

Υδραυλική ανοικτών αγωγών

Θέμα, υδραυλικό άλμα και μεταβατικά τμήματα

Δρ Μ. Σπηλιώτη

Αν Καθηγητή

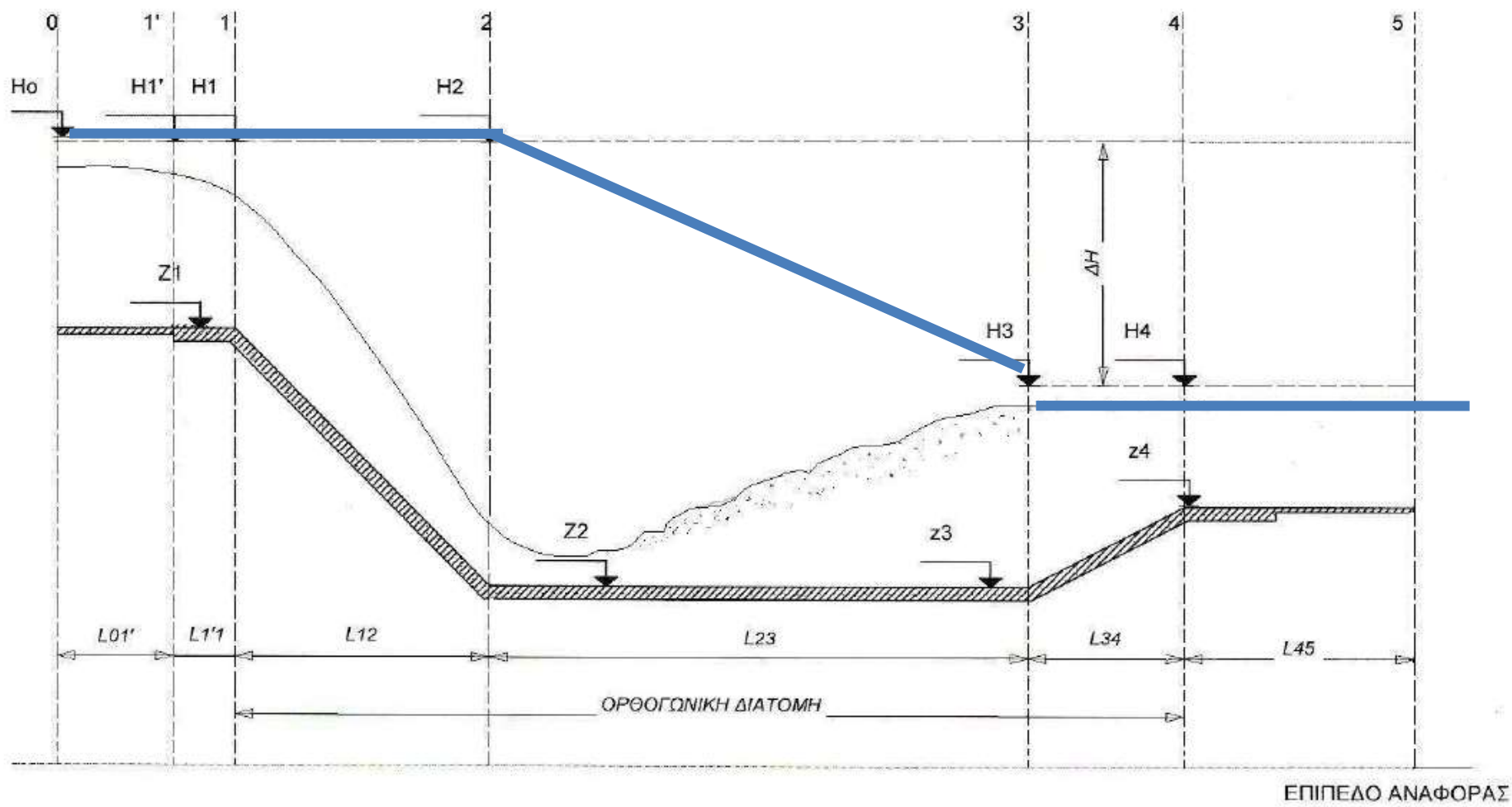
Υδραυλικό άλμα μεταξύ ΓΔ
(ορθογωνική διατομή)

Υδραυλικό άλμα

- Ορθογωνική διατομή
- Καταστροφή ενέργειας και συνακόλουθη λεκάνη καταστροφής
- Άλμα : **από υπερκρίσιμη ροή (μεγάλη κλίση) σε υποκρίσιμη**
- Μεθοδολογικά πρώτα υδραυλική επίλυση και μετά ακριβής προσδιορισμός υψομέτρων εδάφους (προσοχή όμως στις παραδοχές)

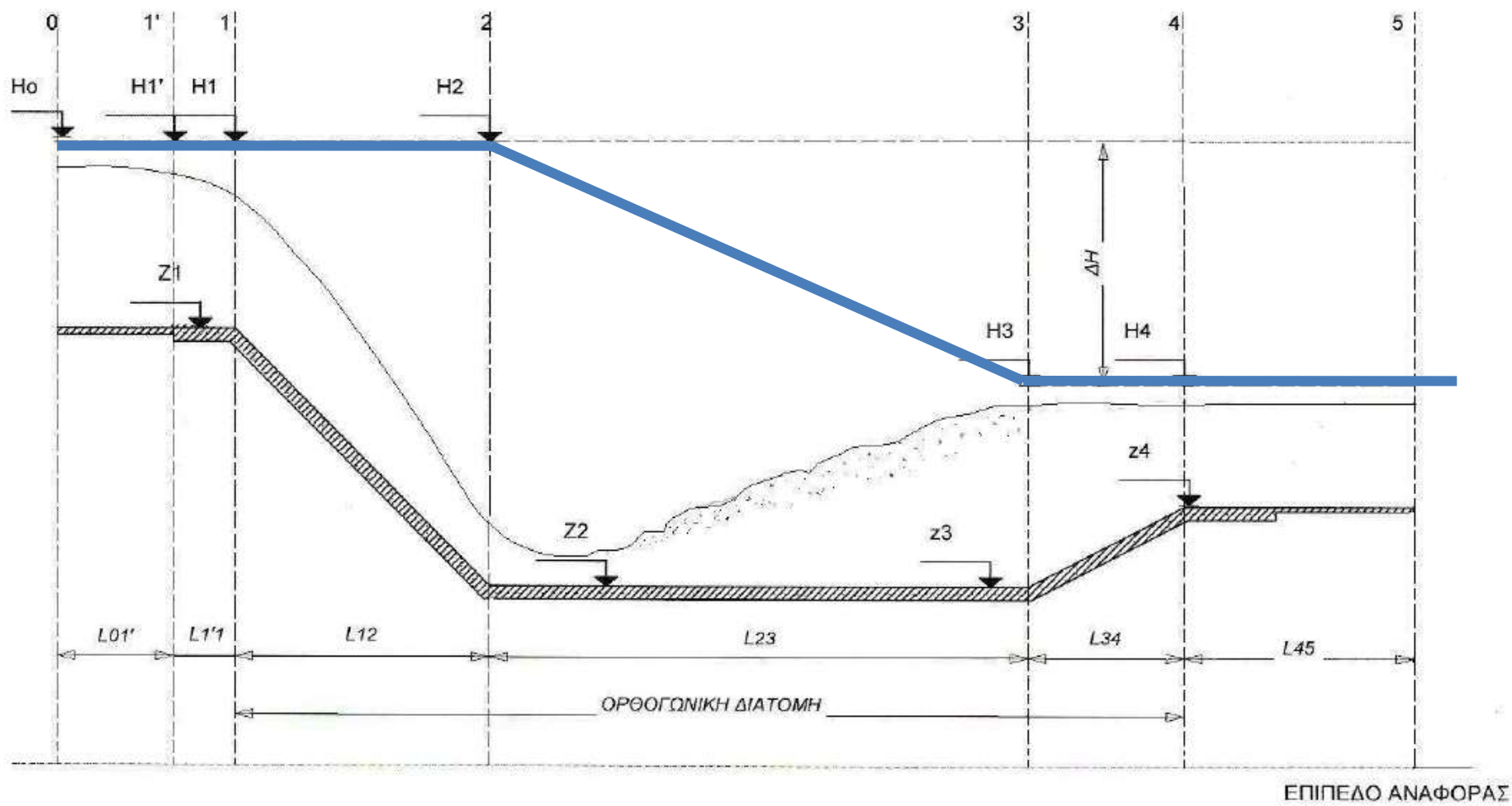


Υδραυλικό άλμα!



Το υδραυλικό πρόβλημα

- Συνήθης μορφή: συζηγή βάθη ή συζηγή βάθη και BMP
- Στο θέμα: Ξέρω την παροχή (και άρα το κρίσιμο βάθος) και τις απώλειες ενέργειας (έμμεσα γνωρίζοντας την ενέργεια ανάντη και κατόντη):
 - Εύρεση συζηγών βαθών
 - εύρεση διαμόρφωσης πυθμένα
 - Εύρεση μήκους για τη λεκάνη ηρεμίας



Υπολογισμός υδραυλικού άλματος (Σχήμα Π1.4)

- Το υδραυλικό άλμα λαμβάνει χώρα σε ορθογωνική διατομή
Από διατομή 1 μέχρι διατομή 4: ορθογωνική κατασκευή.
- Από διατομή 0 έως διατομή 1
" " 4 " " 5 } μεταβατικά τμήματα με αναλογία
προσαρμογής 1:5 (για τη μετάβαση
από την τραπεζοειδή διατομή της
διώρυγας στην ορθογωνική διατομή
του αναβαθμού)

Ορθογωνική διατομή

Υπολογισμός του πλάτους της λεκάνης ηρεμίας (b)

- Εμπειρικός τύπος: $b = \frac{1}{5} Q = \frac{1}{5} \times 30.5 = 6.1 \text{ m}$
- Προτείνεται αυξημένο πλάτος $b = 7 \text{ m}$
- Παροχή ανά μονάδα πλάτους: $q = \frac{Q}{b} = \frac{30.5}{7} = 4.36 \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}}$

Θέμα

Πριν το υδραυλικό άλμα

Προσέγγιση: Στο σημείο (Ο) βάθος ομοιόμορφης ροής η ενέργεια κατά προσέγγιση θεωρείται σταθερή μέχρι το υδραυλικό άλμα

Υπολογισμός στοιχείων του υδραυλικού άλματος

- Ύψος ολικής ενέργειας στη θέση Ο:

$$H_0 = z_0 + y_n + \frac{V_{AB}^2}{2g} = (20.40 - 1.40) + 1.75 + \frac{3.17^2}{2 \cdot 9.81} = 21.26 \text{ m}$$

20.40 m : υψόμετρο φυσικού εδάφους

1.40 m : βάθος εκκαφής

Αν θέλεις
πρόσθεσε
+δ

Βάθος
ομοιόμορφης
ροής

θέμα

Μετά το υδραυλικό άλμα

Προσέγγιση: Σημείο (4) ομοιόμορφη ροή με ενέργεια ίση με την ενέργεια αμέσως μετά το άλμα.

- Ύψος ολικής ενέργειας στη θέση 4:

$$H_4 = z_4 + y_n + \frac{v_{ΓΔ}^2}{2g} = (17.50 - 1.79) + 2.31 + \frac{1.89^2}{2 \times 9.81} = 18.20 \text{ m}$$

- Παραδοχή: $H_0 \approx H_1 \approx H_2$ και $H_3 \approx H_4$

- Ύψος απωλειών ενέργειας μεταξύ των διατομών 2 και 3:

$$\Delta H = 21.26 - 18.20 = 3.06 \text{ m}$$

Αν θέλεις
πρόσθεσε
+δ

Βάθος
ομοιόμορφης
ροής ΓΔ

Θέμα

Κρίσιμη ροή σε ορθογωνική διατομή + επίλυση

- Βάθος νερού στη διατομή 1 (κρίσιμο βάθος)

$$y_1 = y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{4.36^2}{9.81}} = 1.25 \text{ m}$$

- Βάθη ροής ανάντη και κατόντη του υδραυλικού άλματος (y_2, y_3)

- Χρήση Πίνακα Π3.2

$$- \quad n = \frac{\Delta H}{y_c} = \frac{3.06}{1.25} = 2.45$$

$$- \quad \frac{y_2}{y_c} = 0.333 \Rightarrow y_2 = 0.333 \times 1.25 = 0.42 \text{ m}$$

$$- \quad \frac{y_3}{y_2} = 6.87 \Rightarrow y_3 = 6.87 \times 0.42 = 2.88 \text{ m}$$

ΔH	0.00		0.05		0.10		0.15		0.20		0.25		0.30		0.35		0.40		0.45	
Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2	Υ2/Υc	Υ3/Υ2
0	0.000	1.00	0.738	1.78	0.681	2.07	0.643	2.29	0.615	2.40	0.592	2.65	0.573	2.81	0.555	2.95	0.541	3.09	0.528	3.22
1	0.436	4.44	0.430	4.54	0.425	4.63	0.419	4.73	0.415	4.82	0.410	4.91	0.405	5.00	0.401	5.09	0.397	5.18	0.393	5.27
2	0.356	5.18	0.353	5.26	0.350	5.33	0.346	5.41	0.343	5.49	0.340	5.57	0.340	5.64	0.338	5.72	0.336	5.79	0.333	5.87
3	0.311	7.66	0.309	7.73	0.308	7.80	0.306	7.87	0.304	7.94	0.303	8.01	0.301	8.07	0.300	8.14	0.298	8.21	0.296	8.28
4	0.281	9.00	0.280	9.07	0.279	9.13	0.277	9.19	0.276	9.26	0.275	9.32	0.274	9.39	0.273	9.45	0.271	9.51	0.270	9.57
5	0.259	10.25	0.258	10.31	0.257	10.38	0.256	10.44	0.255	10.50	0.254	10.56	0.253	10.62	0.252	10.68	0.251	10.73	0.250	10.79
6	0.241	11.44	0.241	11.50	0.240	11.55	0.239	11.61	0.238	11.67	0.238	11.73	0.237	11.78	0.236	11.84	0.235	11.90	0.235	11.95
7	0.227	12.57	0.227	12.63	0.226	12.68	0.225	12.74	0.225	12.79	0.224	12.85	0.223	12.90	0.223	12.96	0.222	13.01	0.222	13.07
8	0.213	13.66	0.215	13.72	0.214	13.77	0.214	13.82	0.213	13.88	0.213	13.93	0.212	13.98	0.212	14.04	0.211	14.09	0.211	14.14
9	0.205	14.72	0.205	14.77	0.204	14.82	0.204	14.87	0.203	14.93	0.203	14.98	0.202	15.03	0.202	15.08	0.202	15.13	0.201	15.18
10	0.196	15.74	0.196	15.79	0.196	15.84	0.195	15.89	0.195	15.95	0.194	16.00	0.194	16.05	0.194	16.10	0.193	16.15	0.193	16.20
11	0.189	16.74	0.188	16.79	0.188	16.84	0.188	16.89	0.187	16.94	0.187	16.99	0.187	17.04	0.186	17.09	0.186	17.13	0.186	17.18
12	0.182	17.72	0.182	17.77	0.181	17.81	0.181	17.86	0.181	17.91	0.180	17.96	0.180	18.01	0.180	18.05	0.180	18.10	0.179	18.15
13	0.176	18.67	0.176	18.72	0.175	18.77	0.175	18.81	0.175	18.86	0.174	18.91	0.174	18.95	0.174	19.00	0.174	19.05	0.173	19.10
14	0.170	19.61	0.170	19.65	0.170	19.70	0.170	19.75	0.169	19.79	0.169	19.84	0.169	19.89	0.169	19.93	0.168	19.98	0.168	20.02
15	0.165	20.57	0.165	20.57	0.165	20.62	0.165	20.66	0.164	20.71	0.164	20.75	0.164	20.80	0.164	20.84	0.164	20.89	0.163	20.94
16	0.161	21.47	0.161	21.47	0.160	21.52	0.160	21.56	0.160	21.61	0.160	21.65	0.160	21.70	0.159	21.74	0.159	21.79	0.159	21.83
17	0.157	22.33	0.156	22.36	0.156	22.41	0.156	22.45	0.156	22.50	0.156	22.54	0.155	22.58	0.155	22.63	0.155	22.67	0.155	22.71
18	0.153	23.16	0.153	23.24	0.153	23.28	0.153	23.32	0.153	23.37	0.152	23.41	0.152	23.45	0.151	23.50	0.151	23.54	0.151	23.58
19	0.149	24.00	0.149	24.10	0.149	24.14	0.149	24.19	0.148	24.23	0.148	24.27	0.148	24.31	0.148	24.36	0.148	24.40	0.148	24.44
20	0.146	24.91	0.146	24.95	0.145	24.99	0.145	25.04	0.145	25.08	0.145	25.12	0.145	25.16	0.145	25.21	0.145	25.25	0.144	25.29
21	0.143	25.75	0.143	25.79	0.142	25.83	0.142	25.88	0.142	25.92	0.142	25.96	0.142	26.00	0.142	26.04	0.141	26.08	0.141	26.13
22	0.140	26.58	0.140	26.62	0.139	26.66	0.139	26.71	0.139	26.75	0.139	26.79	0.139	26.83	0.139	26.87	0.139	26.91	0.138	26.95
23	0.137	27.40	0.137	27.44	0.137	27.48	0.137	27.53	0.136	27.57	0.136	27.61	0.136	27.65	0.136	27.69	0.136	27.73	0.136	27.77
24	0.134	28.22	0.134	28.26	0.134	28.30	0.134	28.34	0.134	28.38	0.134	28.42	0.134	28.46	0.133	28.50	0.133	28.54	0.133	28.58
25	0.132	29.02	0.132	29.06	0.132	29.10	0.132	29.14	0.131	29.18	0.131	29.22	0.131	29.26	0.131	29.30	0.131	29.34	0.131	29.38
26	0.130	29.82	0.130	29.85	0.129	29.89	0.129	29.93	0.129	29.97	0.129	30.01	0.129	30.05	0.129	30.09	0.129	30.13	0.129	30.17
27	0.127	30.60	0.127	30.64	0.127	30.68	0.127	30.72	0.127	30.76	0.127	30.80	0.127	30.84	0.127	30.88	0.127	30.92	0.126	30.96
28	0.125	31.38	0.125	31.43	0.125	31.46	0.125	31.50	0.125	31.54	0.125	31.58	0.125	31.62	0.125	31.66	0.125	31.69	0.124	31.73
29	0.123	32.16	0.123	32.20	0.123	32.23	0.123	32.27	0.123	32.31	0.123	32.35	0.123	32.39	0.123	32.43	0.123	32.46	0.122	32.50
30	0.121	32.92	0.121	32.96	0.121	33.00	0.121	33.04	0.121	33.08	0.121	33.11	0.121	33.15	0.121	33.19	0.121	33.23	0.121	33.27
31	0.120	33.68	0.120	33.72	0.119	33.76	0.119	33.80	0.119	33.84	0.119	33.87	0.119	33.91	0.119	33.95	0.119	33.99	0.119	34.02
32	0.118	34.44	0.118	34.48	0.118	34.51	0.118	34.55	0.118	34.59	0.117	34.63	0.117	34.66	0.117	34.70	0.117	34.74	0.117	34.78
33	0.116	35.19	0.116	35.23	0.116	35.26	0.116	35.30	0.116	35.34	0.116	35.37	0.116	35.41	0.116	35.45	0.116	35.49	0.116	35.52
34	0.115	35.93	0.115	35.97	0.115	36.00	0.114	36.04	0.114	36.08	0.114	36.11	0.114	36.15	0.114	36.19	0.114	36.23	0.114	36.26
35	0.113	36.67	0.113	36.71	0.113	36.74	0.113	36.78	0.113	36.81	0.113	36.85	0.113	36.89	0.113	36.92	0.113	36.96	0.112	37.00
36	0.112	37.40	0.112	37.44	0.112	37.47	0.111	37.51	0.111	37.55	0.111	37.58	0.111	37.62	0.111	37.65	0.111	37.69	0.111	37.73
37	0.110	38.13	0.110	38.17	0.110	38.20	0.110	38.23	0.110	38.27	0.110	38.31	0.110	38.34	0.110	38.38	0.110	38.42	0.110	38.45
38	0.109	38.85	0.109	38.89	0.109	38.92	0.109	38.96	0.109	38.99	0.109	39.03	0.109	39.06	0.109	39.10	0.109	39.14	0.109	39.17
39	0.108	39.57	0.108	39.61	0.107	39.64	0.107	39.67	0.107	39.71	0.107	39.74	0.107	39.78	0.107	39.81	0.107	39.85	0.107	39.89
40	0.106	40.28	0.106	40.32	0.106	40.35	0.106	40.38	0.106	40.42	0.106	40.45	0.106	40.49	0.106	40.53	0.106	40.56	0.106	40.60

Λόγος

Πίνακες Μπέλλου

Πεπλεγμένη σχέση

προσεγγιση:
$$\frac{3}{2} \frac{y_2}{y_{cr}} + \frac{1}{2} \left(\frac{y_2}{y_{cr}} \right)^{-2} - \sqrt{2} \left(\frac{y_2}{y_{cr}} \right)^{-0.5} - \frac{2}{\left(\frac{y_2}{y_{cr}} \right)^2 \left(\sqrt{8 \cdot \left(\frac{y_2}{y_{cr}} \right)^{-3}} - 1 \right)^2} = \frac{h_L}{y_{cr}}$$

- Για τα συζυγή βάθη ροής y_2, y_3 ισχύει:

$$y_3 = \frac{y_2}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8 Fr_2^2})$$

Τελευταίος κρίσιμος υδραυλικός υπολογισμός για υδραυλικό άλμα

$$H_3 = H_4$$

- Υπολογισμός υψομέτρου του πυθμένα της λεκάνης ηρεμίας (z_2, z_3)

$$H_3 = z_3 + y_3 + \frac{v_3^2}{2g} \Rightarrow z_3 = H_3 - y_3 - \frac{v_3^2}{2g}$$

$$H_3 = 18.20 \text{ m} \quad y_3 = 2.88 \text{ m} \quad \frac{v_3^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g b^2 y_3^2} = \frac{30.5^2}{2 \times 9.81 \times 7.0^2 \times 2.88^2} = 0.12 \text{ m}$$

$$z_3 = 18.20 - 2.88 - 0.12 = 15.2 \text{ m}$$

$$z_2 = z_3 = 15.2 \text{ m}$$

Υδραυλικό άλμα, ορθογωνική διατομή επίπεδος πυθμένας

- Υπερκρίσιμη σε Υποκρίσιμη
- Καταστροφή ενέργειας
- Διατήρηση της μάζας
- Θεώρημα ορμής: διατήρηση της ειδικής δύναμης

Διατήρηση
Ειδικής δύναμης
αλλά όχι ειδικής
ενέργειας

Υδραυλικό άλμα

- Για ορθογωνική διατομή:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad M = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2}$$

E: ειδική ενέργεια [m]

M: ειδική δύναμη ανά μονάδα πλάτους [m²]

- Για τα συζυγή βάθη ροής y_2, y_3 ισχύει:

$$y_3 = \frac{y_2}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8Fr_2^2})$$

Μήκος λεκάνης ηρεμίας

Υπολογισμός μήκους του αναβάθμου

- Εμπειρικός τύπος για το μήκος του υδραυλικού άλματος:

$$L_j \approx 6.0 y_3 = 6.0 \times 2.88 = 17.28 \text{ m}$$

- Για λόγους ασφαλείας $L_{23} \approx 1.1 L_j = 1.1 \times 17.28 = 19.01 \text{ m}$

L_{23} : μήκος λεκάνης ηρεμίας

Θεωρητικά κρίσιμο και πραγματικό κρίσιμο

Υπολογισμός άλλων χαρακτηριστικών μηκών

- Μήκος L_{12} από συμπιεσμένο εκκυστόδεμα, καθώς το κρίσιμο βάθος δεν εμφανίζεται στη θέση 1, αλλά λίγο πιο ανάντη

$$L_{12} = \frac{1}{10} L_{23} = \frac{1}{10} \times 19.01 \approx 1.90 \text{ m} \quad (\text{εμπειρικός τύπος})$$

Κεκλιμένο τμήμα

$$\Delta z_{1-2} = z_1 - z_2 = (20.40 - 1.40) - 15.2 = 3.8 \text{ m}$$

Κλίση τμήματος 1-2: 1:1.5 (δεδομένο)

$$L_{12} = 1.5 \times \Delta z_{1-2} = 1.5 \times 3.8 = 5.7 \text{ m}$$

20.40 m : υψόμετρο φυσικού εδάφους

1.40 m : βάθος εκκαφής

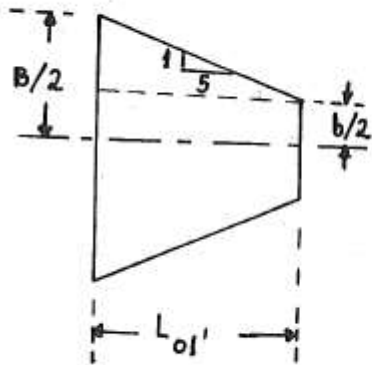
Κεκλιμένο τμήμα 3-4

$$\Delta z_{3-4} = z_4 - z_3 = (17.50 - 1.79) - 15.2 = 0.51 \text{ m}$$

Κλίση τμήματος 3-4: 1:6 (δεδομένο)

$$L_{3-4} = 6.0 \times \Delta z_{3-4} = 6.0 \times 0.51 = 3.06 \text{ m}$$

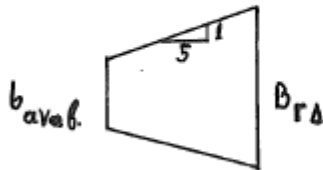
Συναρμογές (αλλαγή διατομής, περίπου στο ίδιο επίπεδο)



αναλογία προσαρμογής 1:5

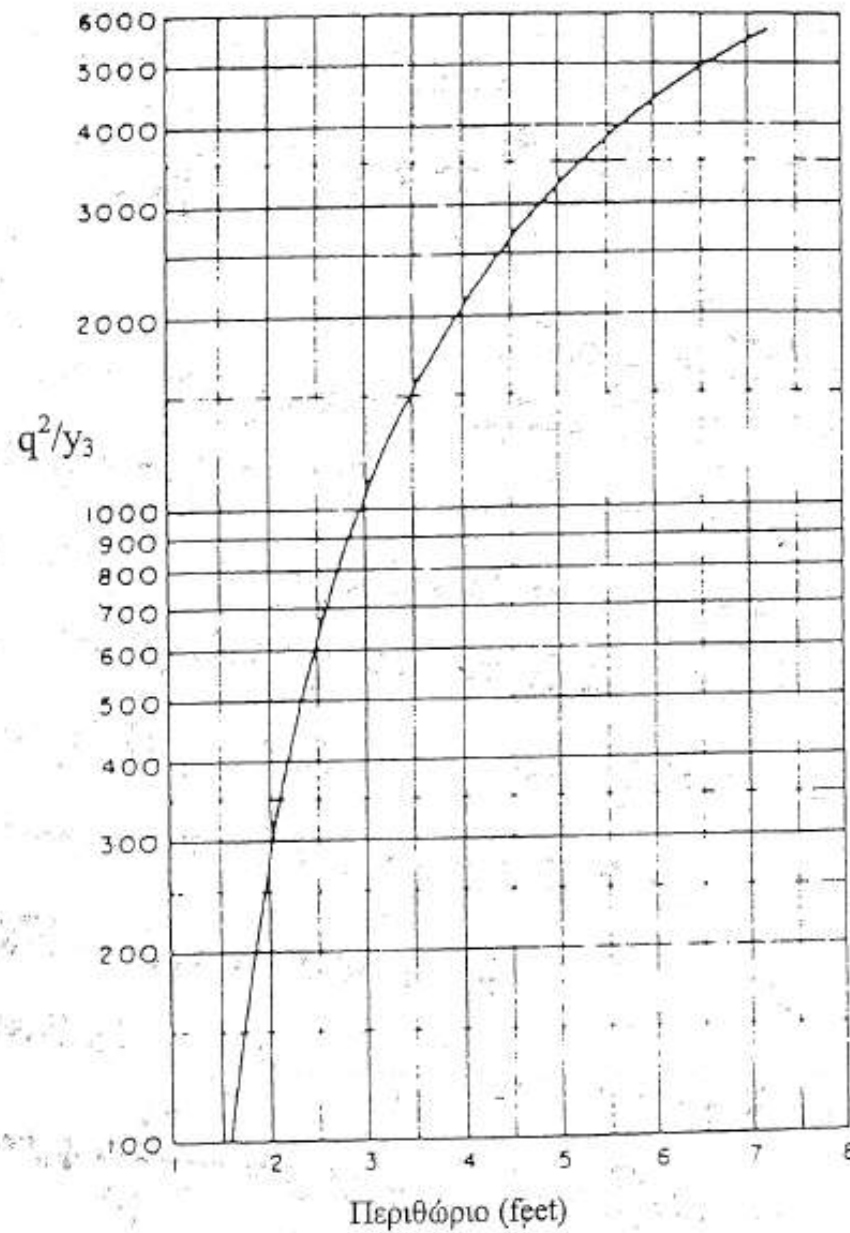
$$\frac{L_{ol'}}{5} = \frac{\frac{B-b}{2}}{1} \Rightarrow L_{ol'} = 2.5(B-b)$$

$$L_{ol'} = 2.5(B_{AB} - b_{αναβ.}) = 2.5(10.76 - 7.0) = 9.4 \text{ m}$$



$$L_{45} = 2.5(B_{\Gamma\Delta} - b_{αναβ.}) = 2.5(13.93 - 7.0) = 17.33 \text{ m}$$

Διαφαίνεται άλλη μία απλούστευση που κάναμε εφόσον αρχικά αγνοήσαμε την μετάβαση (4-5)



Σχήμα Π3.1 Διάγραμμα υπολογισμού του περιθωρίου Λεκάνης καταστροφής ενέργειας

Ελεύθερο περιθώριο για άλμα

Υπολογισμός ελεύθερου περιθωρίου της λεκάνης ηρεμίας
(freeboard in stilling pool)

- Διάγραμμα Π3.1, $1\text{ m} = 3.28\text{ ft} \Rightarrow 1\text{ m}^3 = 3.28^3\text{ ft}^3 = 35.3\text{ ft}^3$

$$\frac{q^2}{y_3} = \frac{4.36^2}{2.88} \frac{(3.28^2)^2}{3.28} = 232.92 \frac{\text{ft}^3}{\text{sec}^2}$$

- Από το διάγραμμα Π3.1 $\Rightarrow$ περιθώριο ασφαλείας $f = 1.8\text{ ft} = 0.55\text{ m}$

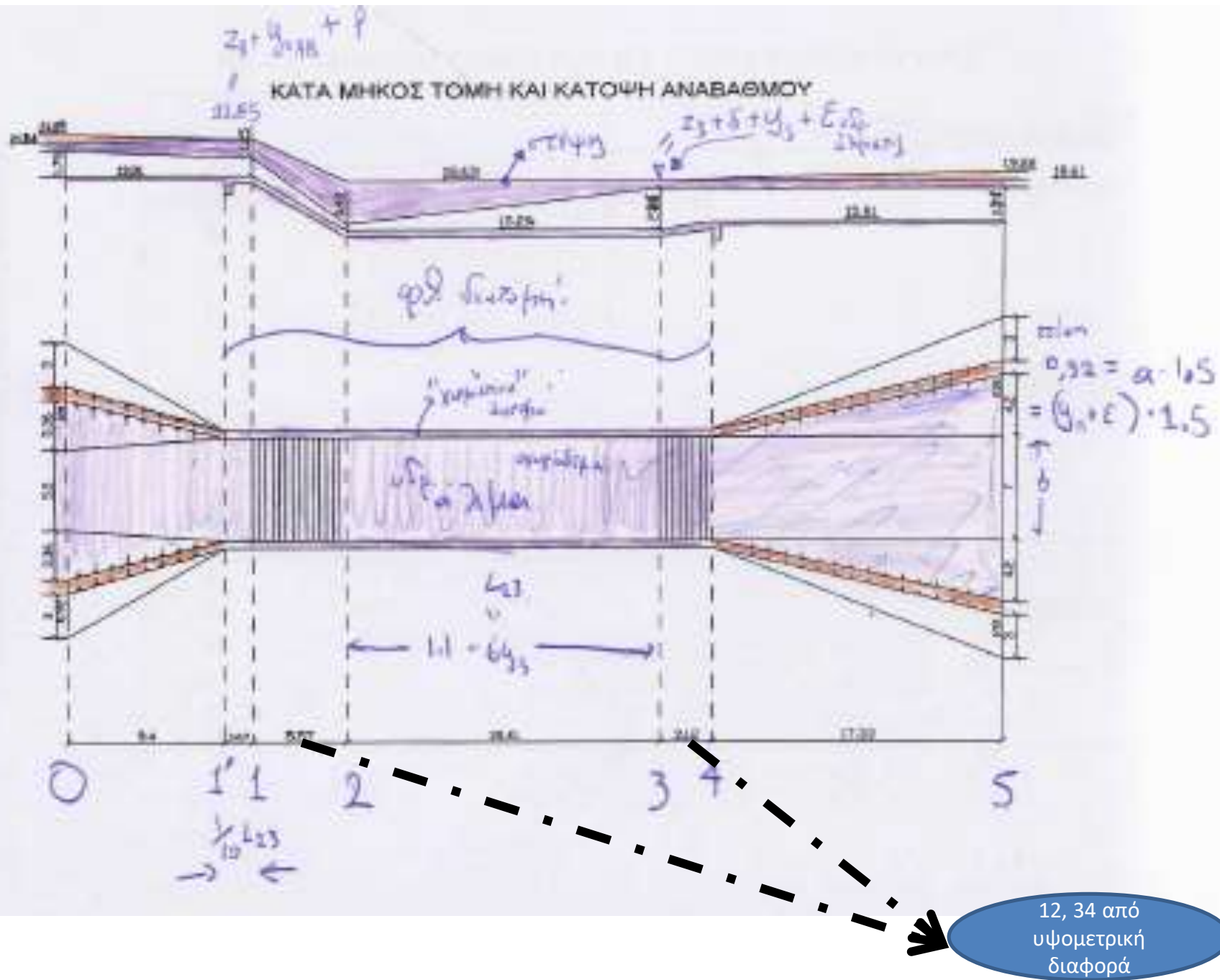
Σχέδια

ΚΑΤΑ ΠΛΑΤΟΣ ΤΟΜΗ ΔΙΟΡΥΓΑΣ (Χ.Θ. 0+700)

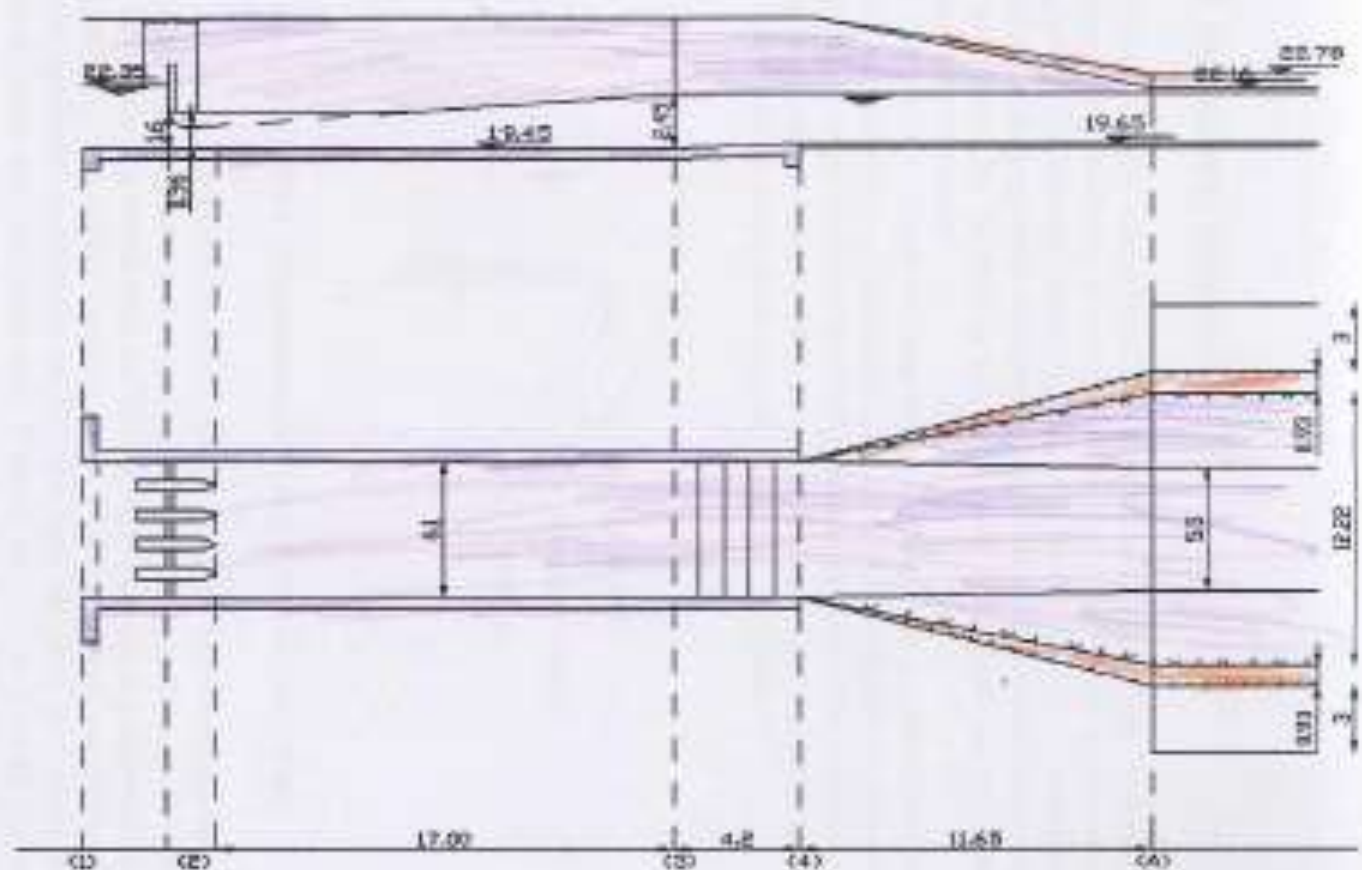


Σχέδιο Π1.2 Εγκρίση διατομή της Διόρυγας στη Χ.Θ. 0+700

Εξήντο III.3 Μηχανισμός και κίνηση του Ανωρθώματος



ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗ ΚΑΙ ΚΑΤΟΨΗ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ

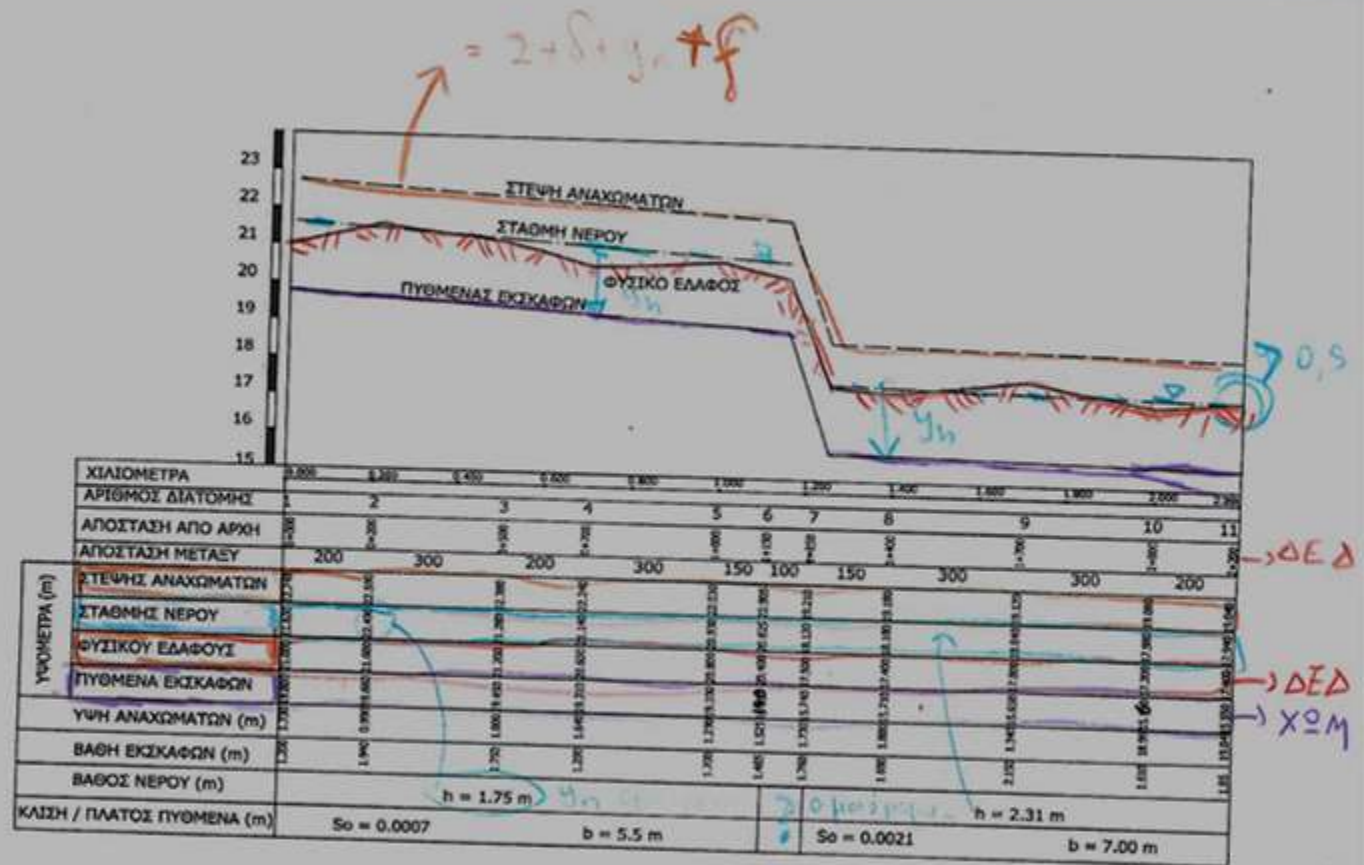


Σχέδιο ΠΙ.4 Μεγέθυνση και κάτοψη της Υδροληψίας

Μηκοτομή

Σχέδιο ΠΙ.1 Μηκοτομή της Διάδρυγας

121



$\text{Στάση αναχώριση} = \text{στάθμη νερού} + f$
 $\text{στάθμη νερού} = \text{υψόμετρο εκσκαφών} + 4 \log \sqrt{1+1}$

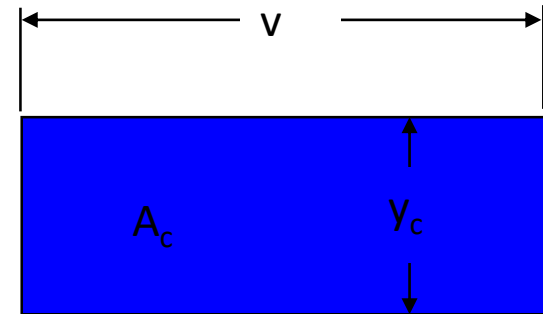
Παράρτημα Ι

Κρίσιμες συνθήκες σε ορθογωνική διατομή

Αριθμός Froude και Κρίσιμη ροή σε ορθογωνικές διατομές

$$Fr^2 = \frac{Q^2 b}{g A^3} \xrightarrow{\text{ορθογωνική διατομή}} Fr^2 = \frac{Q^2 b}{g (by)^3} = \frac{Q^2 / b^2 y^2}{g y} = \frac{V^2}{g y} \Leftrightarrow$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g y}}$$



$$1 = \frac{V_v}{\sqrt{g y_c}} = \frac{q / y_c}{\sqrt{g y_c}} \Leftrightarrow q = \sqrt{g y_c^3}$$

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3}$$

Μόνο για ορθογωνικές διατομές!

$$q = \sqrt{g y_c^3}$$

αντίστροφα!

Κρίσιμη ροή σε ορθογωνικές διατομές

$$\frac{V_c}{\sqrt{y_c g}} = 1 \quad \text{Froude number} \quad \frac{\text{Δύναμη αδράνειας}}{\text{Δύναμη βαρύτητας}} \quad \sqrt{\frac{\text{Kinetic energy}}{\text{Potential energy}}}$$

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{q^2}{2gy_c^2} = \frac{gy_c^3}{2gy_c^2} = \frac{y_c}{2} \longrightarrow \frac{y_c}{2} = \frac{V_c^2}{2g} \quad \text{Ύψος κιν. ενέργειας} = \underline{0.5 \times (\text{κρ. βάθος})}$$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \longrightarrow E_c = y_c + \frac{y_c}{2} \longrightarrow y_c = \frac{2}{3} E_c$$

Παράρτημα II

Ορθογωνική διατομή-υδραυλικό άλμα
, σχέσεις απωλειών ενέργεια και
συζηγών βαθών