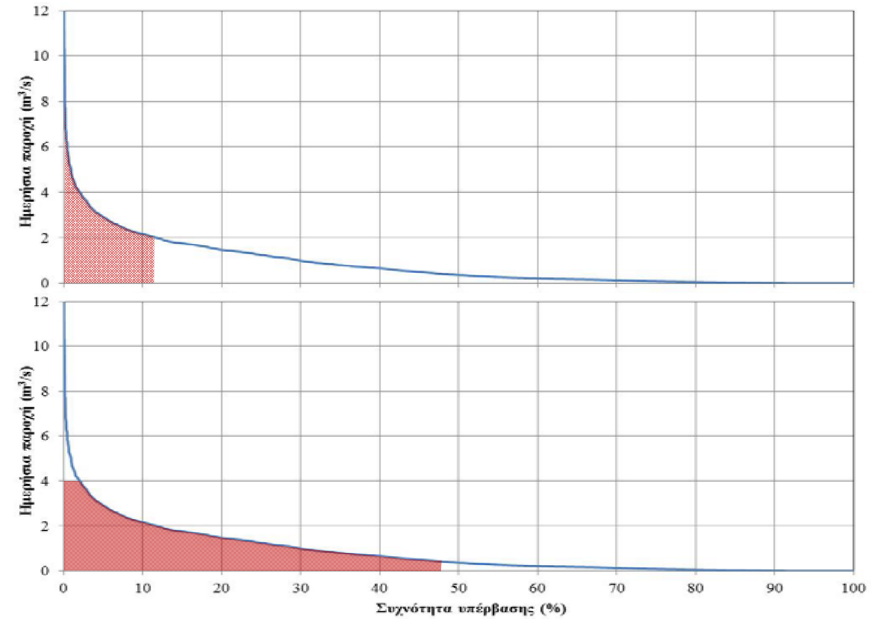
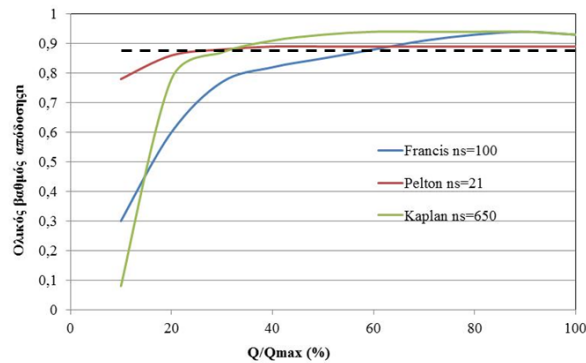
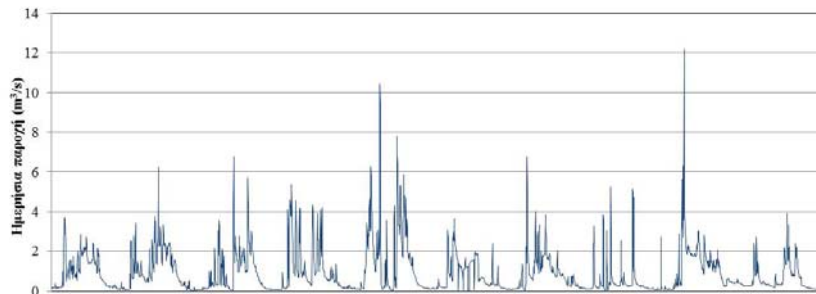


Υδροηλεκτρικά έργα

Εφαρμογές Σχεδιασμού Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων



Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα 2016

Αριθμητικό παράδειγμα

Σε θέση ποταμού εξετάζεται η κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού έργου με καθαρό ύψος πτώσης 260 m. Στη θέση υδροληψίας διατίθενται ημερήσιες παροχές για μια περίοδο 10 υδρολογικών ετών, ενώ στον Πίνακα 1 δίνονται οι μέσες μηνιαίες παροχές.

Πίνακας 1 Μέσες μηνιαίες παροχές (m³/s)

Μήνας	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Έτος
Μέση τιμή	0.48	1.37	1.46	0.99	1.40	1.53	1.66	1.03	0.42	0.23	0.15	0.12	0.90

Ζητούνται:

1. Η εκτίμηση της οικολογικής παροχής και της χρονοσειράς ημερήσιων όγκων νερού προς εκμετάλλευση
2. Η αρχική εκτίμηση της μέσης ετήσιας δυνητικής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρώντας ολικό συντελεστή απόδοσης 0.85
3. Η κατάρτιση της καμπύλης διάρκειας της ημερήσιας εκμεταλλεύσιμης παροχής
4. Η κατάρτιση υπολογιστικού φύλλου για την προσομοίωση της ημερήσιας λειτουργίας του υδροηλεκτρικού, και τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας. Θεωρείστε ότι ο στρόβιλος ξεκινάει τη λειτουργία του με παροχή μεγαλύτερη από το 10% της μέγιστης και στη συνέχεια έχει σταθερό ολικό συντελεστή απόδοσης 0.85
5. Η κατάρτιση υπολογιστικού φύλλου για την προσομοίωση της ημερήσιας λειτουργίας του υδροηλεκτρικού, και τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας. Θεωρείστε ότι ο στρόβιλος έχει μεταβλητό συντελεστή απόδοσης (προκύπτει από καμπύλες που δίνονται), ενώ ο συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι 0.96
6. Θεωρώντας ότι θα εγκατασταθεί ένας στρόβιλος, να υπολογιστεί η ονομαστική παροχή του, ώστε να μεγιστοποιείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιείτε τις καμπύλες τριών στροβίλων (Francis, Pelton, Kaplan) που δίνονται. Θεωρείστε ότι θα πρέπει να τηρούνται οι περιορισμοί: (α) ο όγκος νερού που αξιοποιείται να είναι τουλάχιστον το 75% του συνόλου, (αφού αφαιρεθεί η οικολογική παροχή), (β) ο συντελεστής χρησιμοποίησης του έργου να είναι τουλάχιστον 30%
7. Η διερεύνηση της εγκατάστασης δύο στροβίλων. Υπολογίστε την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από διαφορετικούς συνδυασμούς στροβίλων και εντοπίστε τους αποδοτικότερους σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
8. Η τελική επιλογή δύο στροβίλων λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους εκτός από την μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Εκτίμηση οικολογικής παροχής

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2	Έκταση	42.8 km2													
3	Απορροή	28.4 hm3													
4	Απορροή	663.3 mm													
5															
6															
7		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Έτος	
8	1971-72	0.18	0.77	1.32	1.02	1.73	1.78	1.55	1.00	0.31	0.21	0.13	0.08	0.84	
9	1972-73	1.20	1.17	0.59	1.43	2.61	2.14	1.74	0.91	0.28	0.11	0.05	0.09	1.03	
10	1973-74	0.32	0.81	1.13	0.20	1.89	1.71	2.17	1.57	0.42	0.11	0.07	0.17	0.88	
11	1974-75	0.90	2.81	1.57	0.76	1.54	1.92	1.06	0.67	0.43	0.15	0.15	0.09	1.00	
12	1975-76	0.77	3.45	2.22	1.11	0.44	2.45	3.62	2.18	0.76	0.22	0.12	0.12	1.45	
13	1976-77	0.22	0.94	1.99	1.05	0.87	1.45	0.99	0.42	0.49	0.32	0.11	0.08	0.74	
14	1977-78	0.18	1.19	0.89	1.80	1.95	1.40	0.98	0.72	0.39	0.40	0.14	0.11	0.85	
15	1978-79	0.57	0.63	0.82	0.39	0.53	0.31	1.28	0.26	0.16	0.09	0.26	0.10	0.45	
16	1979-80	0.15	0.80	3.67	1.88	2.13	1.49	1.37	1.32	0.42	0.48	0.41	0.30	1.20	
17	1980-81	0.28	1.16	0.40	0.28	0.34	0.61	1.80	1.28	0.57	0.18	0.10	0.05	0.59	
18	Μέση τιμή	0.48	1.37	1.46	0.99	1.40	1.53	1.66	1.03	0.42	0.23	0.15	0.12	0.90	
19															
20	ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ 1		0.08												
21	ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ 2		0.06												
22	ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ 3		0.03												
23															
24	ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ		0.08												
25	V hm3		25.9												
26	75%*V		19.4												
27															
28		0.90	0.08	0.82											
29			ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ	ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ				ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ							
30	1/10/1971	0.17	0.08	0.09			1	0.03	12.10						
31	2/10/1971	0.17	0.08	0.09			2	0.05	10.36						
32	3/10/1971	0.17	0.08	0.09			3	0.08	10.32						
33	4/10/1971	0.15	0.08	0.07			4	0.11	9.31						
34	5/10/1971	0.12	0.08	0.04			5	0.14	7.81						

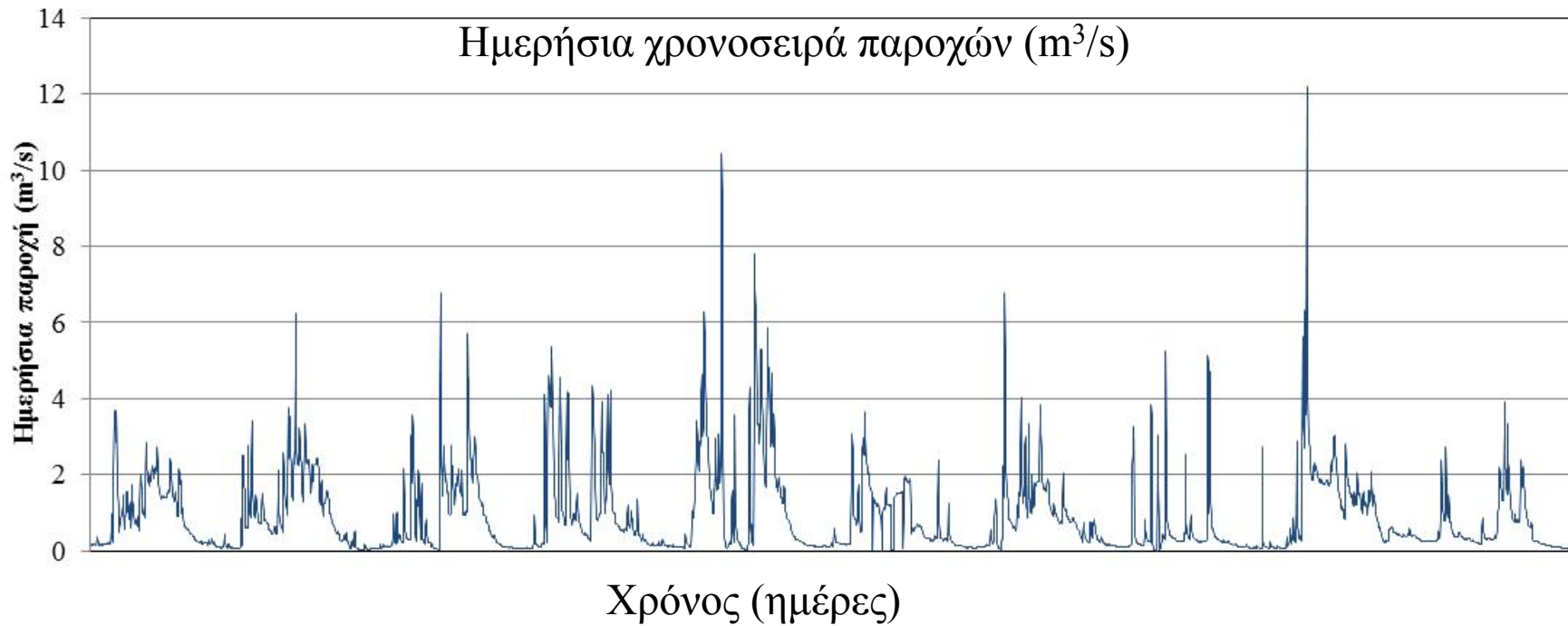
Εκτίμηση οικολογικής παροχής

1. 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου
2. 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου
3. 30 L/s σε κάθε περίπτωση.

Καμπύλη διάρκειας

1. Κατάταξη ημερήσιων παροχών σε φθίνουσα σειρά
2. Εμπειρική συχνότητα υπέρβασης

Προκαταρκτικές εκτιμήσεις



Μέση τιμή εκμεταλλεύσιμης παροχής: **0.82 m³/s** (αφαιρείται η οικολογική παροχή)

Μέσος ετήσιος όγκος νερού προς εκμετάλλευση: **25.9 hm³**

Θεωρώντας:

ρ 1000 kg/m³

g 9.81 m/s²

H 260 m

n 0.85

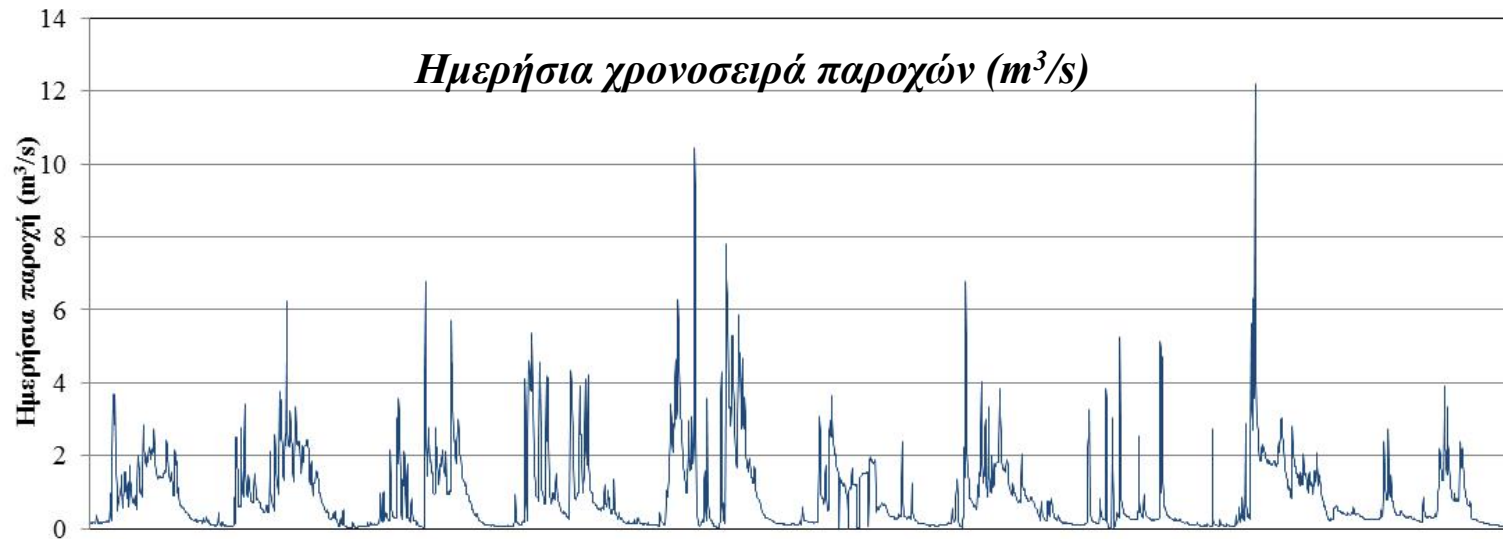
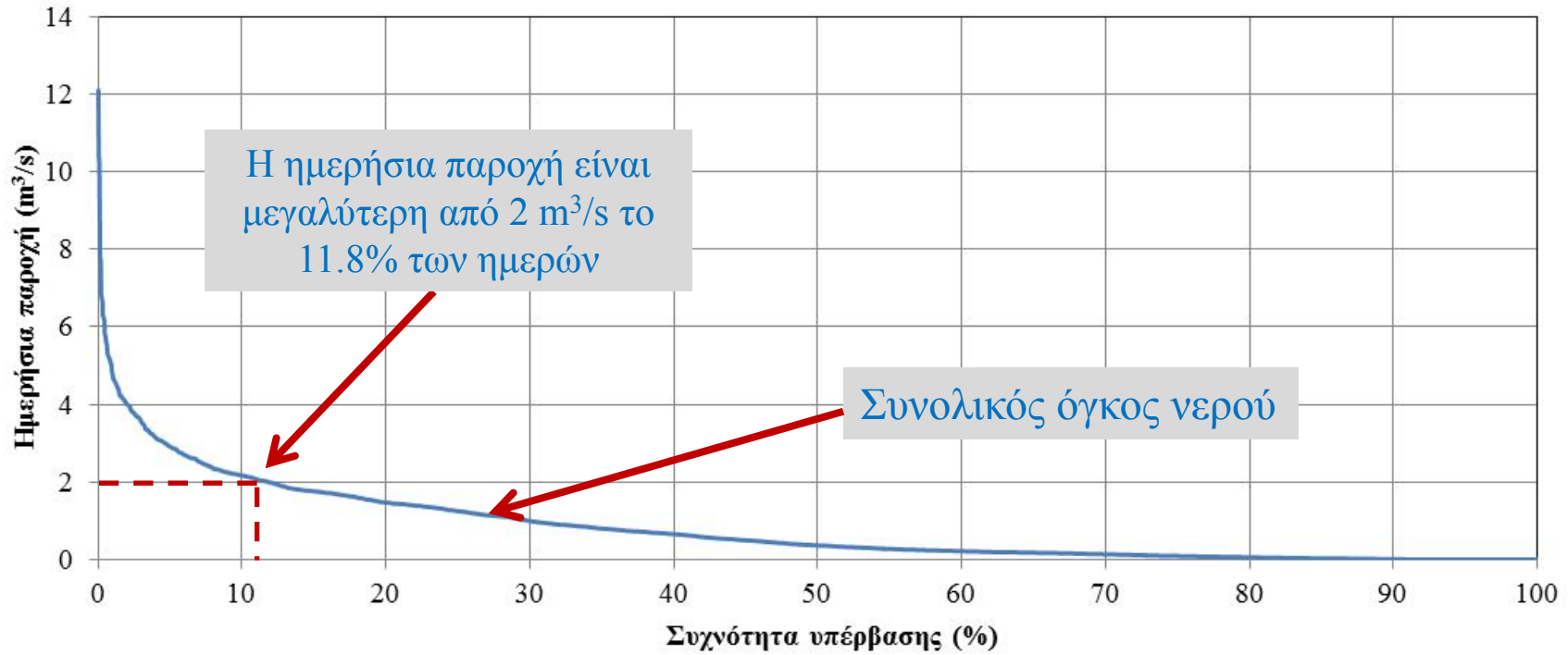
Τα δυνητικά μεγέθη για πλήρη εκμετάλλευση:

Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια: **15 624 MWh**

Εγκατεστημένη ισχύς για συνεχή λειτουργία: **1.8 MW**

Εγκατεστημένη ισχύς για λειτουργία 3000 h: **5.2 MW**

Καμπύλη διάρκειας-παροχής

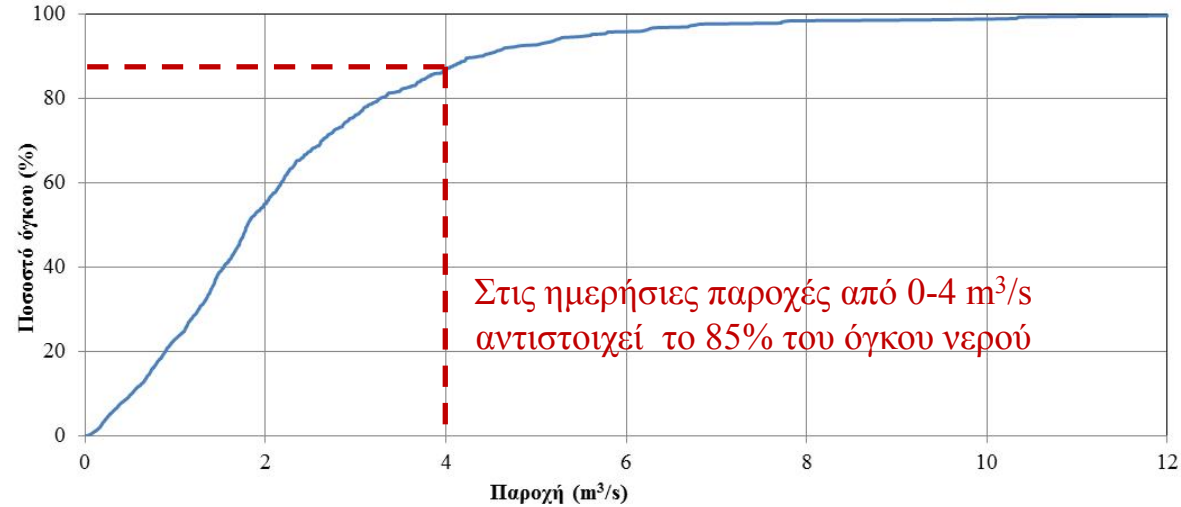


Καμπύλες όγκου-διάρκειας

ρ 1000 kg/m³
 g 9.81 m/s²
 H 260 m
 n 0.85

Μέση τιμή εκμεταλλεύσιμης παροχής: **0.82 m³/s**
 Μέσος ετήσιος όγκος νερού προς εκμετάλλευση: **25.9 hm³**

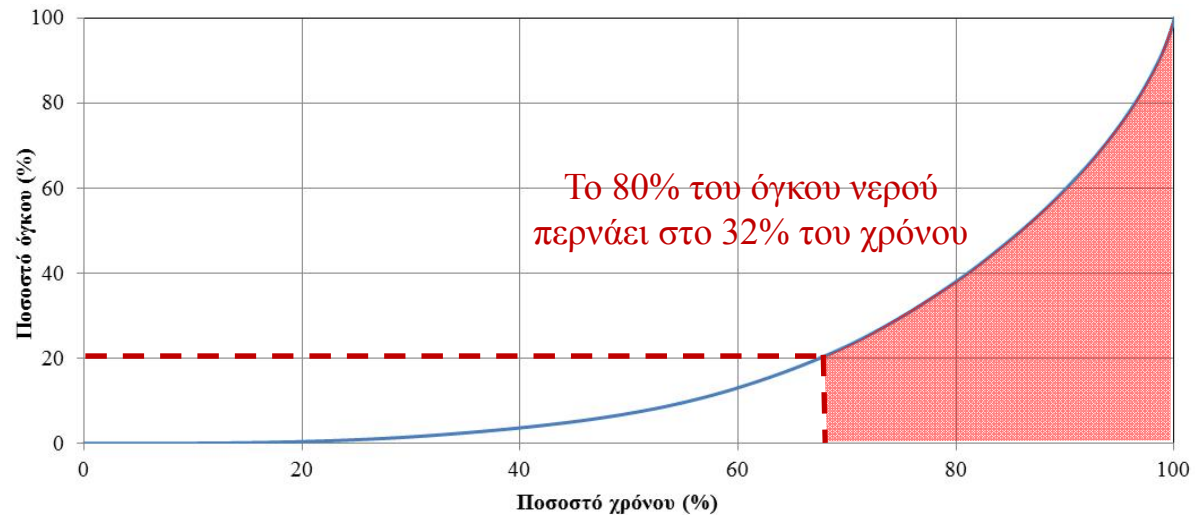
Σχέση ποσοστού όγκου-παροχής



Σχέση παροχής-εγκατεστημένης ισχύος

Q (m ³ /s)	I (MW)
0.5	1.1
1.0	2.2
1.5	3.3
2.0	4.3
2.5	5.4
3.0	6.5
4.0	8.7
5.0	10.8
10.0	21.7

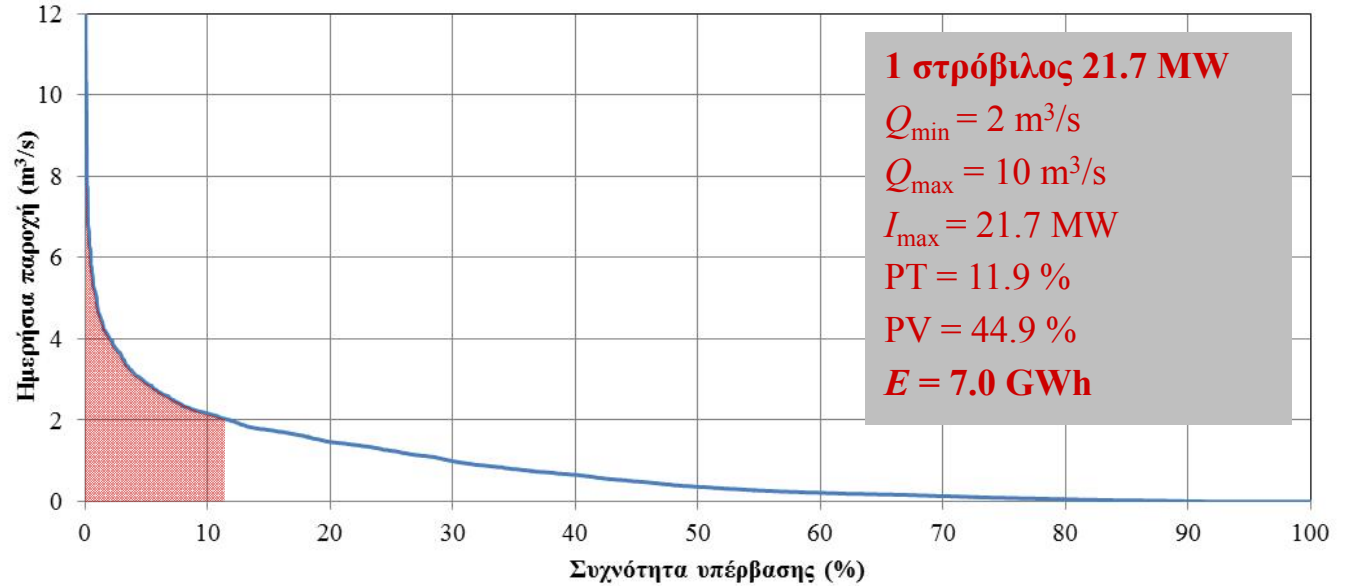
Σχέση ποσοστών όγκου-χρόνου



Παράδειγμα προσομοίωσης ΜΥΗΕ με έναν στρόβιλο ($n = 0.85$, για $Q \geq 0.2 Q_{\max}$)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ Θεωρητική ισχύς για διάφορες παροχές

	Q (m ³ /s)	I (MW)
H=260 m	0.5	1.1
$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$	1	2.2
$g=9.81 \text{ m/s}^2$	1.5	3.3
$n=0.85$	2	4.3
	2.5	5.4
	3	6.5
	4	8.7
	5	10.8
	10	21.7



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

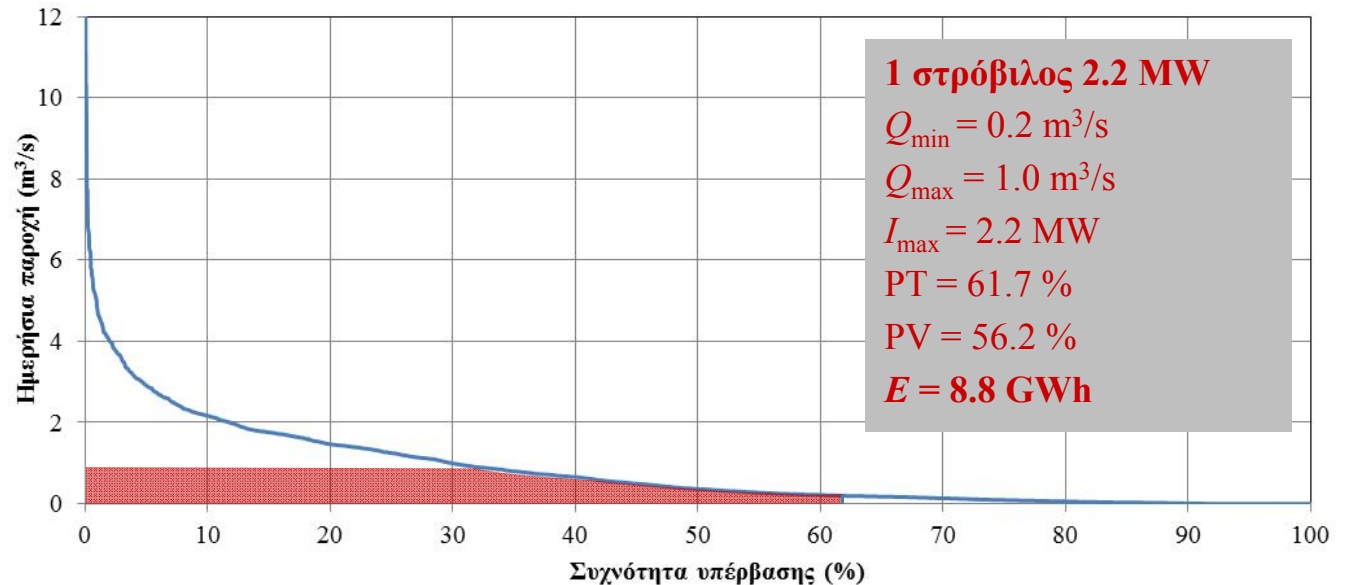
Q_{\min} , Q_{\max} : Ελάχιστη και μέγιστη (ονομαστική) παρογή εκμετάλλευσης (m³/s)

I_{\max} : Ισχύς για την μέγιστη παρογή εκμετάλλευσης (MW)

PT: Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος (%)

PV: Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται (%)

E: Συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)



Φύλλο υπολογισμών (1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2			Στατιστικά ημερήσιων χρονοσειρών (α) παροχής, (β) όγκου νερού, (γ)						
3			δυναμικής ενέργειας και (δ) απαιτούμενης ισχύος						
4	H	260		Για 10 έτη	m ³ /s	m ³ /day	kWh	kW	
5	ρ	1000		ΜΕΓΙΣΤΟ	12.1	1045256.9	629479.8	26228.3	
6	g	9.81		ΕΛΑΧΙΣΤΟ	0	0	0	0	
7	n	0.85		ΜΕΣΟ	0.822	71029.3	42775.6	1782.3	
8									
9						hm ³	GWh		
10				ΑΘΡΟΙΣΜΑ		259.5	156.3		
11				Σύνολο ημερών	3653				
12				Μέσο ετήσιο		25.9	15.6		
13				Ημερήσια ενέργεια E(kWh)=g*n*H(m)*V(m³)/3600					
14				=B\$6*B\$7*B\$4*C25/3600					
15									
16	Ελάχιστη, μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (m³/s)					Qmax (m ³ /s)	10	5	2
17						Qmin (m ³ /s)	1	0.5	0.2
18	Ισχύς στη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης					I _{max} (MW)	21.7	10.8	4.3
19	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος					PT (%)	29.9	44.7	61.7
20	Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται					PV (%)	76.9	88.6	80.6
21	Συνολική ενέργεια					E (GWh)	120.2	138.4	126.0
22						E (GWh/y)	12.0	13.8	12.6
23						ΣΔ	0.06	0.15	0.33
24		m ³ /s	m ³ /day	kWh	kW		kWh/d	kWh/d	kWh/d
25	1/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0
26	2/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0
27	3/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0
28	4/10/1971	0.069	5941.2	3577.9	149.1		0	0	0

Σταθερά
μεγέθη
έργου

Χρονοσειρά
ημερήσιων
παροχών

Ημερήσιος όγκος (m³)

=B25*86400

=D25/24

Ημερήσια ισχύς I(kW)=E(kWh)/24h

Φύλλο υπολογισμών (2)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4	H	260							
5	ρ	1000							
6	g	9.81							
7	n	0.85							
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									

- Εάν η παροχή της ημέρας είναι μεταξύ της ελάχιστης-μέγιστης παροχής εκμετάλλευσης τότε υπολογίζεται η **ημερήσια ενέργεια** με βάση τη σχέση $E(\text{kWh})=g*n*H(\text{m})*V(\text{m}^3)/3600=g*n*H(\text{m})*Q(\text{m}^3/\text{s})*86400/3600=g*n*H(\text{m})*Q(\text{m}^3/\text{s})*24$
- Εάν η παροχή είναι **μεγαλύτερη από τη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης** τότε υπολογίζεται η ημερήσια ενέργεια που από **παροχή ίση** με τη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης
- Εάν η παροχή είναι **μικρότερη από τη μικρότερη παροχή εκμετάλλευσης** τότε η ημερήσια ενέργεια είναι μηδέν

```
=IF(AND($B25>G$17,$B25<G$16),$B$4*$B$6*$B$7*$B25*24,IF($B25>G$16,$B$4*$B$6*$B$7*G$16*24,0))
```

Ελάχιστη-μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης ορίζονται από το μελετητή										
16	Ελάχιστη, μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (m3/s)				Qmax (m3/s)	10	5	2		
17					Qmin (m3/s)	1	0.5	0.2		
18	Ισχύς στη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης				Imax (MW)	21.7	10.8	4.3		
19	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος				PT (%)	29.9	44.7	61.7		
20	Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται				PV (%)	76.9	88.6	80.6		
21	Συνολική ενέργεια				E (GWh)	120.2	138.4	126.0		
22					E (GWh/y)	12.0	13.8	12.6		
23					ΣΔ	0.06	0.15	0.33		
24		m3/s	m3/day	kWh	kW		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
25	1/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0	
26	2/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0	
27	3/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0	
28	4/10/1971	0.069	5941.2	3577.9	149.1		0	0	0	

Φύλλο υπολογισμών (3)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1				Υπολογισμός ποσοστού όγκου νερού που χρησιμοποιείται					
2				<ul style="list-style-type: none"> • Αθροίζεται η ενέργεια που παράχθηκε • Υπολογίζεται ο ημερήσιος όγκος (και αθροίζεται για όλο το χρονικό διάστημα) από τη σχέση => $V(m^3)=E(kWh)*3600/[g*n*H(m)]$ • Διαιρείται με το συνολικό όγκο νερού και υπολογίζεται το ποσοστό 					
3									
4	H	260							
5	ρ	1000							
6	g	9.81							
7	n	0.85							
8				$=(SUM(G25:G3677)*3600/($B$4*$B$6*$B$7))/($F$10*1000000)*100$					
9							hm ³	GWh	
10				ΑΘΡΟΙΣΜΑ			259.5		
11				Σύνολο ημερών	3653				
12				Μέσο ετήσιο			25.9		
13									
14									
15									
16	Ελάχιστη, μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (m3/s)					Qmax (m3/s)	10	5	2
17						Qmin (m3/s)	1	0.5	0.2
18	Ισχύς στη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης					Imax (MW)	21.7	10.8	4.3
19	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος					PT (%)	29.9	44.7	61.7
20	Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται					PV (%)	76.9	88.6	80.6
21	Συνολική ενέργεια					E (GWh)	120.2	138.4	126.0
22						E (GWh/γ)	12.0	13.8	12.6
23						ΣΔ	0.06	0.15	0.33
24		m3/s	m3/day	kWh	kW		kWh/d	kWh/d	kWh/d
25	1/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0
26	2/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0
27	3/10/1971	0.094	8153.6	4910.3	204.6		0	0	0
28	4/10/1971	0.069	5941.2	3577.9	149.1		0	0	0

$$=(SUM(G25:G3677)*3600/(B4*B6*B7))/(F10*1000000)*100$$

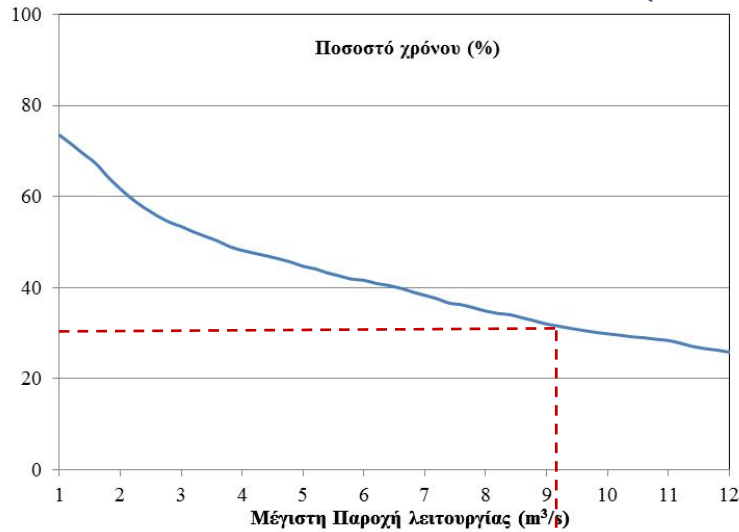
Υπολογισμός χρόνου λειτουργίας στο έτος

Μετρώνται οι ημέρες όπου έχει παραχτεί ενέργεια και υπολογίζεται το ποσοστό τους με βάση το σύνολο των ημερών

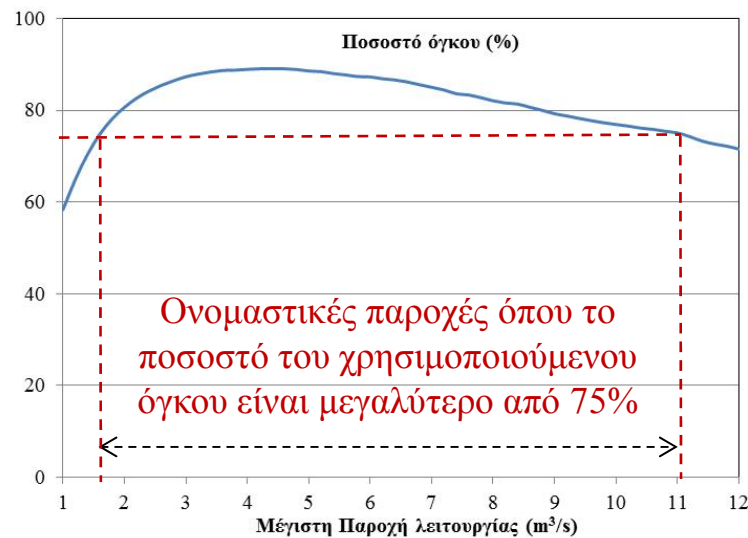
$$=COUNTIF(G25:G3677,">0")/E11*100$$

Παράδειγμα βελτιστοποίησης ΜΥΗΕ με έναν στρόβιλο

($n = 0.85$, για $Q \geq 0.1 Q_{\max}$)



Ονομαστικές παροχές όπου το ποσοστό χρόνου είναι μεγαλύτερο από 30%



Ονομαστικές παροχές όπου το ποσοστό του χρησιμοποιούμενου όγκου είναι μεγαλύτερο από 75%

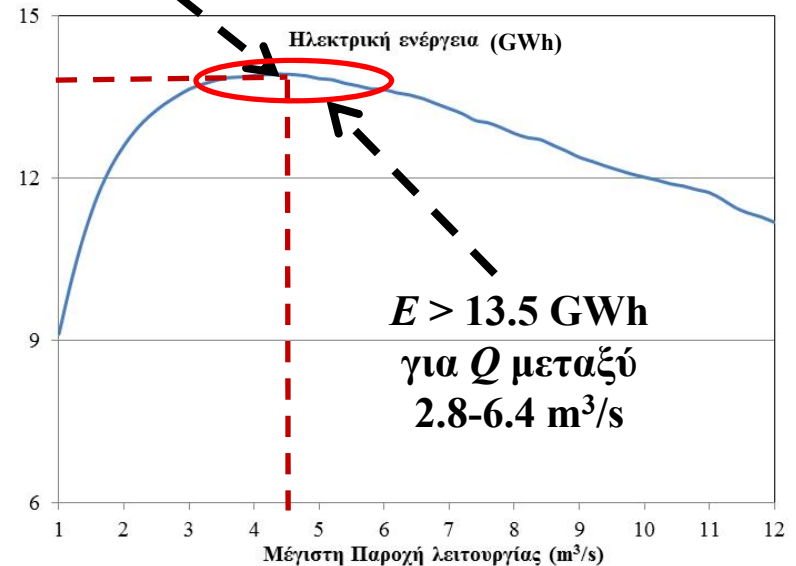
Ονομαστική παροχή λειτουργίας για μεγιστη παραγωγή ενέργειας (χρήση solver)

13					
14					
15					
16	Qmax (m ³ /s)	10	5	2	4.49
17	Qmin (m ³ /s)	1	0.5	0.2	0.449
18	lmax (MW)	21.7	10.8	4.3	9.7
19	PT (%)	29.9	44.7	61.7	46.6
20	PV (%)	76.9	88.6	80	89.0
21	E (GWh)	120.2	138.4	126.0	139.1
22	E (GWh/y)	12.0	13.8	2.6	13.9
23	Δt	0.06	0.15	0.33	0.16
24		kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d
25		0	0	0	0
26		0	0	0	0
27		0	0	0	0
28		0	0	0	0
29		0	0	0	0
30		0	0	0	0
31		0	0	0	0
32		0	0	0	0
33		0	0	0	0
34		0	0	0	0
35		0	0	0	0
36		0	0	0	0
37		0	0	0	0
38		0	0	0	0
39		0	0	0	0
40		0	0	0	0
41		0	0	15442.45	0
42		0	0	11064.634	0
43		0	0	0	0
44		0	0	0	0
45		0	0	0	0

Βελτιστοποίηση με 1 στρόβιλο
Q1min=0.1*Q1max
4.49

Solver Parameters
Set Objective: \$J\$21
To: Max
By Changing Variable Cells: \$J\$16
Subject to the Constraints:
Make Unconstrained Variables Non-Negative
Select a Solving Method: GRG Nonlinear
Solving Method: Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

$Q = 4.49 \text{ m}^3/\text{s}$
 $E = 13.9 \text{ GWh}$



Καμπύλη παραγωγής ενέργειας για ονομαστικές παροχές 1 έως 12 m³/s

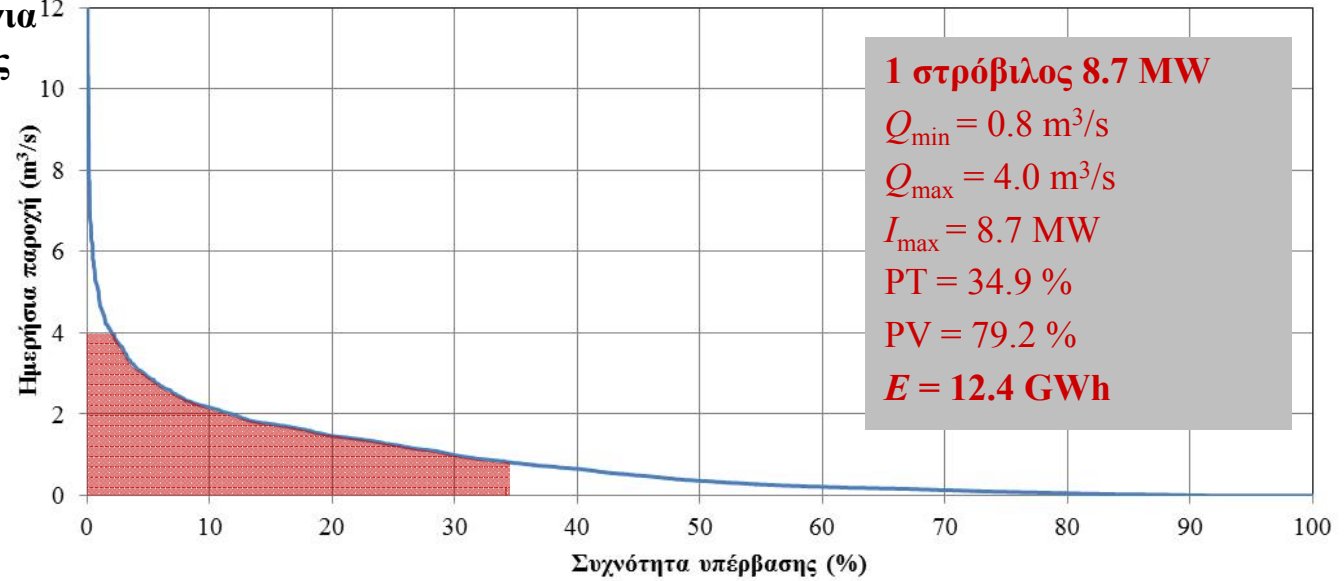
$E > 13.5 \text{ GWh}$
για Q μεταξύ $2.8-6.4 \text{ m}^3/\text{s}$

Παράδειγμα προσομοίωσης ΜΥΗΕ με έναν ή δύο στρόβιλους

($n = 0.85$, για $Q \geq 0.2 Q_{\max}$)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ Θεωρητική ισχύς για
 διάφορες παροχές

	Q (m ³ /s)	I (MW)
H=260 m	0.5	1.1
$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$	1	2.2
$g=9.81 \text{ m/s}^2$	1.5	3.3
$n=0.85$	2	4.3
	2.5	5.4
	3	6.5
	4	8.7
	5	10.8
	10	21.7



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

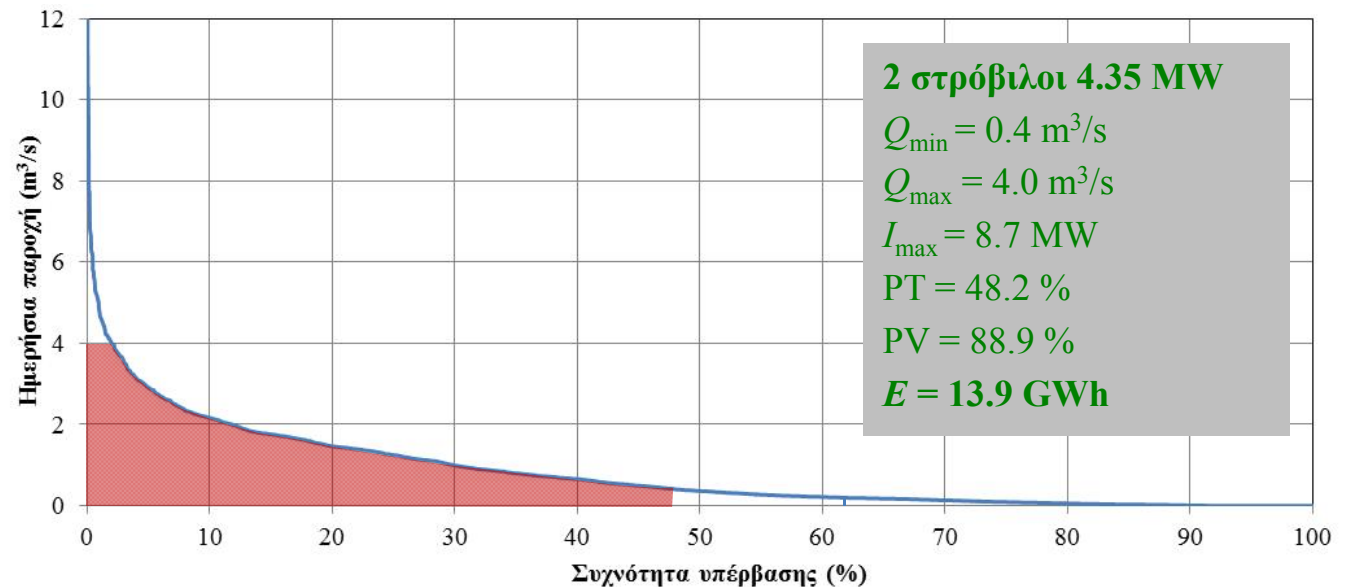
Q_{\min} , Q_{\max} : Ελάχιστη και μέγιστη (ονομαστική) παροχή εκμετάλλευσης (m³/s)

I_{\max} : Ισχύς για την μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (MW)

PT: Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος (%)

PV: Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται (%)

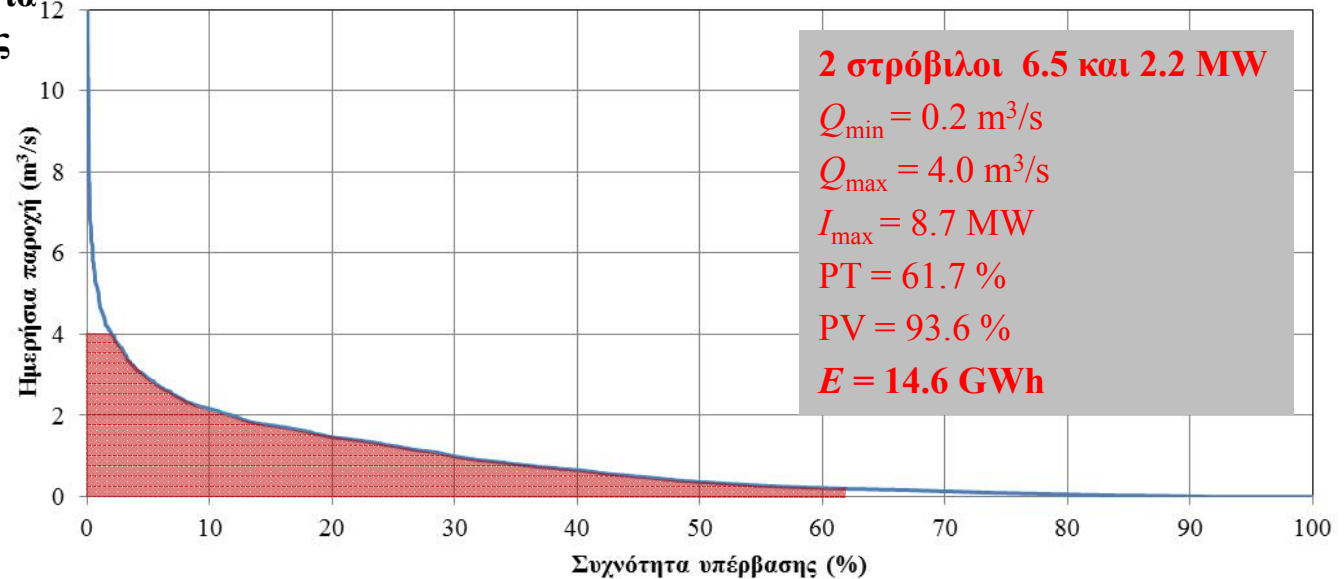
E: Συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)



Παράδειγμα προσομοίωσης ΜΥΗΕ με δύο στροβίλους ($n = 0.85$, για $Q \geq 0.2 Q_{\max}$)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ Θεωρητική ισχύς για
12 διάφορες παροχές

	Q (m ³ /s)	I (MW)
H=260 m	0.5	1.1
$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$	1	2.2
$g=9.81 \text{ m/s}^2$	1.5	3.3
$n=0.85$	2	4.3
	2.5	5.4
	3	6.5
	4	8.7
	5	10.8
	10	21.7



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

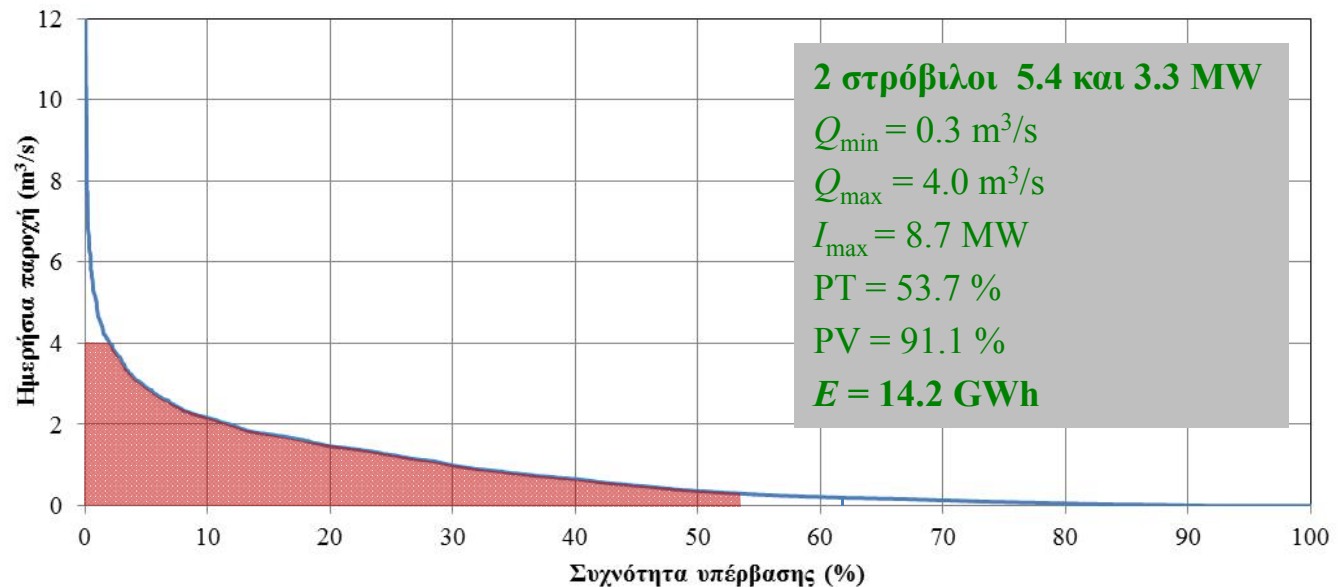
Q_{\min} , Q_{\max} : Ελάχιστη και μέγιστη (ονομαστική) παροχή εκμετάλλευσης (m³/s)

I_{\max} : Ισχύς για την μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (MW)

PT : Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος (%)

PV : Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται (%)

E : Συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)



Παράδειγμα βελτιστοποίησης ΜΥΗΕ με δύο στροβίλους ($n = 0.85$, για $Q \geq 0.1 Q_{\max}$)

	Βελτιστοποίηση με 1 στρόβιλο	Βελτιστοποίηση με 2 ίδιους στροβίλους	Βελτιστοποίηση με 2 διαδοχικούς στροβίλους
	$Q_{1\min}=0.1*Q_{1\max}$	$Q_{1\min}=0.1*(Q_{2\max}/2)$	$Q_{1\min}=0.1*0.1*Q_{2\max}$
Q_{\max} (m ³ /s)	4,49	5,08	8,71 = $Q_{1\max} + Q_{2\max}$
Q_{\min} (m ³ /s)	0,45	0,25	0,09 = $Q_{1\min}$
I_{\max} (MW)	9,7	11,0	18,9
PT (%)	46,6	56,4	75,8
PV (%)	89,0	93,8	99,0
E (GWh)	139,1	146,6	154,7
E (GWh/y)	13,9	14,7	15,5
ΣΔ	0,16	0,15	0,09

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

$H=260$ m
 $\rho=1000$ kg/m³
 $g=9.81$ m/s²
 $n=0.85$

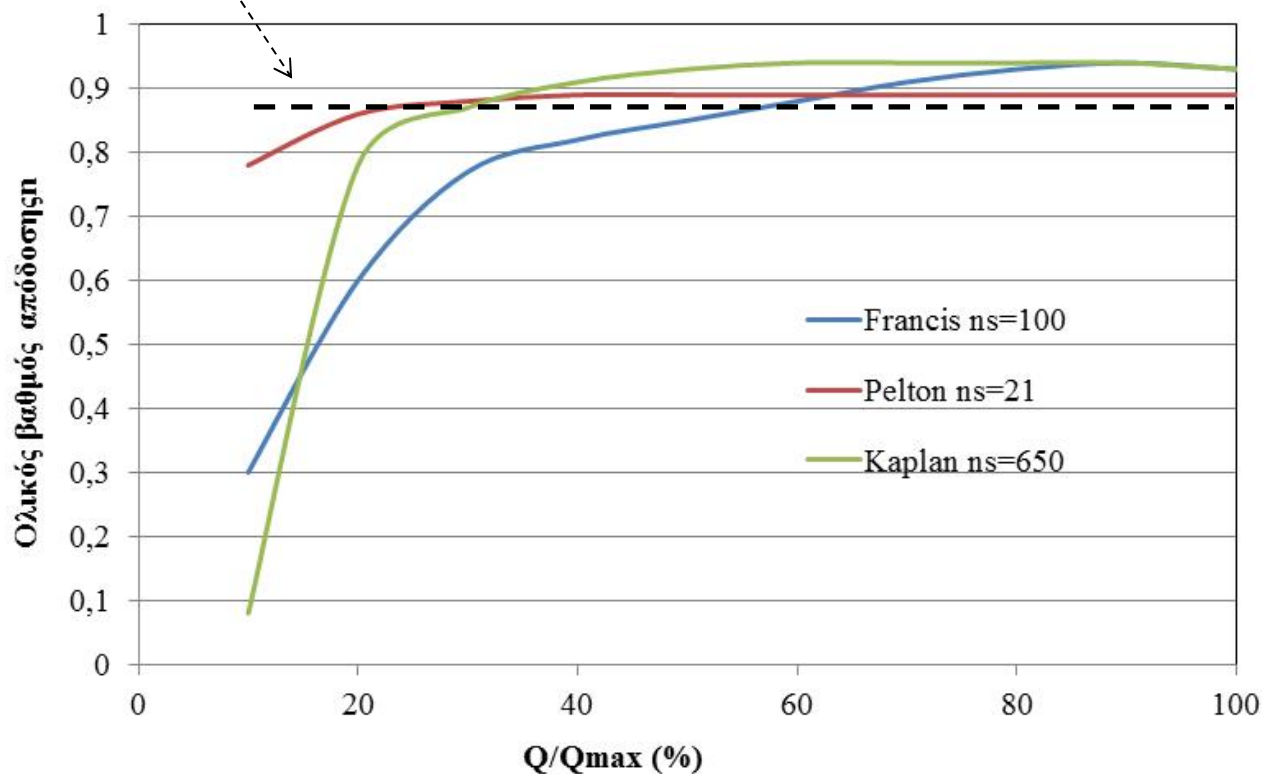
Θεωρητική ισχύς για διάφορες παροχές

Q (m ³ /s)	I (MW)
0.5	1.1
1	2.2
1.5	3.3
2	4.3
2.5	5.4
3	6.5
4	8.7
5	10.8
10	21.7

Καμπύλες στροβίλων (μεταβλητός βαθμός απόδοσης)

Θεωρώντας συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού **0.96**, ο ολικός βαθμός απόδοσης **0.85** αντιστοιχεί σε βαθμό απόδοσης στροβίλων $0.85/0.96 = \mathbf{0.885}$

Q/Qmax	Francis ns=100	Pelton ns=21	Kaplan ns=650
10	0,30	0,78	0,08
20	0,60	0,86	0,78
30	0,77	0,88	0,87
40	0,82	0,89	0,91
50	0,85	0,89	0,93
60	0,88	0,89	0,94
70	0,91	0,89	0,94
80	0,93	0,89	0,94
90	0,94	0,89	0,94
100	0,93	0,89	0,93



Francis ns=100	Pelton ns=21	Kaplan ns=650			
0	0	0			
1	1	1			
2	2	2			
3	3	3			
4	4	4			
5	5	5			
6	6	6			
7	7	7			
8	8	8			
9	9	9			
10	0,4	10	0,78	10	0,08
11	0,33	11	0,788	11	0,15
12	0,36	12	0,796	12	0,22
13	0,39	13	0,804	13	0,29
14	0,42	14	0,812	14	0,36
15	0,45	15	0,82	15	0,43
16	0,48	16	0,828	16	0,5
17	0,51	17	0,836	17	0,57
18	0,54	18	0,844	18	0,64
19	0,57	19	0,852	19	0,71
20	0,6	20	0,86	20	0,78
21	0,617	21	0,862	21	0,789
22	0,634	22	0,864	22	0,796
23	0,651	23	0,866	23	0,807
24	0,668	24	0,868	24	0,816
25	0,685	25	0,87	25	0,825
26	0,702	26	0,872	26	0,834
27	0,719	27	0,874	27	0,843
28	0,736	28	0,876	28	0,852
29	0,753	29	0,878	29	0,861
30	0,77	30	0,88	30	0,87
31	0,775	31	0,881	31	0,874
32	0,78	32	0,882	32	0,878
33	0,785	33	0,883	33	0,882
34	0,79	34	0,884	34	0,886
35	0,795	35	0,885	35	0,89
36	0,8	36	0,886	36	0,894
37	0,805	37	0,887	37	0,898
38	0,81	38	0,888	38	0,902
39	0,815	39	0,889	39	0,906
40	0,82	40	0,89	40	0,91
41	0,823	41	0,89	41	0,912
42	0,826	42	0,89	42	0,914
43	0,829	43	0,89	43	0,916
44	0,832	44	0,89	44	0,918
45	0,835	45	0,89	45	0,92
46	0,838	46	0,89	46	0,922
47	0,841	47	0,89	47	0,924
48	0,844	48	0,89	48	0,926
49	0,847	49	0,89	49	0,928
50	0,85	50	0,89	50	0,93
51	0,853	51	0,89	51	0,931
52	0,856	52	0,89	52	0,932
53	0,859	53	0,89	53	0,933
54	0,862	54	0,89	54	0,934
55	0,865	55	0,89	55	0,935
56	0,868	56	0,89	56	0,936
57	0,871	57	0,89	57	0,937
58	0,874	58	0,89	58	0,938
59	0,877	59	0,89	59	0,939
60	0,88	60	0,89	60	0,94
61	0,883	61	0,89	61	0,94
62	0,886	62	0,89	62	0,94
63	0,889	63	0,89	63	0,94
64	0,892	64	0,89	64	0,94
65	0,895	65	0,89	65	0,94
66	0,898	66	0,89	66	0,94
67	0,901	67	0,89	67	0,94
68	0,904	68	0,89	68	0,94
69	0,907	69	0,89	69	0,94
70	0,91	70	0,89	70	0,94
71	0,912	71	0,89	71	0,94
72	0,914	72	0,89	72	0,94
73	0,916	73	0,89	73	0,94
74	0,918	74	0,89	74	0,94
75	0,92	75	0,89	75	0,94
76	0,922	76	0,89	76	0,94
77	0,924	77	0,89	77	0,94
78	0,926	78	0,89	78	0,94
79	0,928	79	0,89	79	0,94
80	0,93	80	0,89	80	0,94
81	0,931	81	0,89	81	0,94
82	0,932	82	0,89	82	0,94
83	0,933	83	0,89	83	0,94
84	0,934	84	0,89	84	0,94
85	0,935	85	0,89	85	0,94
86	0,936	86	0,89	86	0,94
87	0,937	87	0,89	87	0,94
88	0,938	88	0,89	88	0,94
89	0,939	89	0,89	89	0,94
90	0,94	90	0,89	90	0,94
91	0,939	91	0,89	91	0,939
92	0,938	92	0,89	92	0,938
93	0,937	93	0,89	93	0,937
94	0,936	94	0,89	94	0,936
95	0,935	95	0,89	95	0,935
96	0,934	96	0,89	96	0,934
97	0,933	97	0,89	97	0,933
98	0,932	98	0,89	98	0,932
99	0,931	99	0,89	99	0,931
100	0,93	100	0,89	100	0,93

Φύλλο υπολογισμών (στρόβιλος με μεταβλητό συντελεστή απόδοσης)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	H	260		$I (kW) = 9.81 * Q (m^3/s) * H (m) * \eta$				Καμπύλη στροβίλου			
2	ρ	1000							Francis $n_s=100$		
3	g	9,81							Q/Qmax	η	
4	η	0,96	ΣΑ Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού						0		
5									1		
6	1. Υπολογίζεται η ενέργεια με βάση το συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στη συνέχεια θα διορθωθεί με βάση το συντελεστή στροβίλων που προκύπτει κάθε ημέρα από τις καμπύλες			2. Υπολογίζεται το ποσοστό της ημερήσιας προς την μέγιστη παροχή στροβίλου			3. Με βάση το ποσοστό της ημερήσιας προς τη μέγιστη παροχή στροβίλου εντοπίζεται στην καμπύλη ο αντίστοιχος συντελεστής απόδοσης			2	
7									3		
8									4		
9									5		
10									6		
11									7		
12									8		
13									9		
14	$=IF(AND(\$B99>F\$18; \$B99<F\$17); \$B\$1 * \$B\$3 * \$B\$4 * \$B99 * 24; IF(\$B99>F\$17; \$B\$1 * \$B\$3 * \$B\$4 * F\$17 * 24; 0))$								10	0,3	
15									11	0,33	
16									12	0,36	
17	Ελάχιστη, μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (m3/s)			Qmax (m3/s)	3,00				13	0,39	
18				Qmin (m3/s)	0,30				14	0,42	
19	Ισχύς στη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης			Imax (MW)	7,3				15	0,45	
20	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος			PT (%)	53,4				16	0,48	
21	Ποσοστό όγκου νερού που χρησιμοποιείται			PV (%)	87,3				17	0,51	
22	Συνολική ενέργεια			E (GWh)	128,5				18	0,54	
23				E (GWh/y)	12,9				19	0,57	
24				ΣΑ	0,20				20	0,6	
25									21	0,617	
26		m3/s	m3/day	kWh/d	Q/Qmx	ΣΑ	kWh/d		22	0,634	
99	12/12/1971	0,620	53561,1	36430,1	20	0,60	21858,1		95	0,935	
100	13/12/1971	0,708	61146,6	41589,5	23	0,65	27074,7		96	0,934	
101	14/12/1971	0,794	68626,7	46677,1	26	0,70	32767,4		97	0,933	
102	15/12/1971	0,860	74315,8	50546,6	28	0,74	37202,3		98	0,932	

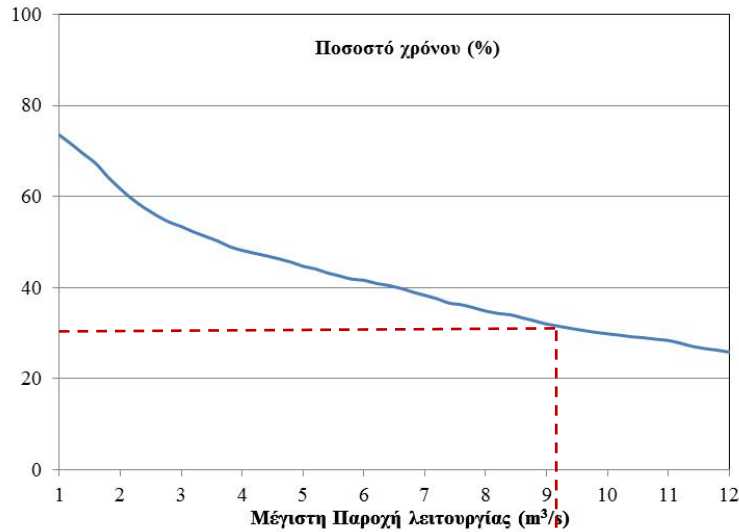
ΠΡΟΣΟΧΗ: Ο υπολογισμός του ποσοστού όγκου νερού που χρησιμοποιείται αλλάζει. Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης των στροβίλων ως το πηλίκο της τελικής ενέργειας προς την αρχική ενέργεια που υπολογίστηκε με βάση το συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού

$$\frac{\text{SUM}(H27:H3679)}{\text{SUM}(E27:E3679)}$$

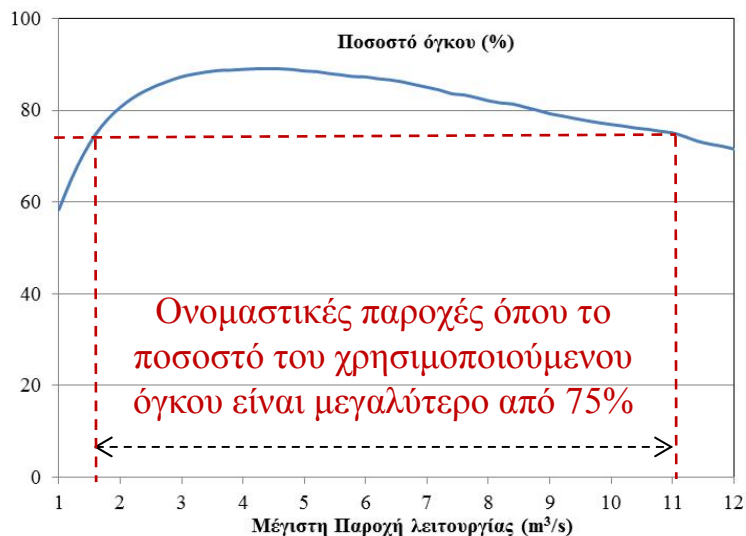
Η νέα σχέση ενσωματώνει το συντελεστή στροβίλου

$$= (\text{SUM}(H27:H3679) * 3600 / (\$B\$1 * \$B\$3 * \$B\$4 * \text{SUM}(H27:H3679)) / (\$C\$12 * 1000000) * 100$$

Αποτελέσματα (στρόβιλος με μεταβλητό συντελεστή απόδοσης)

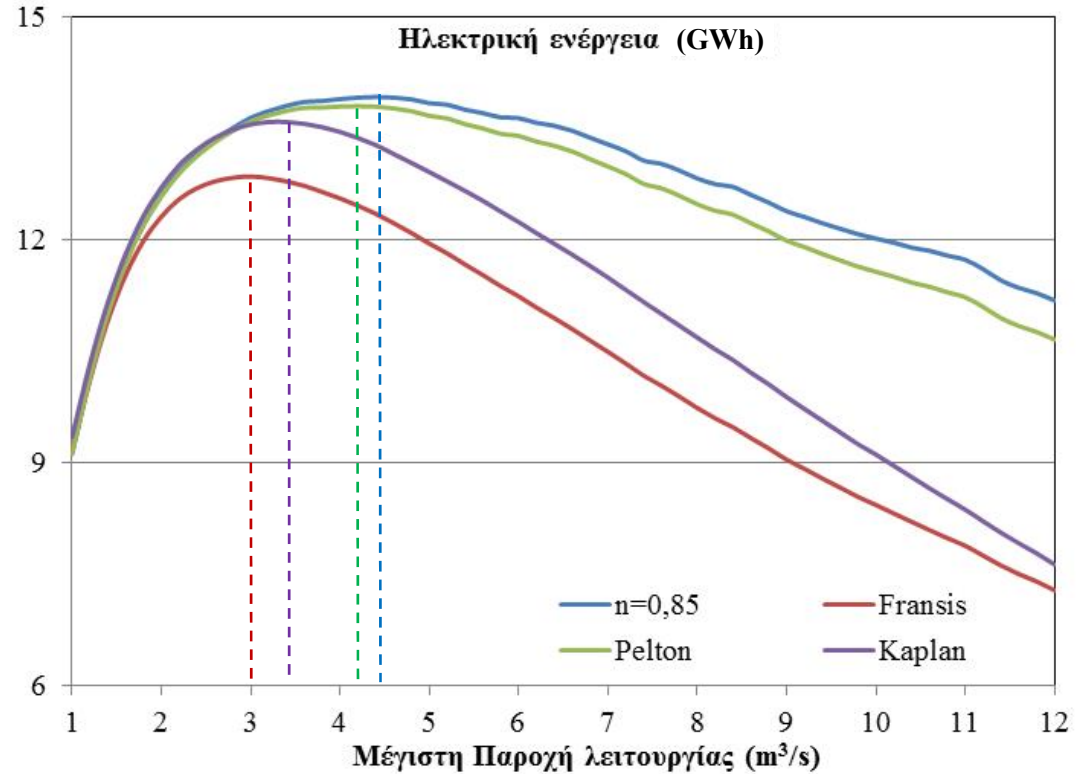


Ονομαστικές παροχές όπου το ποσοστό χρόνου είναι μεγαλύτερο από 30%



Ονομαστικές παροχές όπου το ποσοστό του χρησιμοποιούμενου όγκου είναι μεγαλύτερο από 75%

Καμπύλες παραγωγής ενέργειας για μέγιστη (ονομαστική) παροχή 1-12 m³/s



Σταθερός συντελεστής

$Q_{max} = 4.4 \text{ m}^3/\text{s} \quad E = 13.9 \text{ GWh}$

Pelton

$Q_{max} = 4.2 \text{ m}^3/\text{s} \quad E = 13.8 \text{ GWh}$

~~Kaplan~~

$Q_{max} = 3.4 \text{ m}^3/\text{s} \quad E = 13.6 \text{ GWh}$

Francis

$Q_{max} = 3.0 \text{ m}^3/\text{s} \quad E = 12.8 \text{ GWh}$

Διερεύνηση με δύο στρόβιλους

Γίνεται η παραδοχή ότι μπαίνει σε λειτουργία ο πρώτος στρόβιλος, και αν η παροχή είναι εκτός των ορίων λειτουργίας του, χρησιμοποιείται ο δεύτερος στρόβιλος (μόνος του ή συμπληρωματικά)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	H	260																
2	ρ	1000					Καμπύλη 1		Καμπύλη 2									
3	ξ	9,81					Q/Qmax	n	Q/Qmax	n								
4	n	0,96	ΣΑ Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού				0		0									
5							1		1									
6	Για 10 έτη	m3/s					2		2									
7	ΜΕΓΙΣΤΟ	12,1					3		3									
8	ΕΛΑΧΙΣΤΟ	0					4		4									
9	ΜΕΣΟ	0,822					5		5									
10							6		6									
11			hm3				7		7			Σύνολο						
12	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	259,5		229,2	30,3	19,9	8		8			Qmax (m3/s)	3,80					
13	Σύνολο ημερών	3653					9		9			Qmin (m3/s)	0,04					
14							10	0,3	10	0,3		E (GWh/y)	13,9					
15	Μέσο ετήσιο	25,9					11	0,33	11	0,33								
16			Στρόβιλος 1		Στρόβιλος 2		12	0,36	12	0,36		Στρόβιλος 1		Στρόβιλος 2				
17			Qmax (m3/s)	3,40	0,40		13	0,39	13	0,39		Qmax (m3/s)	3,40	0,40				
18			Qmin (m3/s)	0,34	0,04		14	0,42	14	0,42		Qmin (m3/s)	0,34	0,04				
19							15	0,45	15	0,45		E (GWh)	12,8				1,1	
20							16	0,48	16	0,48								
21							17	0,51	17	0,51								
22							18	0,54	18	0,54								
23							19	0,57	19	0,57								
24							20	0,6	20	0,6								
25							21	0,617	21	0,617								
26		m3/s	Παροχές Σ1	Υπόλοιπο	Παροχές Σ2		22	0,634	22	0,634		kWh/d	Q/Qmx	ΣΑ	kWh/d		kWh/d	Q/Qmx
27	1/10/1971	0,094	0,000	0,094	0,094		23	0,651	23	0,651		0,0	1	0,00	0,0		5545,8	23
28	2/10/1971	0,094	0,000	0,094	0,094		24	0,668	24	0,668		0,0	1	0,00	0,0		5545,8	23
29	3/10/1971	0,094	0,000	0,094	0,094		25	0,685	25	0,685		0,0	1	0,00	0,0		5545,8	23

=B27-D27

=\$B\$1*\$B\$3*\$B\$4*\$D27*24

Διαχωρισμός της παροχής στους δύο στρόβιλους

=IF(AND(\$E27>F\$18;\$E27<F\$17);\$E27;IF(\$E27>F\$17;F\$17;0))

=IF(AND(\$B27>D\$18;\$B27<D\$17);\$B27;IF(\$B27>D\$17;D\$17;0))

=\$B\$1*\$B\$3*\$B\$4*\$F27*24

Διερεύνηση με δύο στρόβιλους

Γίνεται η παραδοχή ότι μπαίνει σε λειτουργία ο πρώτος στρόβιλος, και αν η παροχή είναι εκτός των ορίων λειτουργίας του, χρησιμοποιείται ο δεύτερος στρόβιλος (μόνος του ή συμπληρωματικά)

2 Pelton

Q_{\max} (m ³ /s)	4,2	4,2	4,2	4,2				
E (GWh)	13,8	14,6	14,9	15,1				
		$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	
$Q_{1,2\max}$ (m ³ /s)		2,1	2,1	3,0	1,2	3,8	0,4	
$E_{1,2}$ (GWh)		12,7	1,8	13,6	1,3	13,8	1,3	

2 Francis

Q_{\max} (m ³ /s)	3,0	3,0	3,0	3,0				
E (GWh)	12,9	14,2	14,0	13,9				
		$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	
$Q_{1,2\max}$ (m ³ /s)		1,5	1,5	2,0	1,0	2,7	0,3	
$E_{1,2}$ (GWh)		11,2	3,0	12,3	1,7	12,8	1,0	

Συνδυασμός Pelton-Francis

Q_{\max} (m ³ /s)	3,0		3,0		3,0		3,0		3,0		3,0	
E (GWh)	14,3		14,1		14,2		14,1		14,4		14,0	
	Pelton	Francis	Francis	Pelton	Pelton	Francis	Francis	Pelton	Pelton	Francis	Francis	Pelton
$Q_{1,2\max}$ (m ³ /s)	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	1,0	2,0	1,0	2,5	0,5	2,5	0,5
$E_{1,2}$ (GWh)	11,4	3,0	11,2	2,9	12,6	1,7	12,3	1,7	13,2	1,1	12,7	1,2