



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Γκουντούλας Κωνσταντίνος
Δρ. Υδρογεωλόγος

Παράδειγμα 1.1

Βροχόπτωση έντασης 5 mm/h, έπεσε σε λεκάνη απορροής έκτασης 4 km² για 6 ώρες. Στην έξοδο της λεκάνης μετρήθηκε απορροή κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ίση με 70000 m³. Πόση από την ποσότητα της 6ωρης βροχόπτωσης μετατράπηκε σε υδρολογικές απώλειες;

Λύση

Η συνολική εισροή στη λεκάνη απορροής κατά τη διάρκεια του επεισοδίου βροχόπτωσης, σε μονάδες όγκου ήταν:

$$I = 0.005 \text{ m/hr} \cdot 6 \text{ hr} \cdot 4 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 120000 \text{ m}^3$$

ενώ η εκροή που μετρήθηκε στην έξοδο ήταν:

$$O = 70000 \text{ m}^3$$

Η διαφορά μεταξύ της εκροής και της εισροής δίνει τις ζητούμενες υδρολογικές απώλειες, δηλαδή:

$$\text{Απώλειες} = I - O = 120000 - 70000 = 50000 \text{ m}^3$$

Οι απώλειες αυτές συνίστανται κυρίως στην ποσότητα νερού που διηθήθηκε στο έδαφος και λιγότερο σε αυτές της εξάτμισης και διαπνοής, που είναι αρκετά μικρές για το χρονικό διάστημα των 6 h.

Ο ρυθμός των απωλειών, εκφρασμένος σε μονάδες
ισοδύναμου ύψους νερού, ανά επιφάνεια λεκάνης και
χρόνο είναι:

$$\text{Ρυθμός απωλειών} = \frac{50000 \text{ m}^3}{4 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot 6 \text{ hr}} = 0.002 \text{ m / hr} = 2 \text{ mm / hr}$$

Παράδειγμα 1.2

Λίμνη σταθερής επιφάνειας 1110000 m^2 έχει σε δεδομένο μήνα εισροή $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$, αντίστοιχη εκροή $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ και αύξηση του αποθέματος 19800 m^3 . Ένας βροχογράφος που είναι δίπλα στη λίμνη, μέτρησε για τον εν λόγω μήνα συνολική βροχόπτωση 27 mm . Αν υποθεθεί ότι οι διαφυγές από τη λίμνη είναι ασήμαντες, να προσδιοριστεί η μηνιαία εξάτμιση της λίμνης.

Λύση

Θα εφαρμοστεί και εδώ η γενική εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου, που στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$I + P - O - E = \Delta S$$

όπου:

$$I = \text{η εισροή στη λίμνη} = 0.42 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ ή } 1088640 \text{ m}^3 \text{ στο μήνα}$$

$O =$ η εκροή από τη λίμνη $= 0.36 \text{ m}^3/\text{s}$, ή 933120 m^3 στο μήνα

$P =$ η επιφανειακή βροχόπτωση $= 0.027 \text{ m} \cdot 1110000 \text{ m}^2 = 29970 \text{ m}^3$

$\Delta S =$ η αύξηση αποθέματος της λίμνης $= 19800 \text{ m}^3$

$E =$ η ζητούμενη εξατμισή από την επιφάνεια της λίμνης

Με αντικατάσταση των τιμών στην εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, προκύπτει το ζητούμενο μέγεθος:

$$E = (1088640 + 29970 - 933120 - 19800) \text{ m}^3 \Rightarrow E = 165690 \text{ m}^3$$

Η εξατμισή θα μπορούσε να δοθεί και σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού (cm ή mm), διαιρώντας την ποσότητα που προέκυψε με την επιφάνεια της λίμνης, ως εξής:

$$E = \frac{165690 \text{ m}^3}{1110000 \text{ m}^2} = 0.149 \text{ m} = 149 \text{ mm}$$

Παράδειγμα 1.3

Η λεκάνη απορροής ενός ποταμού έχει συνολική έκταση 840 km² και καλύπτεται από τέσσερις βροχομετρικούς σταθμούς Α, Β, Γ και Δ. Το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που αντιπροσωπεύει ο κάθε σταθμός είναι 30%, 25%, 35% και 10% αντίστοιχα. Κατά το υδρολογικό έτος 1998-1999 οι τέσσερις σταθμοί κατέγραψαν τα ακόλουθα μηνιαία ύψη βροχής σε mm (πίνακας 1.3)

	Ο	Ν	Δ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ
h(A)	6 3	10 5	11 2	80	11 0	68	58	55	27	18	11	22
h(B)	6 9	11 0	13 0	88	10 7	70	62	61	34	22	7	25
h(Γ)	8 1	14 5	12 2	93	12 5	79	66	58	29	19	12	18
h(Δ)	7 6	13 7	14 3	100	11 9	82	70	67	40	10	5	16

Να υπολογιστούν:

Το σημειακό ετήσιο ύψος βροχής στον κάθε σταθμό

1. Το ετήσιο ύψος βροχής και ο ετήσιος όγκος βροχής στη λεκάνη απορροής
2. Εάν η μέση ετήσια απορροή είναι $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$ να υπολογιστεί ο ετήσιος όγκος απορροής και το ισοδύναμο ύψος απορροής της λεκάνης σε mm.
3. Ο ετήσιος συντελεστής απορροής.
4. Ο όγκος υδρολογικών απωλειών και το ισοδύναμο ύψος υδρολογικών απωλειών στη λεκάνη.
5. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή εάν οι υδρολογικές απώλειες από διήθηση και υπόγειες διαφυγές είναι το 35% της συνολικής βροχής.
6. Το μέγιστο μηνιαίο ύψος βροχής στη λεκάνη απορροής.

Λύση:

1. Το σημειακό ετήσιο ύψος βροχής σε κάθε σταθμό προκύπτει ως άθροισμα των 12 μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα δίνονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 1.4.
2. Για τον υπολογισμό του ετήσιου ύψους βροχής, γίνεται αρχικά επιφανειακή αναγωγή των σημειακών μετρήσεων για κάθε μήνα, πολλαπλασιάζοντας τη σημειακή βροχόπτωση κάθε μήνα με το αντίστοιχο ποσοστό της επιφάνειας που αντιπροσωπεύει κάθε σταθμός. Για παράδειγμα για το μήνα Μάρτιο, η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι ίση με:

$$P_{\text{Μαρτίου}} = 0.30 \times 68 + 0.25 \times 70 + 0.35 \times 79 + 0.10 \times 82 = 73.75 \text{ mm} \approx 74 \text{ mm}$$

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4 Υπολογισμός σημειακών ετήσιων και μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης.

	Ο	Ν	Δ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Σημειακό ετήσιο ύψος
h(A)	63	105	112	80	110	68	58	55	27	18	11	22	729
h(B)	69	110	130	88	107	70	62	61	34	22	7	25	785
h(Γ)	81	145	122	93	125	79	66	58	29	19	12	18	847
h(Δ)	76	137	143	100	119	82	70	67	40	10	5	16	865
Επιφ. Ύψος βρο χής	72.1	123.5	123.1	88.6	115.4	73.8	63.0	58.8	30.8	18.6	9.8	20.8	798

Το ζητούμενο ετήσιο ύψος βροχής προκύπτει ως άθροισμα των 12 τιμών που υπολογίστηκαν και είναι ίσο με 798 mm. Η ίδια ποσότητα, πολλαπλασιασμένη με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής, δίνει τον ετήσιο όγκο βροχής, που είναι ίσος με:

$$V_{\text{βροχ}} = 0.798 \text{ m} \cdot 840 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 670 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

3. Ο όγκος απορροής στην έξοδο της λεκάνης προκύπτει ως γινόμενο της παροχής επί τον αντίστοιχο χρόνο, δηλαδή:

Το ισοδύναμο ύψος απορροής προκύπτει ως πηλίκο αυτού του όγκου προς την αντίστοιχη έκταση λεκάνης, ως εξής:

$$V_{\text{απορ}} = 8.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 365 \text{ ημ} \cdot 86400 \text{ s/ημ} = 261.75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

4. Ο ετήσιος συντελεστής απορροής προκύπτει ως πηλίκο του ύψους (ή όγκου) νερού που απέρρευσε προς αυτό που έπεσε κατά τη διάρκεια του έτους. Εδώ είναι ίσο με:

$$h_{\text{απορ}} = V_{\text{απορ}} / A = 261.75 \cdot 10^6 / 840 \cdot 10^6 = 0.312 \text{ m} = 312 \text{ mm}$$

$$c = 312/798 = 0.391$$

5. Ο όγκος υδρολογικών απωλειών σε m^3 είναι

$$V_{\text{απωλ}} = V_{\text{βροχ}} - V_{\text{απορ}} = (670 - 261.75) \times 10^6 \text{ m}^3 = 408.25 \times 10^6 \text{ m}^3$$

και το αντίστοιχο ύψος υδρολογικών απωλειών είναι:

$$h_{\text{απωλ}} = V_{\text{απωλ}} / A = 408.25 \times 10^6 / 840 \cdot 10^6 \text{ m} = 0.486 \text{ m} = 486 \text{ mm}$$

6. Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής εκφράζεται από την εξίσωση:

$$P - E - (G + DS) - R = 0$$

όπου:

P = βροχόπτωση = 798 mm

R = απορροή = 312 mm

$G + DS$ = διήθηση και υπόγειες διαφυγές = $0.35 \times P = 279 \text{ mm}$

E = εξατμισοδιαπνοή, που από το ισοζύγιο προκύπτει ίση με 207 mm

7. Το μέγιστο μηνιαίο ύψος βροχής στη λεκάνη απορροής, φαίνεται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 1.4 και είναι ίσο με 123.5 mm κατά το μήνα Νοέμβριο.

Παράδειγμα 1.4

Σε θέση ποταμού πρόκειται να κατασκευαστεί φράγμα για την αποθήκευση νερού ώστε να καλυφθούν οι αρδευτικές ανάγκες παρακείμενων εκτάσεων. Η λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος έχει έκταση 818 km² και θεωρείται στεγανή. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα ιστορικά δείγματα (α) της ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης P της λεκάνης και (β) της μέσης ετήσιας παροχής Q στη θέση του φράγματος για μια περίοδο 10 υδρολογικών ετών.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ	$P(\text{mm})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
1981-82	1487	23.73
1982-83	1337	17.01
1983-84	1357	24.99
1984-85	1000	15.54
1985-86	1532	23.10
1986-87	1182	14.49
1987-88	1173	13.86
1988-89	1238	12.39
1989-90	760	5.67
1990-91	1477	20.37

Πίνακας 1.5 Στοιχεία μέσης ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης και μέσης ετήσιας παροχής.

Ζητούνται:

1. Ο όγκος της απορροής σε m^3 και το αντίστοιχο ύψος απορροής σε πιπί για κάθε χρόνο.
2. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ) στη λεκάνη σε mm και σε m^3 για κάθε χρόνο.
3. Ο συντελεστής απορροής για κάθε χρόνο και για τη χρονική περίοδο του δείγματος.
4. Η αναμενόμενη ετήσια ποσότητα νερού (σε mm) που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε αν οι ολικές απώλειες του υπό κατασκευή ταμιευτήρα (εξάτμιση, διαφυγές, υπερχειλίσσεις) ανέρχονται σε ποσοστό 18% της μέσης υπερετήσιας εισροής στον ταμιευτήρα.
5. Η έκταση της καλλιεργήσιμης επιφάνειας που μπορεί να αρδευτεί με την παραπάνω ποσότητα νερού, (σε περίπτωση που το φράγμα ήταν αρδευτικό), αν η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου είναι 650 mm και η βροχόπτωση την ίδια περίοδο αμελητέα.

Λύση

1. Ο όγκος απορροής προκύπτει με πολλαπλασιασμό της μέσης ετήσιας παροχής του ποταμού επί τον αντίστοιχο χρόνο. Δίνεται σε m^3 στην τέταρτη στήλη του ακόλουθου πίνακα και σε mm στην πέμπτη στήλη, αφού διαιρεθεί με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Έτος	P (mm)	Q (m3/s)	Ναπορ (m3)	ηαπορ (mm)	ΕΤ (mm)	ΕΤ (m3)	Συντ. Απορ.
1981-82	1478	23.73	748349280	915	572	468016720	0.615
1982-83	1337	17.01	536427360	656	681	557238640	0.490
1983-84	1357	24.99	788084640	963	394	321941360	0.710
1984-85	1000	15.54	490069440	599	401	327930560	0.599
1985-86	1532	23.1	728481600	891	641	524694400	0.581
1986-87	1182	14.49	456956640	559	623	509919360	0.473
1987-88	1173	13.86	437088960	534	639	522425040	0.456
1988-89	1238	12.39	390731040	478	760	621952960	0.386
1989-90	760	5.67	178809120	219	541	442870880	0.288
1990-91	1477	20.37	642388320	785	692	565797680	0.532
Άθροισμα:	12543		5397386400	6598	5945		

2. Με δεδομένο ότι η λεκάνη απορροής είναι στεγανή και συνεπώς οι μόνες υδρολογικές απώλειες είναι αυτές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, η τελευταία προκύπτει αφαιρώντας το ισοδύναμο ύψος απορροής από την επιφανειακή βροχόπτωση, δηλαδή:

$$E = P - h_{\text{απορ}}$$

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής για κάθε έτος γίνεται σε mm και σε m³ στις στήλες (6) και (7) αντίστοιχα του Πίνακα 1.6.

3. Ο συντελεστής απορροής για κάθε έτος, ορίζεται ως η ποσότητα νερού που απορρέει στην έξοδο της λεκάνης, προς τη συνολική ποσότητα νερού που πέφτει στη λεκάνη απορροής, στη διάρκεια του έτους. Δίνεται, δηλαδή, ως πηλίκο:

$$C = h_{\text{απορ}} / P$$

Οι τιμές του συντελεστή απορροής για κάθε έτος υπολογίζονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 1.6. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής απορροής είναι αδιάστατο μέγεθος.

Ο συντελεστής απορροής για ολόκληρη τη χρονική περίοδο του δείγματος, δηλαδή για τα 10 έτη, υπολογίζεται πάλι ως πηλίκο της συνολικής ποσότητας νερού που απέρρευσε προς αυτήν που έπεσε, δηλαδή:

$$C_{\text{ολικό}} = \frac{\Sigma h_{\text{απορ}}}{\Sigma P} = \frac{6598 \text{ mm}}{12543 \text{ mm}} = 0.526$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι σωστό να υπολογιστεί το $C_{\text{ολικό}}$ ως μέσος όρος των 10 τιμών του συντελεστή απορροής για τα ισάριθμα έτη δειγματοληψίας.

4. Η μέση ετήσια εισροή στον ταμιευτήρα είναι ίση με τη μέση τιμή των ετησίων ποσοτήτων απορροής του ποταμού στη θέση του υπό κατασκευή φράγματος, δηλαδή:

$$\bar{V}_{\text{εισ}} = \frac{\sum V_{\text{ετησιο}}}{10} = \frac{5397386400}{10} = 539738640 \text{ m}^3$$

Η εκμεταλλεύσιμη ποσότητα νερού ανέρχεται στο 82% του τελευταίου μεγέθους, δηλαδή:

$$V_{\text{εκμ}} = 0.82 \cdot 539738640 \text{ m}^3 = 442585685 \text{ m}^3$$

ή με διαίρεση με την επιφάνεια της λεκάνης:

$$h_{\text{εκμ}} = 442585685 / 818 \times 10^6 = 541 \text{ mm}$$

5. Αν θεωρήσουμε απλοποιητικά ότι οι αρδευτικές ανάγκες των φυτών είναι ίσες με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τότε η έκταση της καλλιεργήσιμης επιφάνειας που θα μπορούσε να αρδευτεί με την παραπάνω ποσότητα νερού είναι:

$$A_{\text{καλλιεργ}} = V_{\text{εκμ}} / PET = 442585685 / 0.650 = 680901054 \text{ m}^2 = 680.9 \text{ km}^2.$$