

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΑΘΗΜΑ: ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ
ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΑΣ: ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Β. ΜΠΕΛΛΟΣ

Χειμερινό εξάμηνο 2022-2023

Θέμα 1 [80/100]



Υδρογραφικό δίκτυο που αποτελείται από δύο υπολεκάνες α και β, απορρέει στο σημείο Α. Και οι δύο υπολεκάνες έχουν τα ίδια μορφολογικά χαρακτηριστικά, ενώ και οι δύο έχουν εμβαδόν 16 km².

α) Ζητείται να βρεθεί το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της 1 h (ΜΥΓ 1 h) που χαρακτηρίζει και τις δύο υπολεκάνες αν αυτό έχει τριγωνική μορφή, η χρονική βάση του είναι 3 h και η πλημμυρική αιχμή εμφανίζεται στη 1 h. Οι παροχές του ΜΥΓ να δοθούν με χρονικό βήμα μίας ώρας **[10%]**.

Υπόδειξη: ο όγκος βροχής πρέπει να είναι ίσος με τον όγκο απορροής.

Η όμβρια καμπύλη της περιοχής είναι αυτής της μορφής:

$$i(t, T) = \frac{\lambda'(T^\kappa - \psi')}{\left(1 + \frac{t}{\theta}\right)^\eta}$$

όπου i η ένταση της βροχής (mm/h), t η διάρκεια της βροχής (h) και T η περίοδος επαναφοράς (έτη). Οι παράμετροι κ , λ' , ψ' , θ , η προκύπτουν με βάση το ΑΜ του κάθε φοιτητή. Συγκεκριμένα, με βάση το τελευταίο ψηφίο του ΑΜ οι παράμετροι έχουν ως εξής:

Τελευταίο ψηφίο ΑΜ	κ	λ'	ψ'	θ	η	Τελευταίο ψηφίο ΑΜ	κ	λ'	ψ'	θ	η
0	0.113	436.7	0.682	0.089	0.724	5	0.113	341.1	0.547	0.089	0.724
1	0.113	333.2	0.541	0.089	0.724	6	0.113	353.1	0.453	0.089	0.724
2	0.057	1123.2	0.895	0.089	0.724	7	0.113	404.7	0.61	0.089	0.724
3	0.113	279.5	0.405	0.089	0.724	8	0.057	641.1	0.855	0.089	0.724
4	0.057	868.9	0.801	0.089	0.724	9	0.057	1017.9	0.89	0.089	0.724

β) Να βρεθεί το ύψος βροχής για διάρκεια βροχής 6 h και περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη **[10%]**.

γ) Να βρεθεί η βροχή σχεδιασμού με διάρκεια 6 h και θεωρώντας ως χρονικό βήμα $\Delta t=1$ h, αν η χρονική κατανομή της εν λόγω βροχής ακολουθεί την κατανομή του διπλανού πίνακα **[5%]**.

Υπόδειξη: ο πίνακας διαβάζεται και ως εξής: την πρώτη ώρα έβρεξε το 5% της συνολικής βροχόπτωσης, τη δεύτερη ώρα το 10%, κ.ο.κ.

Ώρα	Ποσοστό (%)
1	5
2	10
3	15
4	50
5	15
6	5

δ) Να βρεθεί το υδρογράφημα απορροής από την κάθε υπολεκάνη ως αποτέλεσμα της βροχής σχεδιασμού του προηγούμενου ερωτήματος, με τη μέθοδο του ΜΥΓ. Οι απώλειες να βρεθούν με το δείκτη ϕ , ο οποίος είναι ίσος με $\phi=2$ mm/h **[25%]**.

Υπόδειξη: το χρονικό βήμα για την εφαρμογή της μεθόδου (και για τη βροχή και για το ΜΥΓ) να είναι $\Delta t=1$ h.

ε) Να γίνει διόδευση του υδρογραφήματος της υπολεκάνης α μέσω της υπολεκάνης β θεωρώντας ότι σε κάθε χρονικό βήμα η εκροή O βρίσκεται με την παρακάτω σχέση

$$O_{i+1} = 0.2I_{i+1} + 0.7I_i + 0.1O_i$$

όπου I η εισροή **[15%]**.

στ) Να βρεθεί το τελικό υδρογράφημα απορροής στη θέση Α **[5%]**.

ζ) Για τη μέγιστη αιχμή του υδρογραφήματος του προηγούμενου ερωτήματος, να βρεθεί το μέγιστο βάθος ροής αν η συγκεκριμένη διατομή είναι ορθογωνική, το πλάτος πυθμένα είναι 20 m, η κλίση του πυθμένα είναι 0.5% και ο συντελεστής Manning $n=0.014$ s/m^{1/3} **[10%]**.

Θέμα 2 [20/100]

Λεκάνη απορροής έκτασης 11 km^2 απορρέει σε ταμιευτήρα με τετραγωνικό σχήμα και κατακόρυφα τοιχώματα, διαστάσεων $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. Στην αρχή του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος) η στάθμη του νερού στη δεξαμενή ήταν $+321 \text{ m}$. Η περιοχή δέχτηκε σε ένα έτος τις μηνιαίες βροχοπτώσεις που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα. Στο τέλος του έτους η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα ήταν $+322 \text{ m}$.

Μήνας	Ύψος βροχής (mm)
Οκτώβριος	63
Νοέμβριος	70
Δεκέμβριος	81
Ιανουάριος	92
Φεβρουάριος	95
Μάρτιος	72
Απρίλιος	46
Μάιος	25
Ιούνιος	40
Ιούλιος	62
Αύγουστος	85
Σεπτέμβριος	92

Ζητείται:

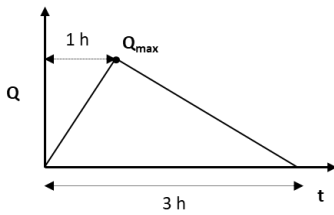
- Να βρεθεί το ετήσιο ύψος βροχής που έπεσε στην εν λόγω λεκάνη **[5%]**.
- Αν ο συντελεστής απορροής της λεκάνης είναι $C=0.3$ να βρεθεί ο συνολικός όγκος των εισροών στον ταμιευτήρα λόγω άμεσης βροχόπτωσης σε αυτόν, καθώς και λόγω απορροής από τη λεκάνη στον ταμιευτήρα, για το παραπάνω έτος **[5%]**.

Υπόδειξη: ο ταμιευτήρας να θεωρηθεί ότι είναι εκτός της λεκάνης των 11 km^2 .

- Αν η μέση ετήσια απόληψη νερού από τον ταμιευτήρα είναι $Y=0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ και είναι σταθερή κάθε μήνα, να βρεθεί το ετήσιο ύψος της εξατμισοδιαπνοής από τον ταμιευτήρα **[10%]**.

ΛΥΣΕΙΣ

1α) Το τριγωνικό ΜΥΓ 1 h έχει την εξής μορφή:



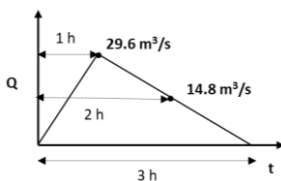
Άρα το πρόβλημα έγκειται στην εύρεση του Q_{max} . Με βάση τον ορισμό του ΜΥΓ 1 h (η απόκριση της λεκάνης όσον αφορά την απορροή μετά από **καθαρό** ύψος βροχής 10 mm σε 1 h) και με δεδομένο το εμβαδόν της κάθε υπολεκάνης (16 km^2), μπορούμε καταρχάς να υπολογίσουμε τον όγκο νερού που πέφτει λόγω βροχόπτωσης σε κάθε υπολεκάνη:

$$V_{rainfall} = (16 \times 10^6) \times \left(\frac{10}{1000}\right) = 160000 \text{ m}^3$$

Εφόσον ο όγκος απορροής V_{runoff} πρέπει να είναι ίσος με τον όγκο βροχόπτωσης $V_{rainfall}$ (σχετική υπόδειξη), θα πρέπει το εμβαδόν του παραπάνω τριγωνικού υδρογραφήματος να είναι ίσο με 160000 m^3 . Συνεπώς:

$$\frac{(3 \times 3600) \times Q_{max}}{2} = 160000 \Rightarrow Q_{max} = 29.63 \text{ m}^3/\text{s}$$

Και οι δύο υπολεκάνες είναι ταυτόσημες, άρα θα έχουν και το ίδιο ΜΥΓ 1 h, το οποίο θα έχει την παρακάτω μορφή (η παροχή στις 2 h βρίσκεται με γραμμική παρεμβολή):



1β) Για $N=0$, και όπου T η περίοδος επαναφοράς (50 έτη) και t η διάρκεια βροχής (6 h), η ένταση βροχής προκύπτει:

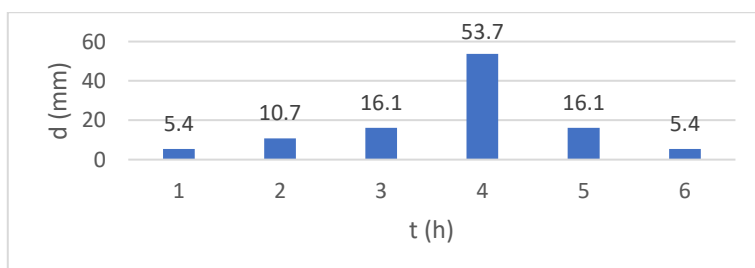
$$i(t, T) = \frac{436.7(50^{0.113} - 0.682)}{\left(1 + \frac{6}{0.089}\right)^{0.724}} = 17.9 \text{ mm/h}$$

Το συνολικό ύψος βροχής για τη διάρκεια 6 ωρών είναι:

$$d = i \times t = 17.9 \times 6 = 107.4 \text{ mm}$$

1γ) Η βροχή σχεδιασμού (ή αλλιώς υετογράφημα) προκύπτει ως εξής (σημειώνεται ότι δεν απαιτείται στην εξέταση να παρουσιαστεί και το γράφημα, το οποίο δίνεται για την καλύτερη κατανόηση της άσκησης):

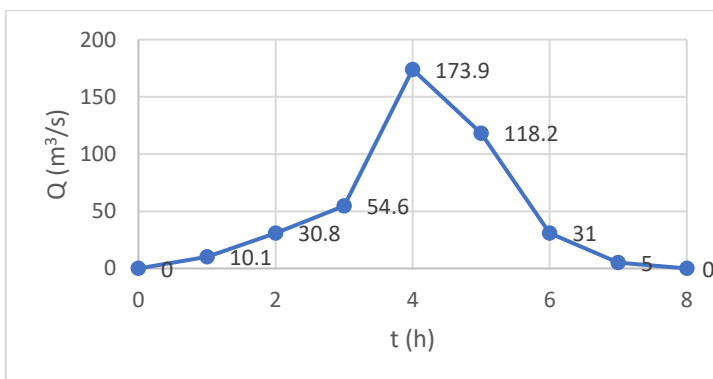
Ωρα	Ποσοστό (%)	Ύψος βροχής (mm)
1	5	$0.05 \times 107.4 = 5.4 \text{ mm}$
2	10	$0.10 \times 107.4 = 10.7 \text{ mm}$
3	15	$0.15 \times 107.4 = 16.1 \text{ mm}$
4	50	$0.50 \times 107.4 = 53.7 \text{ mm}$
5	15	$0.15 \times 107.4 = 16.1 \text{ mm}$
6	5	$0.05 \times 107.4 = 5.4 \text{ mm}$



1δ) Για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος που θα απορρέει και στις δύο υπολεκάνες (**ίδιο και για τις δύο υπολεκάνες**) μετά από τη βροχόπτωση σχεδιασμού που υπολογίστηκε στο προηγούμενο ερώτημα κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας όπου και εφαρμόζονται οι αρχές της αναλογίας και της επαλληλίας. Οι τελικές τιμές της παροχής που ορίζουν το ζητούμενο υδρογράφημα εμφανίζονται στη στήλη με τα κόκκινα γράμματα. Σημειώνεται ότι για να υπολογιστεί η απορροή της λεκάνης με βάση τη θεωρία του ΜΥΓ, απαιτείται το καθαρό ύψος βροχόπτωσης d' . Άρα σε κάθε χρονικό βήμα αφαιρούνται τα ύψη των απωλειών. Εφόσον $\phi=2 \text{ mm/h}$, το ύψος απωλειών σε κάθε χρονικό βήμα είναι $2 \text{ mm} \times 1 \text{ h} = 2 \text{ mm}$.

t (h)		1	2	3	4	5	6	
d (mm)		5.4	10.7	16.1	53.7	16.1	5.4	
d' (mm)		5.4-2x1=3.4	10.7-2x1=8.7	14.1	51.7	14.1	3.4	
t (h)	ΜΥΓ 1 h							Q (m ³ /s)
0	0	0						0
1	29.6	(3.4/10) x 29.6=10.1	0					10.1
2	14.8	(3.4/10) x 14.8=5	(8.7/10) x 29.6=25.8	0				30.8
3	0	0	(8.7/10) x 14.8=12.9	41.7	0			54.6
4			0	20.9	153	0		173.9
5				0	76.5	41.7	0	118.2
6					0	20.9	10.1	31.0
7						0	5	5
8							0	0

Το υδρογράφημα που υπολογίστηκε πιο πάνω (στήλη με κόκκινα γράμματα) έχει την παρακάτω μορφή (σημειώνεται ότι δεν απαιτείται στην εξέταση να παρουσιαστεί το εν λόγω γράφημα, το οποίο δίνεται για την καλύτερη κατανόηση της επίλυσης):



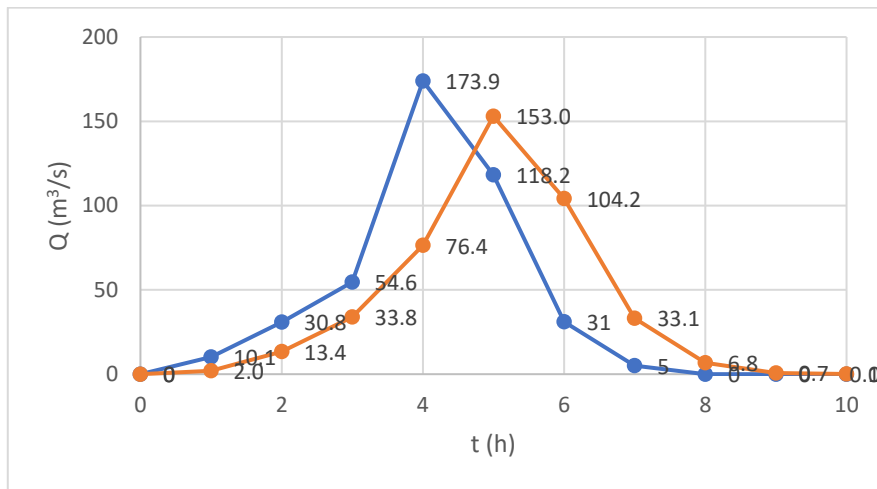
1ε) Το υδρογράφημα που απορρέει από την υπολεκάνη α διοδεύεται μέσω της υπολεκάνης β. Η διόδευση υπολογίζεται ως εξής:

$$O_{i+1} = 0.2I_{i+1} + 0.7I_i + 0.1O_i$$

Ωρα	I (m ³ /s)	O (m ³ /s)
0	0.0	0
1	10.1	$0.2 \times 10.1 + 0.7 \times 0.0 + 0.1 \times 0.0 = 2.0$
2	30.8	$0.2 \times 30.8 + 0.7 \times 10.1 + 0.1 \times 2.0 = 13.4$
3	54.6	$0.2 \times 54.6 + 0.7 \times 30.8 + 0.1 \times 13.4 = 33.8$
4	173.9	$0.2 \times 173.9 + 0.7 \times 54.6 + 0.1 \times 33.8 = 76.4$
5	118.2	$0.2 \times 118.2 + 0.7 \times 173.9 + 0.1 \times 76.4 = 153.0$
6	31.0	$0.2 \times 31.0 + 0.7 \times 118.2 + 0.1 \times 153.0 = 104.2$
7	5.0	$0.2 \times 5.0 + 0.7 \times 31.0 + 0.1 \times 104.2 = 33.1$
8	0.0	$0.2 \times 0.0 + 0.7 \times 5.0 + 0.1 \times 33.1 = 6.8$
9	0.0	$0.2 \times 0.0 + 0.7 \times 0.0 + 0.1 \times 6.8 = 0.7$
10	0.0	$0.2 \times 0.0 + 0.7 \times 0.0 + 0.1 \times 0.7 = 0.1$

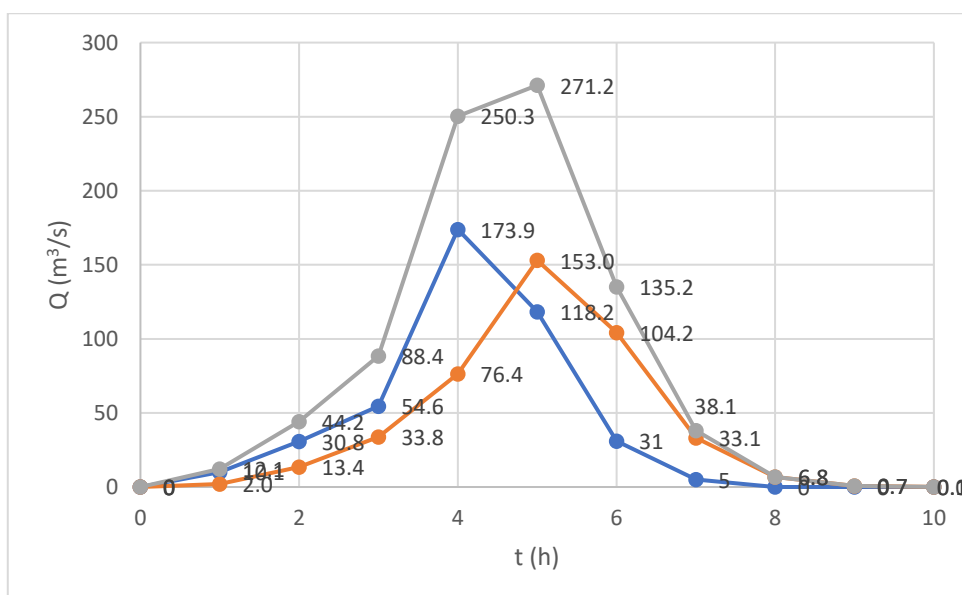
Σημειώνεται ότι η αρχική τιμή εκροής Q_0 θεωρείται μηδενική και σημειώνεται με κόκκινα γράμματα.

Συνεπώς, το υδρογράφημα που απεικονίζεται με την μπλε γραμμή και είναι η απορροή της βροχής σχεδιασμού στην υπολεκάνη α, μετατρέπεται στο υδρογράφημα που απεικονίζεται με την πορτοκαλί γραμμή, καθώς αυτό διοδεύεται μέσω της υπολεκάνης β. Σημειώνεται ότι δεν απαιτείται στην εξέταση να παρουσιαστεί το εν λόγω γράφημα, το οποίο δίνεται για την καλύτερη κατανόηση της επίλυσης.



1στ) Στην έξοδο Α απορρέουν και οι δύο υπολεκάνες α και β. Η υπολεκάνη α απορρέει έμμεσα, εφόσον το υδρογράφημα απορροής διοδεύεται μέσω της υπολεκάνης β (πορτοκαλί γραμμή), ενώ η υπολεκάνη β άμεσα (μπλε γραμμή). Συνεπώς το τελικό υδρογράφημα (γκρι γραμμή) θα είναι το άθροισμα της μπλε και της πορτοκαλί γραμμής. Σημειώνεται ότι δεν απαιτείται στην εξέταση να παρουσιαστεί το εν λόγω γράφημα, το οποίο δίνεται για την καλύτερη κατανόηση της επίλυσης.

Ωρα	Q _α (m³/s)	Q _β (m³/s)	Q (m³/s)
0	0.0	0.0	0.0
1	10.1	2.0	10.1 + 2.0 = 12.1
2	30.8	13.4	30.8 + 13.4 = 44.2
3	54.6	33.8	88.4
4	173.9	76.4	250.3
5	118.2	153.0	271.2
6	31.0	104.2	135.2
7	5.0	33.1	38.1
8	0.0	6.8	6.8
9	0.0	0.7	0.7
10	0.0	0.1	0.1



1ζ) Το μέγιστο βάθος ροής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση Manning για την παροχή αιχμής, η οποία με βάση το προηγούμενο ερώτημα είναι 271.2 m³/s. Εφόσον το πλάτος διατομής είναι B=20 m, η κλίση πυθμένα S=0.005, ο συντελεστής Manning n=0.014 s/m^{1/3}, ενώ άγνωστη μεταβλητή θεωρείται το βάθος ροής h, η εξίσωση Manning γράφεται:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \Rightarrow 271.2 = \frac{1}{0.014} (20h) \left(\frac{20h}{20+2h} \right)^{2/3} 0.005^{1/2}$$

Η παραπάνω σχέση είναι πεπλεγμένη. Με δοκιμές μπορεί να υπολογιστεί ότι h=1.94 m.

2α) Το ετήσιο ύψος είναι το άθροισμα της βροχής όλων των μηνών: 63+70+81+92+95+72+46+25+40+62+85+92=823 mm

2β) Ο συνολικός όγκος εισροών V_{inflow} στον ταμιευτήρα είναι το άθροισμα της άμεσης βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα ($V_{rainfall}$) και των εισροών από τη λεκάνη απορροής (V_{runoff}). Οι εισροές λόγω άμεσης βροχής στον ταμιευτήρα είναι:

$$V_{rainfall} = (1000 \times 1000) \times \left(\frac{823}{1000} \right) = 823000 \text{ m}^3$$

Οι εισροές από τη λεκάνη απορροής είναι (δεδομένου ότι ο συντελεστής απορροής είναι C=0.3):

$$V_{runoff} = 0.3 \times (11 \times 10^6) \times \left(\frac{823}{1000} \right) = 2715900 \text{ m}^3$$

Άρα ο συνολικό όγκος εισροών είναι:

$$V_{inflow} = V_{rainfall} + V_{runoff} = 823000 + 2715900 = 3538900 \text{ m}^3$$

2γ) Το υδατικό ισοζύγιο έχει ως εξής:

Όγκος νερού στο τέλος του έτους = Όγκος νερού στην αρχή του έτους + Συνολικός όγκος εισροών – Συνολικός όγκος εκροών.

Ο συνολικός όγκος εισροών υπολογίστηκε στο προηγούμενο ερώτημα. Ο συνολικός όγκος εκροών είναι το άθροισμα της απόληψης νερού από τον ταμιευτήρα και της εξατμισοδιαπνοής. Αν μετατρέψουμε το υδατικό ισοζύγιο από μονάδες όγκου σε μονάδες μήκους διαιρώντας με την επιφάνεια του ταμιευτήρα μπορούμε να γράψουμε:

$$Z_2 = Z_1 + I - A - ET$$

όπου Z_2 η στάθμη νερού στο τέλος του έτους, Z_1 η στάθμη νερού στην αρχή του έτους, I οι συνολικές εισροές σε μονάδες μήκους, A η απόληψη νερού σε μονάδες μήκους και ET η εξατμισοδιαπνοή, επίσης σε μονάδες μήκους. Αν λύσουμε την παραπάνω σχέση ως προς την εξατμισοδιαπνοή:

$$ET = Z_1 + I - A - Z_2$$

Οι στάθμες Z_1 και Z_2 είναι ήδη εκφρασμένες σε μονάδες μήκους (321 m και 322 m αντίστοιχα). Οι συνολικές εισροές μπορούν να εκφραστούν σε μονάδες μήκους διαιρώντας το συνολικό όγκο εισροών V_{inflow} με το εμβαδόν του ταμιευτήρα ($1 \times 10^6 \text{ m}^2$). Δηλαδή:

$$I = \frac{3538900}{1 \times 10^6} = 3.5 \text{ m}$$

Η παραπάνω ποσότητα μπορεί να διαβαστεί και ως: «κατά τη διάρκεια της χρονιάς μπήκε 3.5 m ύψος νερού στον ταμιευτήρα». Όσον αφορά την απόληψη, μπορεί να εκφραστεί σε μονάδες μήκους αφού πρώτα βρεθεί ο συνολικός ετήσιο όγκος απόληψης, καθότι δίνεται στη μορφή της μέσης παροχής:

$$A = \frac{(0.06 \times 365 \times 24 \times 3600)}{1 \times 10^6} = 1.9 \text{ m}$$

Η παραπάνω ποσότητα μπορεί να διαβαστεί και ως: «κατά τη διάρκεια της χρονιάς αντλήθηκε 1.9 m ύψος νερού από τον ταμιευτήρα». Άρα το ετήσιο ύψος εξατμισοδιαπνοής είναι:

$$ET = 321 + 3.5 - 1.9 - 322 = 0.6 \text{ m}$$