

Μέθοδος Βελτιστοποίησης μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων

του Δ. Παπαντώνη*

1. Εισαγωγή

Ένα Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ) χαρακτηρίζεται διεθνώς ως μικρό, όταν η ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς του είναι μικρότερη των 10 MW. Η έννοια του «μικρού» δεν είναι απλά θέμα κλίμακας, δηλ. το μικρό ΥΗΕ δεν είναι μικρογραφία ενός μεγάλου: το μικρό ΥΗΕ διαφέρει από ένα μεγάλο σε ένα πλήθος χαρακτηριστικών, έτσι ώστε να το καθιστούν απλό στην κατασκευή και τη λειτουργία του. Η βασική διαφορά μεταξύ μεγάλου και μικρού, είναι ο σκοπός του έργου: τα μεγάλα ΥΗΕ κατασκευάζονται ώστε να καλύπτουν τις αιχμές του διασυνδεδεμένου δικτύου, και για το λόγο αυτό η λειτουργία τους συνδυάζεται με την κατασκευή μεγάλου φράγματος και μεγάλου ταμιευτήρα, που επιτρέπουν την εγκατάσταση μεγάλης ονομαστικής ισχύος, μεγαλύτερης από αυτή με την οποία είναι δυνατή η παραγωγή ετησίως της ίδιας ποσότητας ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνονται μικρές τιμές του συντελεστού φορτίου του έργου και σημαντική επιβάρυνση του κόστους που όμως υπερκαλύπτεται από την λογιστική αξία της ενέργειας σε ώρες αιχμής. Αντίθετα, στα μικρά ΥΗΕ, η ισχύς των οποίων αποτελεί ελάχιστο ποσοστό των αιχμών του δικτύου, επιδιώκεται η πλέον ορθολογική και απλή διαμόρφωση, δηλ. να λειτουργούν ουσιαστικά χωρίς ταμιευτήρα, αξιοποιώντας κάθε φορά τη διαθέσιμη παροχή.

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες εκτιμήσεις, υπάρχει σημαντικό περιθώριο για ανάπτυξη των μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων στην Ελλάδα, από τα οποία εκτιμάται ότι είναι δυνατή η παραγωγή ενέργειας, τουλάχιστον ίσης με αυτή που παράγεται σήμερα από τα εγκατεστημένα μεγάλα ΥΗΕ της ΔΕΗ. Η ανάπτυξη των μικρών ΥΗΕ έχει καθυστερήσει σημαντικά, και η σύγκριση με την αντίστοιχη ανάπτυξη σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες είναι συντριπτική. Οι λόγοι για την σημαντική αυτή καθυστέρηση οφείλονται κύρια στο ισχύον νομικό πλαίσιο και στην ισχύουσα τιμή αγοράς της κιλοβατώρας από την ΔΕΗ. Με την αισιοδοξία ότι σύντομα θα υπάρξει βελτίωση στον τομέα αυτό, στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση του μεγέθους και του πλήθους των υδροστροβίλων μέσω των οποίων θα υπάρξει η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση μίας δεδομένης μικρής υδατόπτωσης. Η μεθοδολογία αυτή, αποτελεί το σημαντικότερο μέρος της προμελέτης ενός υπό εξέταση μικρού ΥΗΕ, και για την εφαρμογή της απαιτείται η γνώση των υδρολογικών στοιχείων, τουλάχιστον για μία σειρά ετών, καθώς και η αναγνώριση της περιοχής, δηλ. μία αποτύπωση-χάραξη της διάταξης του μικρού ΥΗΕ. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι προφανής η διάταξη του έργου, δηλ. η θέση της υδροληψίας, η διαδρο-

μή του καταθλιπτικού αγωγού, η θέση του Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΥΗΣ) κλπ., ενώ σε άλλες στις οποίες υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές λύσεις, είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης για κάθε μία χωριστά και η επιλογή της διάταξης που αντιστοιχεί στα καλύτερα αποτελέσματα. Η εξέταση διάφορων εναλλακτικών λύσεων με την εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύσσεται, είναι εύκολη δεδομένου ότι το αντίστοιχο λογισμικό δίνει πολύ γρήγορα αποτελέσματα σε προσωπικό υπολογιστή, π.χ. σε PC της σειράς 386.

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη συνέχεια, αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του ΕΜΠ και βασίστηκε αποκλειστικά σε δεδομένα και στοιχεία της βιβλιογραφίας, κύρια όσον αφορά την εκτίμηση του κόστους του έργου. Ήδη αναπτύσσεται συνεργασία με την ΔΑΥΕ (Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων) της ΔΕΗ, ώστε να ληφθεί υπόψη η εμπειρία της σχετικά με τη διαμόρφωση του κόστους ενός μικρού ΥΗΕ στην Ελλάδα, και ελπίζεται ότι θα αποτελέσει ένα εργαλείο χρήσιμο, τόσο για την αξιολόγηση θέσεων στις οποίες υπάρχουν ενδείξεις για ενδιαφέρουσα υδροηλεκτρική αξιοποίηση με μικρό ΥΗΕ, όσο και για τη σωστή τους διαστασιολόγηση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διάφορα βήματα της μεθοδολογίας και

(*) Ο Δ. Παπαντώνης είναι αναπλ. καθ. στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

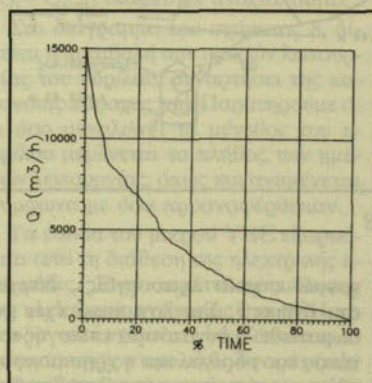
ΕΤΟΣ	ΣΕΠΤ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕ.	ΔΕΚ.	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.
1971 - 72	230.0	178.0	178.0	369.0	461.0	1210.0	1867.0	2900.0	2918.0	953.0	631.0	295.0
1972 - 73	171.0	315.0	752.0	646.0	1555.0	2413.0	2207.0	1862.0	1109.0	775.0	490.0	258.0
1973 - 74	215.0	148.0	175.0	462.0	1060.0	1340.0	1160.0	925.0	690.0	485.0	312.0	132.0
1974 - 75	80.0	38.0	89.0	620.0	1240.0	1630.0	1764.0	1250.0	609.0	360.0	200.0	123.0
1975 - 76	78.0	40.0	44.0	339.0	1640.0	2265.0	1995.0	1875.0	1500.0	825.0	510.0	310.0
1976 - 77	206.0	159.0	453.0	2040.0	1290.0	743.0	777.0	816.0	540.0	310.0	175.0	85.0
1977 - 78	180.0	225.0	588.0	1815.0	3596.0	4204.0	3650.0	3013.0	2200.0	1417.0	945.0	700.0
1978 - 79	438.0	445.0	1015.0	2009.0	2366.0	2359.0	1879.0	1119.0	844.0	1070.0	521.0	330.0
1979 - 80	205.0	260.0	3869.0	4140.0	3120.0	2360.0	2958.0	2210.0	1294.0	1064.0	705.0	410.0
1980 - 81	330.0	300.0	170.0	143.0	770.0	3410.0	2040.0	2060.0	1790.0	982.0	720.0	602.0
1981 - 82	240.0	220.0	210.0	443.0	1389.0	2790.0	3717.0	3009.0	1923.0	1160.0	790.0	490.0
1982 - 83	329.0	236.0	540.0	1060.0	1684.0	2388.0	2904.0	2374.0	1143.0	604.0	398.0	263.0
1983 - 84	175.0	136.0	597.0	1602.0	2310.0	2607.0	1643.0	1088.0	701.0	444.0	307.0	233.0
1984 - 85	170.0	116.0	1949.0	2296.0	4181.0	4216.0	3438.0	2501.0	1426.0	889.0	688.0	507.0
1985 - 86	349.0	356.0	322.0	331.0	1094.0	1158.0	945.0	756.0	439.0	234.0	158.0	118.0
1986 - 87	86.0	208.0	248.0	1180.0	2226.0	1726.0	1909.0	1687.0	2319.0	1699.0	844.0	538.0
1987 - 88	153.0	165.0	995.0	1166.0	768.0	2222.0	3211.0	1938.0	1296.0	684.0	496.0	240.0
1988 - 89	122.0	170.0	414.0	1166.0	898.0	1934.0	2136.0	2033.0	909.0	428.0	306.0	205.0
1989 - 90	8.0	94.0	105.0	279.0	154.0	1257.0	396.0	185.0	111.0	54.0	42.0	23.0
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	202.0	200.0	681.0	1113.0	1668.0	2222.0	2136.0	1768.0	1250.0	760.0	486.0	308.0

γίνεται εφαρμογή σε μία συγκεκριμένη περίπτωση, έτσι ώστε να γίνει περισσότερο σαφής. Πρόκειται για την περίπτωση αξιοποίησης της παροχής των πηγών Μεσολών στην περιοχή Χανίων Κρήτης. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει τις ακόλουθες ιδιομορφίες, που όμως δεν επηρεάζουν την γενικότητα της μεθοδολογίας: ο καταθλιπτικός αγωγός, χαλύβδινος ον. διαμέτρου 1000 mm, έχει ήδη κατασκευασθεί στα πλαίσια αρδευτικού έργου. Οι ανάγκες άρδευσης εξυπηρετούνται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, από Απρίλιο έως και Οκτώβριο, και άρα εξετάζεται η δυνατότητα υδροηλεκτρικής αξιοποίησης των παροχών κατά τη χειμερινή περίοδο μόνο, δηλ. από Νοέμβριο έως και Μάρτιο. Μία άλλη ιδιομορφία είναι ότι κατά τη χειμερινή περίοδο γαμίζουν δύο ταμειυτήρες (με βαρύτητα), έτσι ώστε κατά την περίοδο άρδευσης να υπάρχει αποθηκευμένη μία ποσότητα νερού, της τάξεως των $13,8 \cdot 10^6$ κυβικών μέτρων, οπότε για υδροηλεκτρική αξιοποίηση διατίθεται η ποσότητα της παροχής, αφού εξασφαλισθεί η πλήρωση των ταμειυτήρων.

2. Υδρολογικά στοιχεία

Τα υδρολογικά στοιχεία διατίθενται συνήθως υπό μορφή μέσων μηνιαίων παροχών για μια σειρά ετών, συνήθως

των 20 τελευταίων ετών. Η ύπαρξη μέσων ημερήσιων παροχών ενός ποταμού ή πηγών, είναι σπάνια για τους μικρούς ποταμούς και μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις, στις οποίες υπήρχε ενδιαφέρον από την ΔΕΗ, έχουν γίνει ημερήσιες μετρήσεις. Η μέτρηση των μέσων μηνιαίων παροχών έχει γίνει τις περισσότερες φορές από υπηρεσίες του Υπουργείου Γεωργίας, με απώτερο σκοπό την αξιοποίηση των παροχών για αρδευτικούς σκοπούς, δηλ. μία λειτουργία που πολλές φορές είναι δυνατόν να συνδυασθεί με την ηδροηλεκτρική αξιοποίηση των υδάτων.



Σχ. 1: Καμπύλη διάρκειας της παροχής.

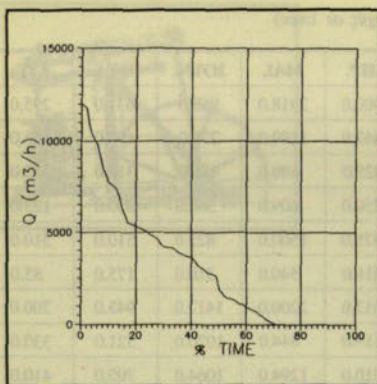
Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται βασίζεται στην αξιοποίηση της καμπύλης διάρκειας της παροχής, αφού προηγουμένως γίνει μια στατιστική ανάλυση με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση των μετρήσεων. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται μέθοδος αυτοαναδρομικότητας, κινητού μέσου όρου 1ης τάξεως για την παραγωγή συνθετικής σειράς περισσότερων ετών.

Στον πίνακα που ακολουθεί, δίνονται μετρημένες μέσες μηνιαίες παροχές των πηγών Μεσολών, για τα έτη από 1971 έως και το 1990, ενώ στην τελευταία σειρά, οι αντίστοιχες παροχές που προκύπτουν από τη μαθηματική προσομοίωση.

Στο σχήμα 1 δίνεται η καμπύλη διάρκειας της παροχής των πηγών Μεσολών για τη χειμερινή περίοδο, ενώ στο σχήμα 2 η καμπύλη διάρκειας της παροχής της χειμερινής περιόδου, αφού αφαιρεθεί η παροχή που είναι απαραίτητη για την πλήρωση των ταμειυτήρων.

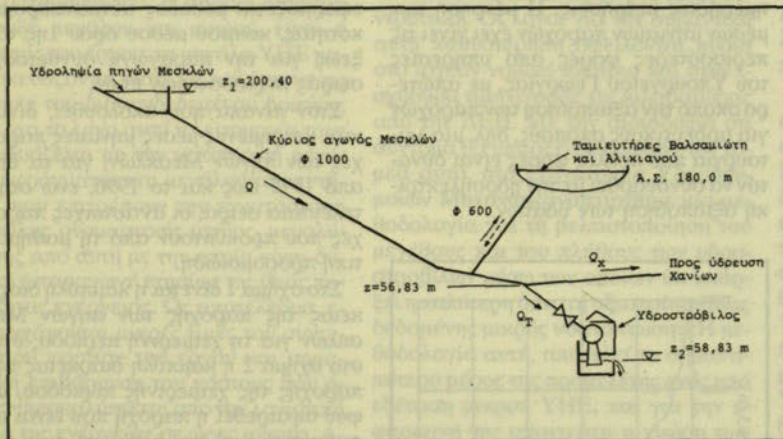
3. Διαθέσιμη υδραυλική πτώση και επιλογή του τύπου του υδροτροβίλου

Η βέλτιστη θέση εγκατάστασης του μικρού ΥΗΕ προσδιορίζεται πλησίον της Κοινότητας Φουρνέ του Νομού Χανίων, κατά μήκος της διαδρομής του



Σχ. 2: Καμπύλη διάρκειας της παροχής κατά τη χειμερινή περίοδο μετά την απομάστευση για την πλήρωση των ταμειντέρων άρδευσης.

αγωγού και στο σημείο της χαμηλότερης στάθμης. Το άλλο πλεονέκτημα της θέσης αυτής, εκτός από την επίτευξη μεγάλης υδραυλικής πτώσης, είναι ότι γειτνιάζει με την κοίτη του χειμάρρου Κερίτη, οπότε απλοποιούνται τα έργα απαγωγής των υδάτων από τον μικρό ΥΗΕ, ενώ προσεγγίζεται από υπόρχουσα αγροτική οδό. Στο σχήμα 3 δίνεται σχηματικά η διάταξη του έργου: η στάθμη της υδροληψίας είναι στα $z_1 = 200,40$ m η στάθμη του νερού στην απαγωγή του μικρού ΥΗΕ στα $z_2 = 58,8$ m ενώ το συνολικό μήκος του αγωγού, ον. διαμέτρου 1000 mm, είναι από την υδροληψία μέχρι την προτεινόμενη θέση ίση προς 7.512 m.



Σχ. 3: Σχηματική διάταξη του μικρού ΥΗΕ

Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι ίση προς

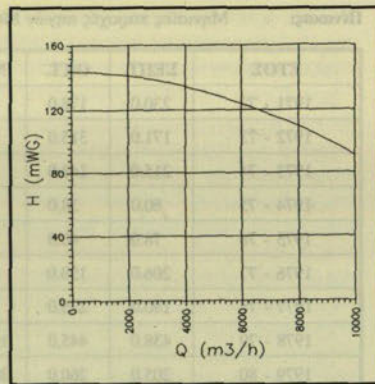
$$H = (z_1 - z_2) - \delta h_f$$

όπου με δh_f συμβολίζονται οι γραμμικές και εντοπισμένες υδραυλικές απώ-

λειες του αγωγού. Για τον υπολογισμό του συντελεστού λ των γραμμικών απωλειών, εφαρμόζεται η σχέση των Prandtl-Colebrook, η οποία απαιτεί την εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας, επειδή δίνεται σε πεπλεγμένη μορφή. Οι εντοπισμένες αντιστάσεις, πρόκειται για βάννες και καμπύλες, υπολογίζονται από πίνακες αφού γίνει η καταγραφή τους για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Στο λογισμικό είναι δυνατό ο υπολογισμός και στην περίπτωση που ο αγωγός είναι περισσότερο σύνθετος, αποτελείται δηλ. από τμήματα διαφόρων διαμέτρων ή φέρει διακλαδώσεις.

Στο σχήμα 4 δίνεται η καμπύλη της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H ως συνάρτηση της διακινούμενης από τον αγωγό παροχής. Παρατηρούμε ότι για την εξεταζόμενη περίπτωση, είναι της τάξεως των 120 mΣΥ.

Για αυτής της τάξεως την υδραυλική πτώση, από διαγράμματα της βιβλιογραφίας για την επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, προκύπτει ως πλέον κατάλληλος ο τύπος Francis. Για υδροστροβίλους Francis, όταν η μεταβολή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης είναι μικρή, όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση στην οποία η στάθμη της υδροληψίας είναι ουσιαστικά σταθερή, η μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης η_T του υδρ/λου συναρτήσει της παροχής Q , αδιαστατοποιημένα ως προς τα αντίστοιχα μεγέθη της ονομαστικής λειτουργίας (δείκτης γ για το κα-



Σχ. 4: Μεταβολή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης συναρτήσει της διακινούμενης παροχής.

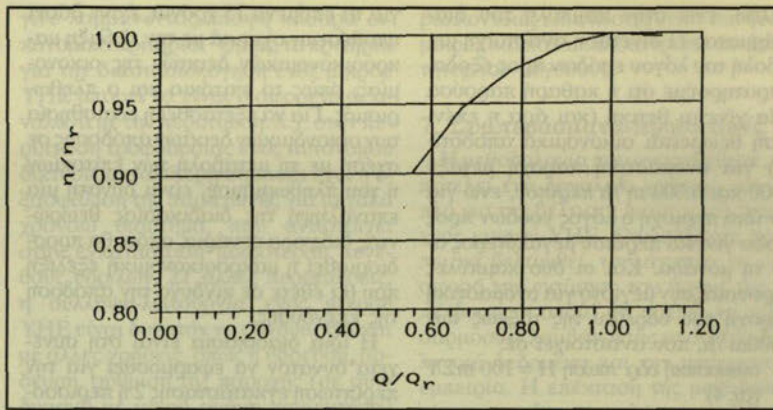
Η ισχύς N_T του υδροστροβίλου στο κανονικό σημείο λειτουργίας του, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_r = \gamma \cdot H \cdot Q_r \cdot \eta_r$$

στην οποία με γ συμβολίζεται το ειδικό βάρος του νερού, με Q_r η παροχή στο κανονικό σημείο του υδρ/λου, με η_r η τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης του υδρ/λου στο κανονικό σημείο λειτουργίας του, η οποία λαμβάνεται ως συνάρτηση του τύπου και του μεγέθους του υδρ/λου, ενώ με H συμβολίζεται η τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, που παριστάνεται ως συνάρτηση της παροχής Q , στο διάγραμμα του σχήματος 4. Για την εξεταζόμενη περίπτωση η μεταβολή της ονομαστικής ισχύος του υδρ/λου N_T συναρτήσει της ονομαστικής παροχής του Q_r , δίνεται στην καμπύλη του σχήματος 6.

4. Υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και των εσόδων

Για κάθε τιμή της παροχής Q_r στο κανονικό σημείο του υδροστροβίλου, που είναι ενδεικτική του μεγέθους του υδροστροβίλου και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη παροχή Q_{max} και Q_{min} που είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί από τον υδροστροβίλο. Για παροχή Q μεγαλύτερη από την Q_{max} αξιοποιείται η παροχή Q_{max} και η διαφορά $(Q - Q_{max})$ παραμένει αναξιοποίητη ενώ για $Q < Q_{min}$ ο υδροστροβίλος δεν λειτουργεί λόγω ασταθούς λειτουργίας. Στη συνέχεια γίνεται σύρση όλων των τιμών Q_i των παροχών της καμπύλης διάρκειας της παροχής (καμπύλη 2) από την οποία προκύπτει η αντίστοιχη διάρκεια δT_i (σε ώρες)

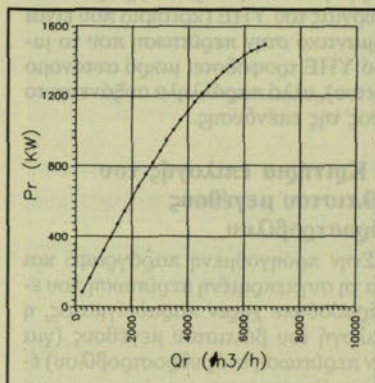


Σχ. 5: Μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδρ/λου Francis συναρτήσει του φορτίου Q/Q_r

και υπολογίζεται η αντίστοιχη ισχύς λειτουργίας του υδρ/λου από τη σχέση:

$$P_i = \gamma \cdot H \cdot Q_T \cdot \eta_T$$

στην οποία το H προκύπτει από την καμπύλη του σχήματος 4, συναρτήσει της διακινούμενης παροχής, Q_T η πα-



Σχ. 6: Μεταβολή της ονομαστικής ισχύος του υδρ/λου Francis συναρτήσει της ονομαστικής παροχής του Q_r

ροχή που αξιοποιείται από τον υδρ/λο ($Q_T = Q_i$ για $Q_{min} < Q_i < Q_{max}$, ενώ τίθεται $Q_T = 0$ για $Q_i < Q_{min}$ και $Q_T = Q_{max}$ για $Q_i > Q_{max}$) και η_T ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροτροβίλου, όπως προκύπτει από την καμπύλη του διαγράμματος 5. Η αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση προς:

$$E_i = P_i \cdot \delta T_i \cdot \eta_e$$

στην οποία με η_e συμβολίζεται ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, κύρια της ηλεκτρογεννήτριας. Η ηλεκτρική ενέργεια E που παράγεται κατά τη διάρκεια ενός έτους,

προκύπτει ως το άθροισμα των E_i για τη διάρκεια ενός έτους, ή για τη χειμερινή περίοδο στην εξεταζόμενη περίπτωση, δηλ.

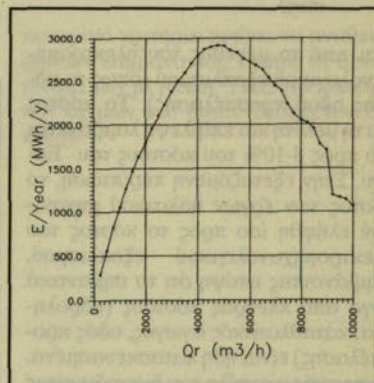
$$E = \Sigma (E_i)$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 7, δίνεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει της κανονικής παροχής Q_r του υδρ/λου, δηλ. συναρτήσει του μεγέθους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Από την καμπύλη του διαγράμματος 7 παρατηρείται ότι η καμπύλη έχει μία περιοχή όπου παρουσιάζεται σαφές μέγιστο που αντιστοιχεί σε κανονική παροχή του υδρ/λου της τάξεως των 5.000 m^3/h . Για υδρ/λο μεγαλύτερου μεγέθους, η παραγόμενη ενέργεια μειώνεται λόγω του ότι επί σημαντικό διάστημα, η διαθέσιμη παροχή Q_i είναι μικρότερη της ελάχιστης Q_{min} , ενώ για μικρότερου μεγέθους υδρ/λο, είναι σημαντικά τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία η παροχή Q_i είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη Q_{max} , οπότε μεγάλο μέρος της παροχής ($Q_i - Q_{max}$) διαφεύγει αναξιοποίητο.

Στο διάγραμμα του σχήματος 8, δίνεται η μεταβολή των ημερών λειτουργίας του υδρ/λου, συναρτήσει της κανονικής παροχής του. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος του υδρ/λου μειώνεται το πλήθος των ημερών λειτουργίας, όπως και αναμένεται σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν.

Τα έσοδα του μικρού ΥΗΕ εξαρτώνται από τη διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ, τα έσοδα υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη το ισχύον τιμολόγιο αγοράς (που καθορίζεται ανά τετράμηνο για κάθε περιοχή και το οποίο για την Κρήτη είναι της τάξεως των 8 $\Delta\rho\epsilon/KWH$ για

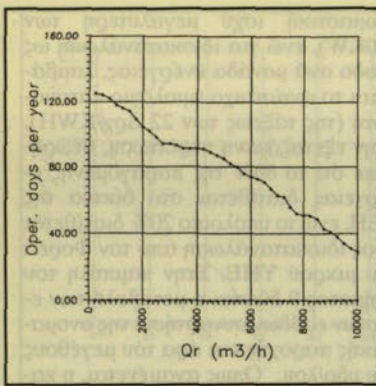
ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη των 100KW), ενώ για ιδιοκατανάλωση ως έσοδο ανά μονάδα ενέργειας, λαμβάνεται το αντίστοιχο τιμολόγιο καταναλωτή (της τάξεως των 22 $\Delta\rho\epsilon/KWH$). Στην εξεταζόμενη περίπτωση, θεωρήθηκε ότι το 80% της παραγόμενης ενέργειας διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ, ενώ το υπόλοιπο 20% διατίθεται προς ιδιοκατανάλωση από τον Φορέα του μικρού ΥΗΕ. Στην καμπύλη του σχήματος 9 δίνεται η μεταβολή των ετησίων εσόδων συναρτήσει της ονομαστικής παροχής και άρα του μεγέθους του υδρ/λου. Όπως αναμένεται, η καμπύλη αυτή έχει μορφή αντίστοιχη προς την καμπύλη μεταβολής της παραγόμενης ενέργειας που δίνεται στο σχήμα 7.



Σχ. 7: Ετησίως παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει της κανονικής παροχής και άρα του μεγέθους του υδρ/λου

5. Υπολογισμός κόστους του Έργου και οικονομικών δεικτών απόδοσης. Επιλογή του βέλτιστου μεγέθους.

Το κόστος του Έργου, δηλ. το ύψος της αντίστοιχης επένδυσης, συνίσταται από διάφορα κόστη που κατατάσσονται σε 3 κύριες κατηγορίες: το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού και το κόστος μελέτης-επίβλεψης. Το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (για προμήθεια και εγκατάσταση) λαμβάνεται από συστάσεις της βιβλιογραφίας, στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η ονομαστική ισχύς P_r του εξοπλισμού, η διαθέσιμη υδραυλική πίεση H και οι τοπικές συνθήκες του έργου μέσω ενός συντελεστή. Το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού, είτε λαμβάνεται ως ποσοστό του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού, είτε γίνεται προεκτίμηση του κόστους των έργων που δεν εξαρτώ-



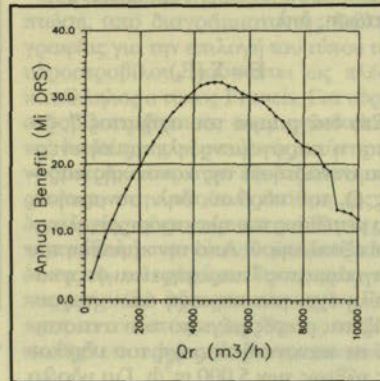
Σχ. 8: Μεταβολή του πλήθους των ημερών λειτουργίας του ΥΗΕ συναρτήσει της κανονικής παροχής και άρα του μεγέθους του υδρ/λου (ετησίως)

νται από το μέγεθος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (όπως το κόστος οδού προσπέλασης). Το κόστος για τη μελέτη και επίβλεψη λαμβάνεται ίσο προς 8-10% του κόστους του Έργου. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού ελήφθη ίσο προς το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα σημαντικά έργα από πλευράς κόστους (υδροληψία, καταθλιπτικός αγωγός, οδός προσπέλασης) είναι ήδη κατασκευασμένα. Η συνεχής καμπύλη του διαγράμματος στο σχήμα 10, δίνει τη μεταβολή του ύψους της επένδυσης συναρτήσει της ονομαστικής παροχής και άρα του μεγέθους του υδροστροβίλου.

Στη συνέχεια, είναι δυνατή η εξέταση της οικονομικής απόδοσης του Έργου εξετάζοντας ως δείκτες την καθαρή παρούσα αξία (NPV) ή το λόγο εσόδων προς έξοδα (Benefit to Cost Ratio). Για το σκοπό αυτό, εξετάζεται μία περίοδος διαχείρισης της τάξεως των 15 ετών και λαμβάνονται υπόψη τα ετήσια έσοδα του Έργου για μισθούς (ενός τεχνίτη), συντήρηση, ασφάλιση του εξοπλισμού και τοκοχρεωλύσιο για την εξυπηρέτηση του δανείου για την πραγματοποίηση της επένδυσης. Στην εξεταζόμενη περίπτωση το τοκοχρεωλύσιο υπολογίστηκε με μέσο ετήσιο τόκο ίσο προς 15%, ενώ ελήφθη υπόψη μία ετήσια αύξηση των εσόδων (λόγω πληθωρισμού) της τάξεως του 10% ανά έτος. Για τους υπολογισμούς ελήφθη επίσης υπόψη ότι η διάρκεια κατασκευής του Έργου είναι ένα έτος. Στη διακεκομμένη καμπύλη του σχήματος 10, δίνεται η μεταβολή της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής και άρα του μεγέθους του υ-

δρ/λου, ενώ στην καμπύλη του διαγράμματος 11 δίνεται η αντίστοιχη μεταβολή του λόγου εσόδων προς έξοδα. Παρατηρούμε ότι η καθαρή παρούσα αξία γίνεται θετική (και άρα η επένδυση θεωρείται οικονομικά αποδοτική) για ονομαστική παροχή μεταξύ 1.000 και 6.000 m³/h περίπου, ενώ για την ίδια περιοχή ο λόγος εσόδων προς έξοδα γίνεται περίπου μεγαλύτερος από τη μονάδα. Και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν μέγιστο για ονομαστική παροχή του υδρ/λου της τάξεως των 3.600m³/h, που αντιστοιχεί σε:

- ονομαστική υδρ. πώση $H = 100$ mSY (σχ. 4)
- ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς $P_r = 870$ KW (σχ. 6)
- ετησίως παραγόμενη ενέργεια $E = 2.550$ MWH (σχ. 7)
- ύψος της επένδυσης $K = 190 \cdot 10^6$ Δρχ. (σχ. 10)



Σχ. 9: Έσοδα του μικρού ΥΗΕ ετησίως (για το πρώτο έτος) συναρτήσει του μεγέθους του υδρ/λου

- ετήσια έσοδα (στον πρώτο χρόνο) $E_0 = 30 \cdot 10^6$ Δρχ. (σχ. 9)

Μετά τον καθορισμό της περιοχής του βέλτιστου μεγέθους, είναι δυνατόν να προχωρήσει η προμελέτη στη διαμόρφωση των έργων πολιτικού μηχανικού και στην εκτίμηση του κόστους τους, καθώς και στην αναζήτηση προσφοράς για την προμήθεια και εγκατάσταση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, οπότε στη συνέχεια εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία με καλύτερα προσαρμοσμένες τιμές για τα διάφορα στοιχεία κόστους.

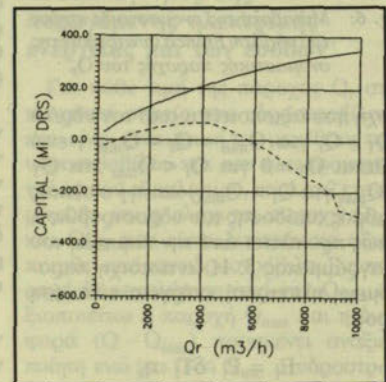
Άρα, σύμφωνα με καθαρά οικονομικά κριτήρια και για την περίπτωση εγκατάστασης ενός υδρ/λου τύπου Francis, προσδιορίζεται το βέλτιστο μέγεθος του υδροστροβίλου και τα αναμενόμενα αποτελέσματα από την εκμετάλλευσή. Η προηγούμενη διαδικασία για τον υπολογισμό των δεικτών οικονομικής απόδοσης της επένδυσης,

για τα επόμενα 15 χρόνια, έγινε βάσει υποθέσεων σχετικά με την εξέλιξη μακροοικονομικών δεικτών της οικονομίας, όπως το επιτόκιο και ο πληθωρισμός. Για να εξετασθεί η ευαισθησία των οικονομικών δεικτών απόδοσης σε σχέση με τη μεταβολή των επιτοκίων ή του πληθωρισμού, είναι δυνατή μία επανάληψη της διαδικασίας θεωρώντας διάφορα σενάρια, οπότε θα προσδιορισθεί η μακροοικονομική εξέλιξη που θα έθετε σε κίνδυνο την απόδοση της επένδυσης.

Η ίδια διαδικασία είναι στη συνέχεια δυνατή να εφαρμοσθεί για την περίπτωση εγκατάστασης 2 ή περισσότερων ταυτόσημων υδροστροβίλων, να προσδιορισθεί για κάθε περίπτωση το βέλτιστο μέγεθος και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εκμετάλλευσής, οπότε στη συνέχεια θα πρέπει να επιλεγεί η λύση (μέγεθος και πλήθος υδροστροβίλων) που αντιστοιχεί στα καλύτερα αποτελέσματα. Είναι προφανές ότι με την εγκατάσταση περισσότερων και φυσικά μικρότερου μεγέθους ταυτόσημων υδροστροβίλων, επιτυγχάνεται αύξηση της παραγόμενης ενέργειας, αύξηση του πλήθους των ημερών λειτουργίας του ΥΗΕ (κριτήριο που είναι σημαντικό στην περίπτωση που το μικρό ΥΗΕ τροφοδοτεί μικρό αυτόνομο δίκτυο), αλλά παράλληλα αυξάνεται το ύψος της επένδυσης.

6. Κριτήρια επιλογής του βέλτιστου μεγέθους υδροστροβίλου

Στην προηγούμενη παράγραφο και για τη συγκεκριμένη περίπτωση που εφαρμόστηκε χάριν παραδείγματος, η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους (για την περίπτωση ενός υδροστροβίλου) έ-



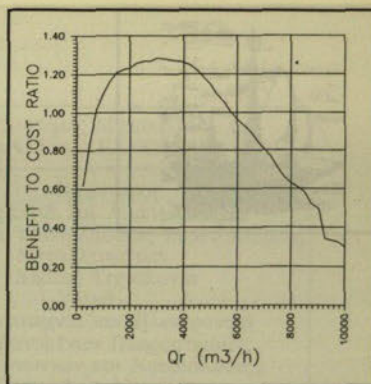
Σχ. 10: Μεταβολή του κόστους του έργου και της καθαρής παρούσας αξίας συναρτήσει του μεγέθους του υδρ/λου

γινε λαμβάνοντας υπόψη καθαρά οικονομικά κριτήρια. Όμως, τα κριτήρια για την διαστασιολόγηση ενός μικρού ΥΗΕ μπορεί να είναι διαφορετικά, ανάλογα με την περίπτωση: π.χ. στην περίπτωση τροφοδοσίας ενός αυτόνομου δικτύου, μεγαλύτερη σημασία έχει η εξασφάλιση της παραγωγής για μεγάλο χρονικό διάστημα, που αντιστοιχεί στην εγκατάσταση μικρότερου μεγέθους υδρ/λων. Σε άλλες περιπτώσεις, η σύλληψη-λειτουργία ενός μικρού ΥΗΕ είναι δυνατόν να συνδυασθεί και με άλλες χρήσεις, όπως η ύδρευση, άρδευση, ρύθμιση της παροχής (σε συνδυασμό με μικρό ανάντι ταμιευτήρα) οπότε τα οικονομικά κριτήρια θα πρέπει να αναθεωρηθούν ριζικά. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να είναι καθοριστικός για την τύχη ενός μικρού ΥΗΕ και ο οποίος δεν μπορεί να αποτιμηθεί με οικονομικούς δείκτες, είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Όμως, για την περίπτωση των μικρών ΥΗΕ, ισχύος μέχρι 2-3 MW, οι περι-

βαλλοντικές επιπτώσεις είναι συνήθως μικρές και κατά κάποιο τρόπο ανεξάρτητες του μεγέθους.

7. Συμπεράσματα-προοπτικές

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, αποτελεί ένα εργαλείο χρήσιμο και απλό για την βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός μικρού ΥΗΕ. Οποσδήποτε πρέπει να βελτιωθεί, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά την εκτίμηση του ύψους της επένδυσης η οποία θα πρέπει να προσαρμοσθεί λαμβάνοντας υπόψη τα Ελληνικά δεδομένα και την υπάρχουσα εμπειρία. Η επέκταση της μεθοδολογίας για τη διαστασιολόγηση μεγάλων ΥΗΕ, είναι δυνατόν να γίνει εισάγοντας στο λογισμικό τη λειτουργία του ανάντι ταμιευτήρα, οπότε η βελτιστοποίηση θα πρέπει να επεκταθεί και για το μέγεθος και τη θέση του ταμιευτήρα και του φράγματος, καθώς και στα διάφορα σενάρια για τη διαχείριση των υδάτων του ανάντι ταμιευτήρα. Στην περίπτωση των μεγάλων ΥΗΕ, τα οι-



Σχ. 11: Μεταβολή του λόγου εσόδων προς έξοδα συναρτήσει του μεγέθους του υδρ/λου.

κονομικά κριτήρια πρέπει να αναθεωρηθούν λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα των μεγάλων ΥΗΕ για κάλυψη των αιχμών του διασυνδεδεμένου δικτύου.