kWh/lb BOD

Κύριες ευκαιρίες για μείωση ενεργειακού κόστους - 6

7. Και να προκύψει ένας Πίνακας (τύπου benchmark), π.χ. (κατά μέθοδο επεξεργασίας):

Figure 5 WWTP Efficiency Benchmarks		
Treatment Type	MWh/MG	kWh/lb BOD
Extended Air	< 3.8	< 2.9
Conventional Activated Sludge	< 1	< 0.7
Sequential Batch Reactor	< 1.8	< 1.6
Oxidation Ditch	< 2	< 1.6
Trickling Filter	< 0.5	< 0.4
Lagoon* (3 wwtp)	0.7 - 16.2*	2.1 - 12.1*
Contact Stabilization* (4 wwtp)	3.0 - 3.6*	2.3 - 6.5*
Rotating Biological Contactor* (2 wwtp)	0.6 - 8.4*	0.6 - 5.0*

* Entire range of values included due to small number of plants in category. More efficient plants have lower WEEs.

Εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ανάλυσης ενεργειακών δεδομένων - 1

ΕΕΛ	Συσχετισμός της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων με την απόδοση (BOD, N, P, ποιότητα ιλύος κτλ), και τα καθορισμένα όρια εκροής (η απόδοση να στοχεύει σε αυτά και όχι στην επίτευξη υψηλών αποδόσεων, που συνήθως είναι ενεργοβόρα)
	Συσχετισμός της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων και της απόδοσης και με άλλες παραμέτρους (DO, NH4, pH, θερμοκρασία, MLSS, θσ κτλ)
	Συσχετισμός της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων και της απόδοσης με την παλαιότητα τους, τα κόστη συντήρησης και αντικατάστασης (απόσβεση αυτών)
	Διερεύνηση για το αν κάποιες μονάδες συμφέρει να εξυπηρετούνται ενεργειακά και από ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, γαιοθερμία κτλ)
	Διερεύνηση της περίπτωσης εφαρμογής χώνευσης ιλύος και εσωτερικής παραγωγής/κατανάλωσης ενέργειας (παραγωγή βιοαερίου)
	Διερεύνηση της περίπτωσης κατασκευής δεξαμενής εξισορρόπησης ώστε να εξομαλυνθεί η τυχόν ενεργοβόρα υψηλή διακύμανση της παροχής (και η απαίτηση υποδομών μικρότερης ισχύος)
	Διερεύνηση για το αν κάποιες μονάδες συμφέρει να λειτουργούν με μικρότερη ισχύ (ή τμηματικά) σε περιοχές με υψηλές διακυμάνσεις παροχών (τουριστικές, με υψηλές βροχοπτώσεις κτλ)
	Διερεύνηση/Συσχετισμός απόδοσης και ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ μονάδων (π.χ. κλείσιμο αναδευτήρων όταν λειτουργούν οι φυσητήρες, αποδόση/ενεργειακή κατανάλωση βιολογικής βαθμίδας και παραγόμενης ιλύος)

Εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ανάλυσης ενεργειακών δεδομένων - 2

Δίκτυα	Αποτύπωση διαρροών και παρασιτικών εισροών, συσχετισμός δαπανών συντήρησης ή αποκατάστασης και ενεργειακής επιβάρυνσης (απώλειες ή πρόσθετες παροχές, αλλαγή της ισχύος των απαιτούμενων υποδομών, επηρεασμός των σχετιζόμενων μονάδων επεξεργασίας)
Ιλύς	Συσχετισμός ποιότητας/υγρασίας ιλύος, τρόπου χρήσης αυτής (αντίστοιχες ποιοτικές απαιτήσεις), απαιτούμενης ενέργειας πάχυνσης/αφυδάτωσης, δαπανών μεταφοράς (απόσταση και όγκος, βάσει τρόπου χρήσης/διάθεσης και υγρασίας) κτλ
Πάροχος ρεύματος	Συσχετισμός της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων με την απόδοση της ΕΕΛ και των Α/Σ, και την τιμολογιακή πολιτική του παρόχου ηλεκτρικού ρεύματος και τη δυνατότητα άλλων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ κτλ)
Κοινό	Ευαισθητοποίηση του κοινού, εξοικονόμηση, μείωση κατανάλωσης, επαναχρησιμοποίηση, ώρες αιχμής κτλ

Εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ανάλυσης ενεργειακών δεδομένων - 3

Μία τυπική συσχέτιση μεταξύ της ενεργειακής κατανάλωσης (απαιτούμενου οξυγόνου) με την απόδοση (BOD_5) και μία σειρά βασικών παραμέτρων (θερμοκρασίας και ηλικίας/ποιότητας ιλύος):

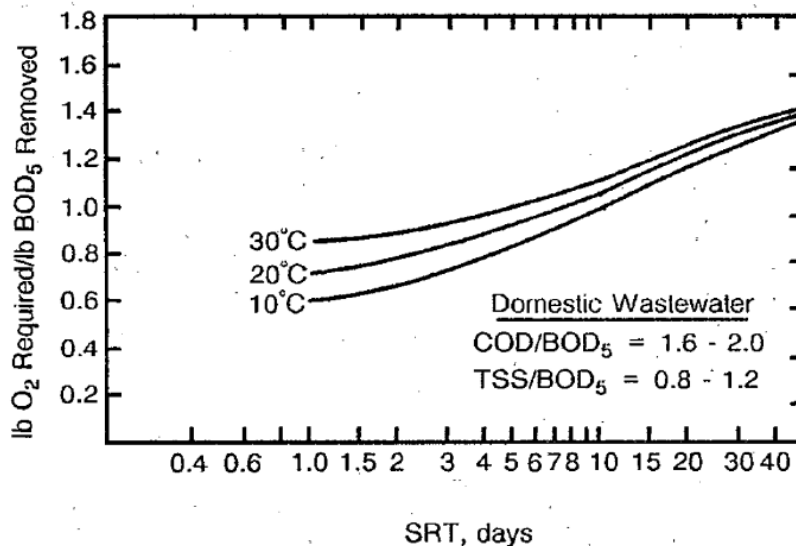


Figure 1 Oxygen consumption ratios for carbonaceous oxygen demand. From U.S. EPA, 1989.

Figure 1 shows that at higher temperatures the oxygen demand per removed BOD_5 is increased. The figure also shows that for a higher sludge retention time (SRT, as defined in Chapter 2.3.3), the oxygen demand per removed BOD_5 is higher. This is a result of the endogenous respiration, which the method implicitly considers. If the SRT is higher F/M is lower, which increases the endogenous respiration and therefore increases the oxygen demand per amount of BOD_5 removed.

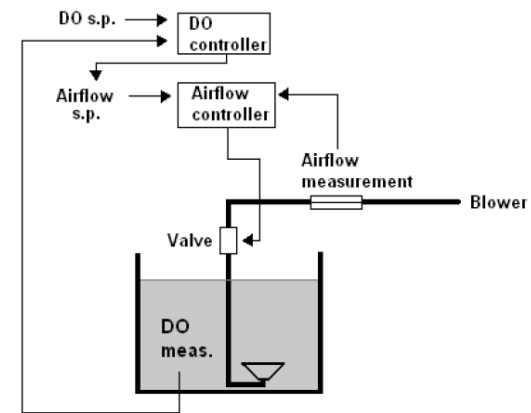
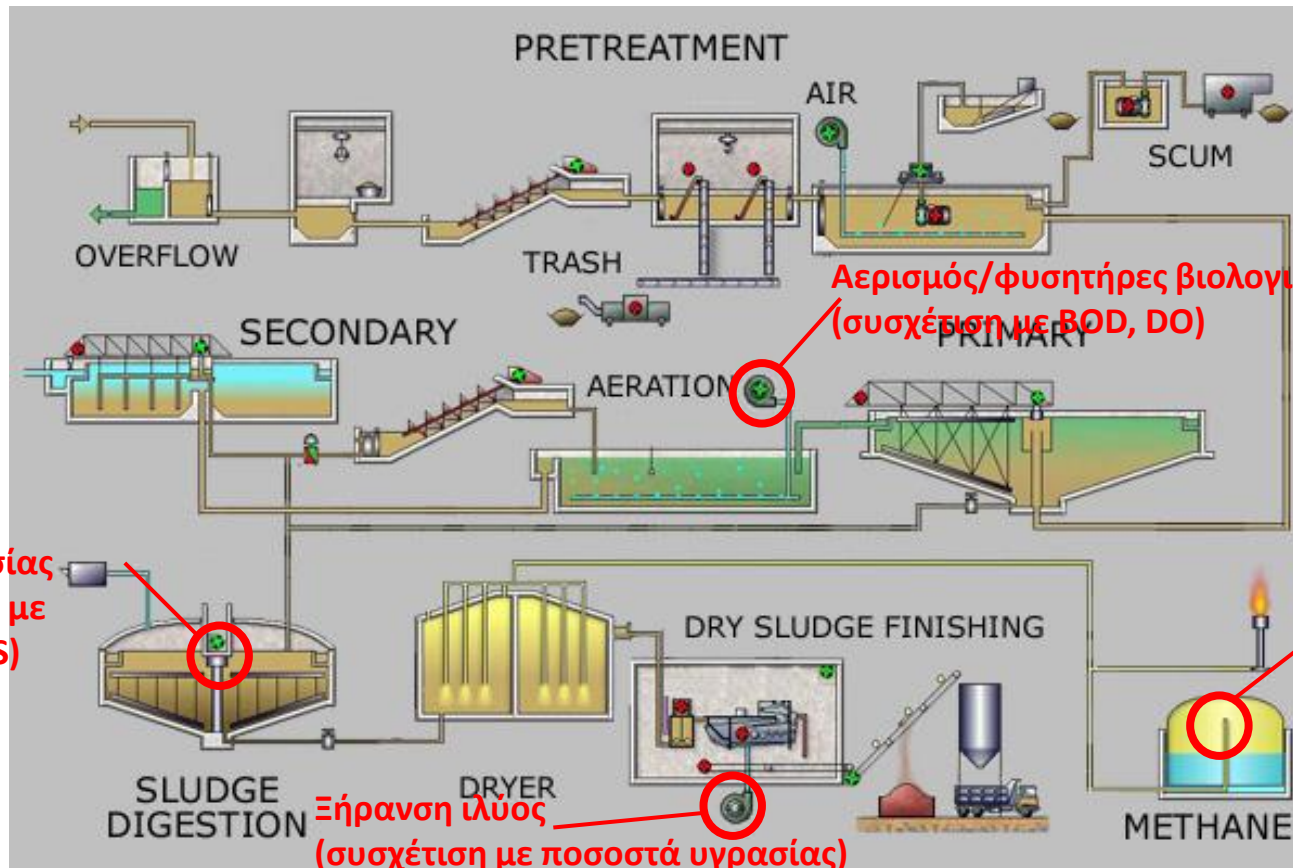


Figure 10 DO cascade control. In the figure, s.p. is set-point.

The main advantage with DO cascade control is when using non-linear valves, for example butterfly valves. When using non-linear valves and DO cascade control, the non-linear characteristic of the valve is counteracted. This is possible since the control is made in two steps where the airflow controller keeps track of the airflow – if a too big jump in valve opening is made the controller will correct for this. The disadvantage of DO cascade control is that it requires airflow meters, which might be expensive.

Εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ανάλυσης ενεργειακών δεδομένων - 4

Μία τυπική εφαρμογή αισθητήρων καταγραφής ενεργειακών δεδομένων:



Προτεινόμενα βήματα - 1

1. Προσπάθεια για «προώθηση» Πρόσκλησης (στη νέα Προγραμματική Περίοδο 2014-2020) που θα αφορά στον έλεγχο – περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης (μείωση κλιματικής αλλαγής) των ΕΕΛ πανελλαδικά. Χρειάζεται προσοχή καθώς το όλο θέμα άπτεται της λειτουργίας από το Φορέα/Δικαιούχο και τίθενται θέματα επιλεξιμότητας.
2. Στοχευμένη επικοινωνία με ορισμένους λειτουργούς ΕΕΛ (π.χ. ορισμένες ΔΕΥΑ στις Περιφέρειες Δυτικής Ελλάδας, Στερεάς Ελλάδας) για εγκατάσταση μετρητών κατανάλωσης ενέργειας – παρακολούθηση και έλεγχο. Στόχος η τεχνογνωσία και η σύναψη Σύμβασης υπηρεσίας.
3. Με την ενσωμάτωση του ειδικού κριτηρίου ενεργειακής κατανάλωσης στις μελετοπροσφορές των ΕΕΛ (πιθανότατα με βαρύτητα 15%) θα πρέπει να γίνουν επικοινωνίες με Φορείς και Υποψήφιους Αναδόχους για συνεργασία στη φάση της προετοιμασίας και υποβολής προσφορών.

Προτεινόμενα βήματα - 2

4. Διερεύνηση δυνατοτήτων και προοπτικών συμμετοχής σε ερευνητικά προγράμματα με partners: ΔΕΥΑ, ΑΕΙ, εταιρείες κλπ.

REFERENCES

	Author	Title
1	NREL	Energy Efficiency Strategies for Municipal WWTP
2	EPRI	Water & Sustainability (Volume 4): U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - The Next Half Century
3	AWWA Research Foundation	Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities
4	Dimopoulou A.	Evaluation the energy consumption in various activated sludge systems and estimate the GHG emissions
5	Viktor Larsson	Energy savings with a new aeration and control system in a mid-size Swedish wastewater treatment plant
6	Joe Rohrbacher, P.E.	Energy Optimization and Management at WWTPs