



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση συστημάτων αποχέτευσης ομβρίων στα αρχαία θέατρα

Βασιλική Τρουφάκου

Επιβλέπων: **Νικόλαος Μαμάσης**, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2021

Διάρθρωση της παρουσίασης

Μέρη του αρχαίου θεάτρου

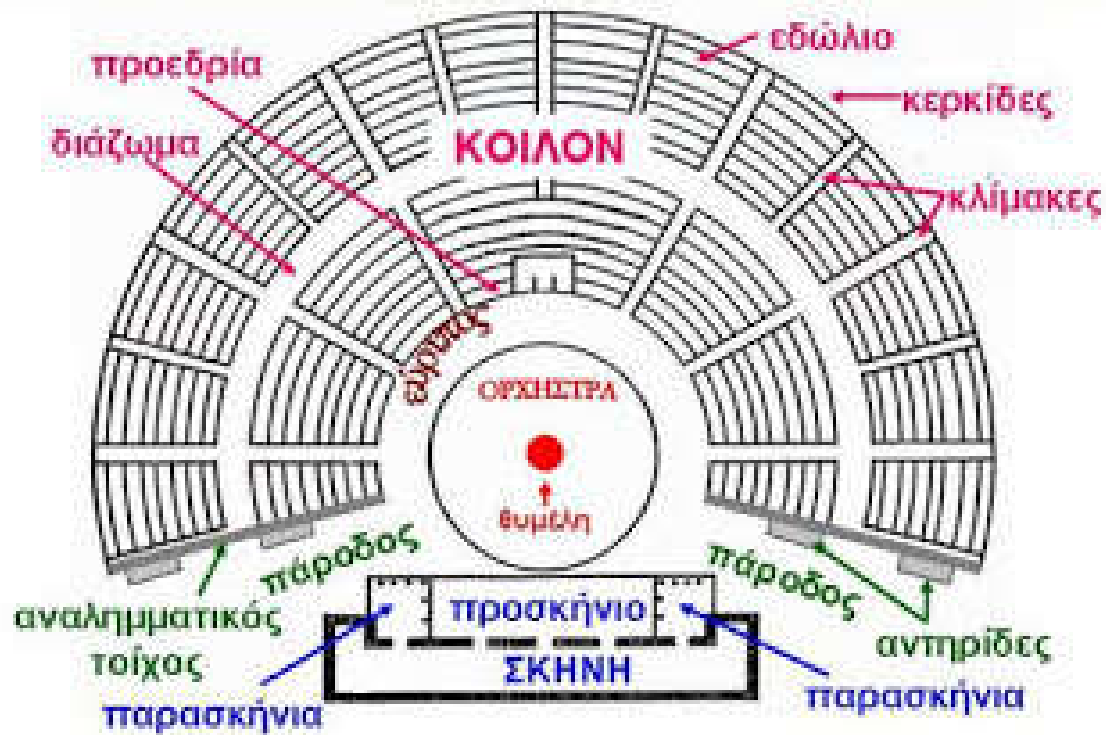
Μεθοδολογία

Δεδομένα και παραδοχές

Μελέτες περίπτωσης

Σύνοψη - Συμπεράσματα - Μελλοντική έρευνα

Μέρη του αρχαίου θεάτρου



Πηγή σχήματος:
https://e_didaskalia.blogspot.com/2016/01/meri-archaiou-theatrou.html



**Αρχαίο
θέατρο
Εφέσου**

Πηγή φωτογραφίας:
<https://www.thoughtco.com/layout-of-the-ancient-greek-theater-118866>

Μεθοδολογία

- Υπολογίζεται η παροχευτικότητα του ευρίπου με βάση τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά (διατομή, κλίση, συντελεστή τραχύτητας)
- Εκτιμάται ο χρόνος συγκέντρωσης της επιφάνειας συλλογής της βροχόπτωσης με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοίλου (εμβαδόν, κλίση, μέγιστη διαδρομή απορροής)
- Υπολογίζεται η κρίσιμη ένταση βροχής η οποία θα προκαλέσει υπερχείλιση του ευρίπου. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται η ορθολογική μέθοδος με βάση το εμβαδόν της επιφάνειας συλλογής και την εκτίμηση του συντελεστή απορροής
- Εκτιμάται η περίοδος επαναφοράς της κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης για το χρόνο συγκέντρωσης με βάση τις όμβριες καμπύλες γειτονικών βροχομετρικών σταθμών

Μεθοδολογία

1. Παροχτευτικότητα του ευρίπου

Σχέση του Manning

$$Q_{Emax} = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{0.5}$$

Q_{Emax} (m³/s): Παροχτευτικότητα ευρίπου

n s/[m^{1/3}]: Συντελεστής τραχύτητας,

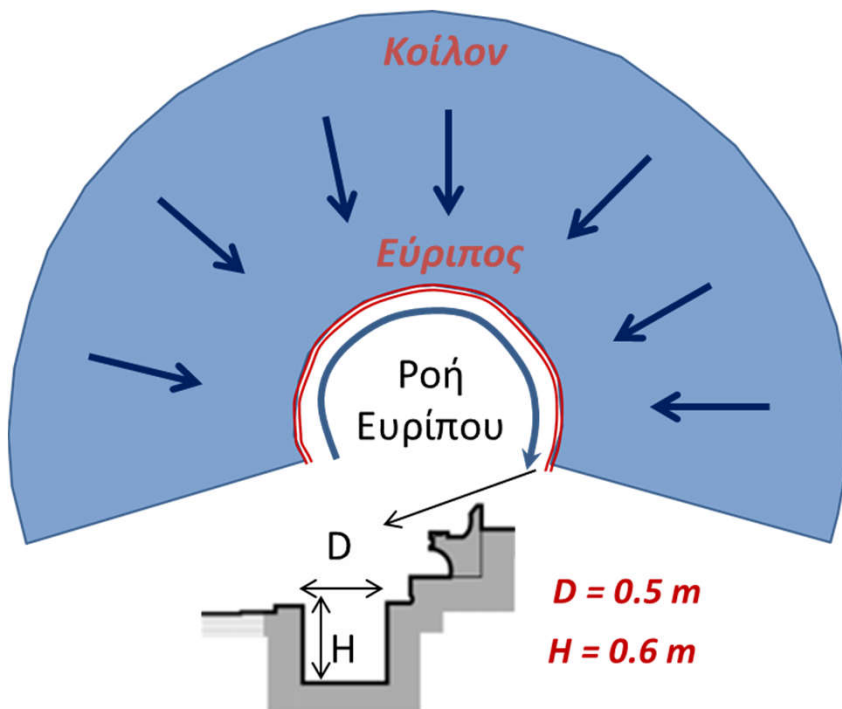
A (m²): Εμβαδόν διατομής,

P (m): Βρεχόμενη περίμετρος,

R (m): Υδραυλική ακτίνα (A/P),

S (m/m): Κλίση αγωγού,

Παράδειγμα υπολογισμών



- Εμβαδόν διατομής $A = 0.3 \text{ m}^2$
- Βρεχόμενη περίμετρος $P = 1.7 \text{ m}$
- Υδραυλική ακτίνα $R = 0.176 \text{ m}$
- Κλίση καναλιού, $S = 0.006 \text{ m/m}$
- Συντελεστής τραχύτητας, $n = 0.02$

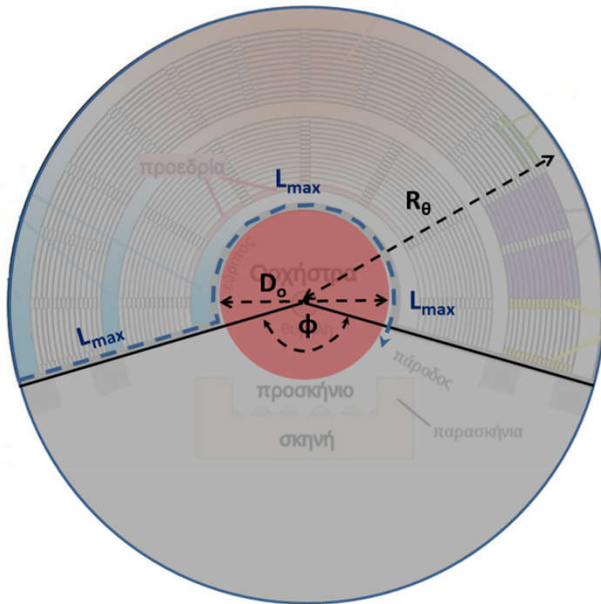
$$Q_{Emax} = \frac{1}{0.02} * 0.3 * 0.176^{\frac{2}{3}} * 0.006^{0.5} = 0.366 \text{ m}^3/\text{s}$$

Μεθοδολογία

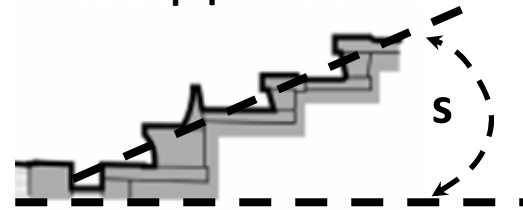
2. Χρόνος συγκέντρωσης του θεάτρου

Θεωρήθηκε ένα «πρότυπο» αρχαίο θέατρο όπου η ορχήστρα και το κοίλον έχουν κατασκευαστεί με οδηγούς δύο ομόκεντρους κύκλους. Η αποστράγγιση του κοίλου μπορεί να γίνεται από μια ή από δύο εξόδους (αμφίπλευρος).

Μία έξοδος αποστράγγισης

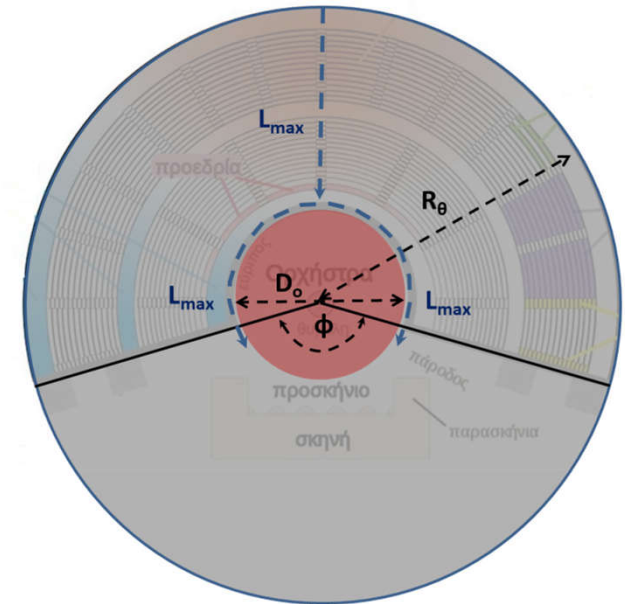


Τομή κοίλου



Διάμετρος ορχήστρας, D_o (m)
 Ακτίνα θεάτρου, R_θ (m)
 Γωνία κοίλου, ϕ ($^\circ$)
 Γωνία κλίσης κοίλου, s ($^\circ$)

Δύο εξοδοι αποστράγγισης



$$A_k(m^2) = (\pi * R_\theta^2 - \pi * D_o^2 / 4) * (360 - \phi) / 360$$

$$L_{max}(m) = (R_\theta - D_o / 2) + 2 * \pi * (D_o / 2) * (360 - \phi) / 360$$

$$\Delta H(m) = (R_\theta - D_o / 2) * \tan(s)$$

$$A_k(m^2) = 0.5 * (\pi * R_\theta^2 - \pi * D_o^2 / 4) * (360 - \phi) / 360$$

$$L_{max}(m) = (R_\theta - D_o / 2) + \pi * (D_o / 2) * (360 - \phi) / 360$$

Σχέση του Giandotti

$$t_c(hr) = \frac{4 * (A_k / 10^6)^{1/2} + 1.5 * (L_{max} / 1000)}{(0.8 * \Delta H^{0.5})}$$

t_c (hr): Χρόνος συγκέντρωσης

A_k (m^2): Επιφάνεια συλλογής

L_{max} (m): Μέγιστη διαδρομή απορροής

ΔH (m): Υψομετρική διαφορά μεταξύ ευρίπτου και μέσου υψομέτρου κοίλου

Μεθοδολογία

3. Κρίσιμη ένταση βροχής που προκαλεί υπερχείλιση

Ορθολογική μέθοδος

$$Q_{Kpeak} = c * i_{tc} * A_K / 3600000$$

- Έκταση κοίλου, A_K (m²)
- Συντελεστής απορροής, c (εκτιμάται με βάση την κατασκευή του κοίλου)
- Χρόνος συγκέντρωσης, t_c (hr) (υπολογίζεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοίλου)
- Ένταση βροχόπτωσης για το χρόνο συγκέντρωσης, i_{tc} (mm/hr)

Ένταση βροχόπτωσης που προκαλεί υπερχείλιση, i_Y (mm/hr)

$$i_Y = \frac{3600000 * Q_{Emax}}{c * A_K}$$

4. Περίοδος επαναφοράς της βροχόπτωσης που υπερχειλίζει ο εύριπος

Όμβρια καμπύλη

$$i = \frac{\lambda * (T^\kappa - \psi)}{(1 + d/\theta)^n}$$

Ένταση βροχής, i (mm/hr)

Περίοδος επαναφοράς, T (έτη)

Διάρκεια βροχής, d (hr)

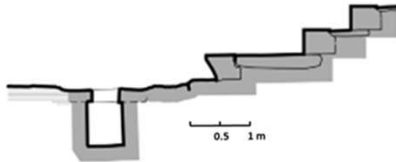
$\lambda, \kappa, \psi, \theta, \eta$ παράμετροι

$$T_Y = \left[\frac{i_Y * (1 + t_c/\theta)^n}{\lambda} - \psi \right]^{1/\kappa}$$

Μεθοδολογία

Διάγραμμα ροής υπολογισμών

Διατομή ευρίπου



Εμβαδόν διατομής
 Βρεχόμενη περίμετρος διατομής
 Κλίση (εκτίμηση)
 Συντελεστής τραχύτητας (εκτίμηση)

Παροχευτικότητα ευρίπου

$$Q_{Emax} = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{0.5}$$

Κρίσιμη ένταση βροχής για την υπερχείλιση του ευρίπου

$$i_Y = \frac{3600000 * Q_{Emax}}{c * A_K}$$

Όμβρια καμπύλη

$$i = \frac{\lambda * (T^{\kappa} - \psi)}{(1 + d/\theta)^n}$$

Γεωμετρικά στοιχεία θεάτρου



Διάμετρος ορχήστρας
 Ακτίνα θεάτρου
 Γωνία κοίλου
 Εμβαδόν κοίλου

Συντελεστής απορροής κοίλου (εκτίμηση)

Μέγιστη διαδρομή απορροής
 Γωνία κλίσης κοίλου (εκτίμηση)

Υψομετρική διαφορά μεταξύ Ευρίπου και μέσου υψομέτρου κοίλου

Χρόνος συγκέντρωσης

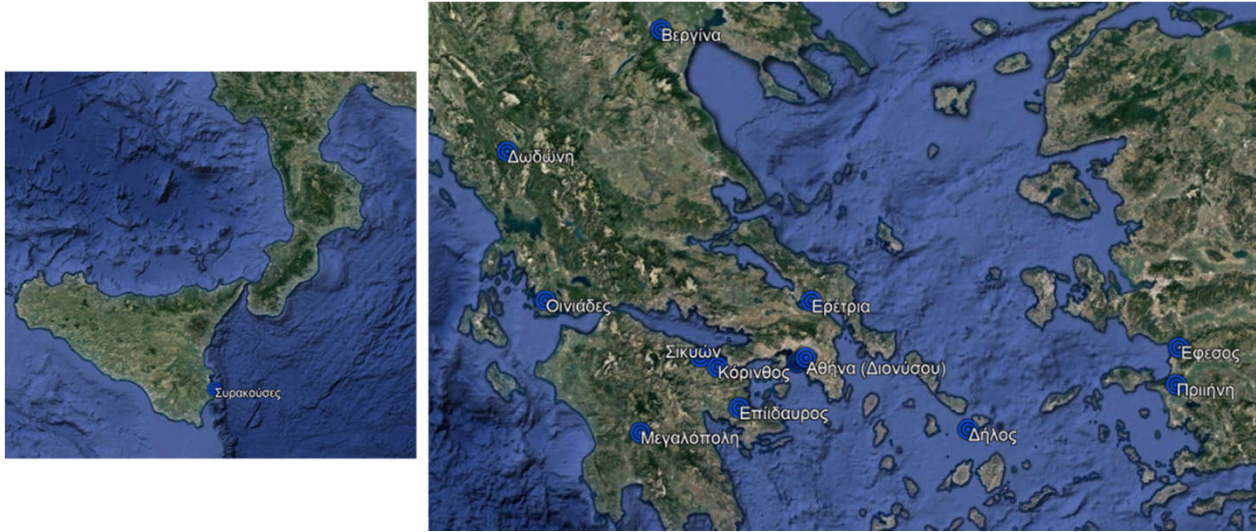
$$t_c \text{ (hr)} = \frac{4 * (A_K / 10^6)^{1/2} + 1.5 * (L_{max} / 1000)}{(0.8 * \Delta H^{0.5})}$$

Περίοδος επαναφοράς της κρίσιμης έντασης για το χρόνο συγκέντρωσης

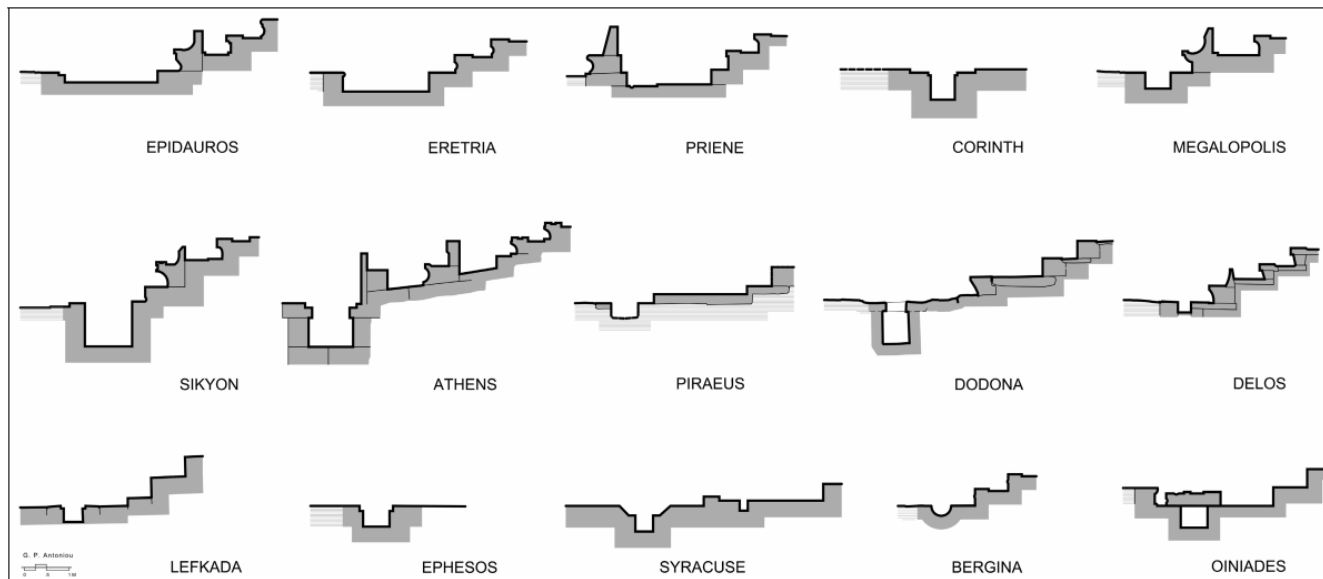
$$T_Y = \left[\frac{i_Y * (1 + t_c/\theta)^n}{\lambda} - \psi \right]^{1/\kappa}$$

Δεδομένα και παραδοχές

Αρχαία θέατρα που εξετάστηκαν



Διατομή Ευρίπου (Πηγή: De Feo et al. 2014.)



Δεδομένα και παραδοχές

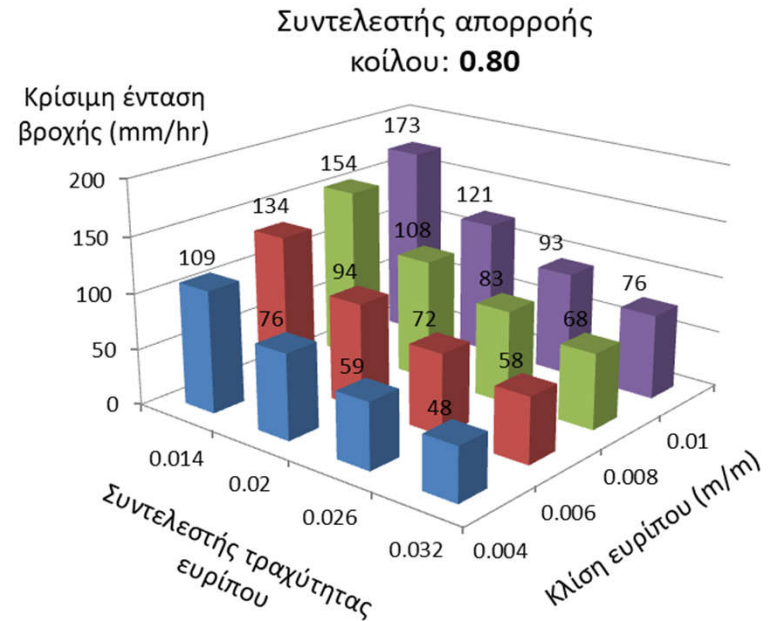
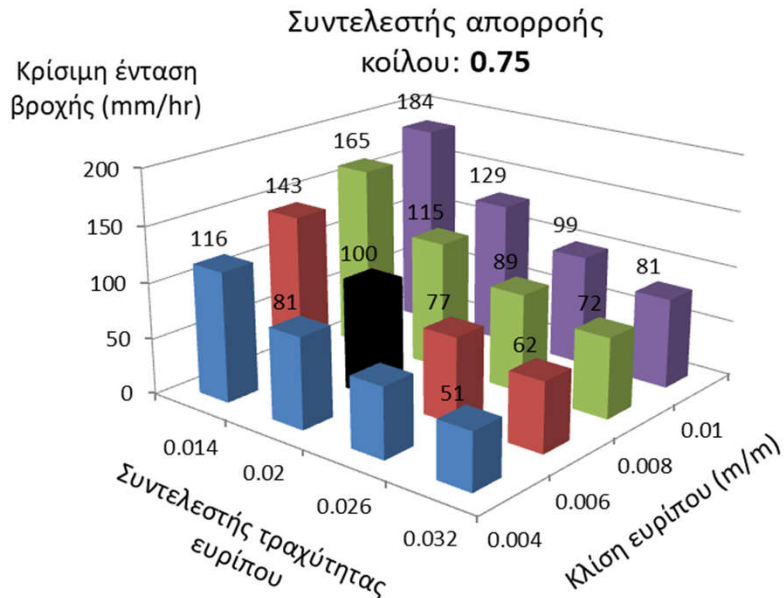
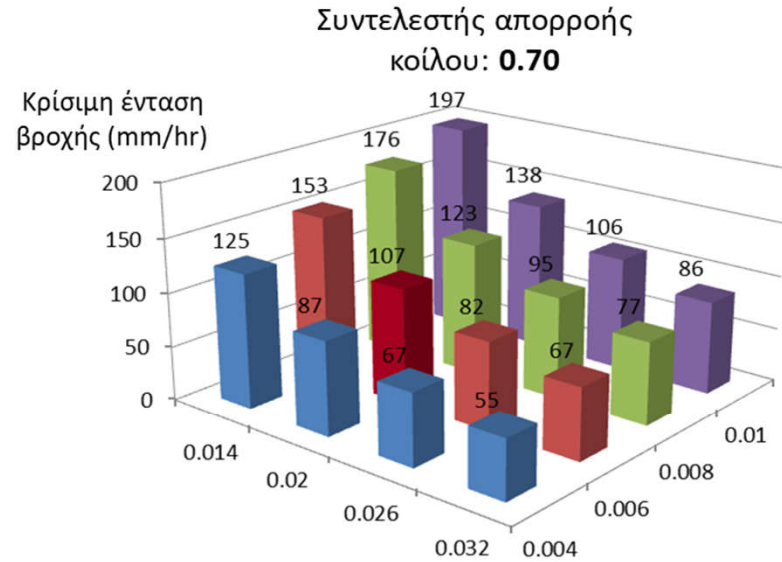
Άλλες παραδοχές

- Τα γεωμετρικά στοιχεία των θεάτρων αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία, σε σχετικές ιστοσελίδες ενώ αξιοποιήθηκε και το Google Earth. Αν το κοίλο είναι πλήρες ημικόκλιο η γωνία του είναι 180° . Τα περισσότερα θέατρα παρουσιάζουν μια υπέρβαση σε κάθε πλευρά που δεν ξεπερνά τις 15° με μέση τιμή τις 8° (Dilke, 1948)
- Ο συντελεστής απορροής των θεάτρων εκτιμήθηκε με βάση τη βιβλιογραφία (0.75)
- Ο συντελεστής τραχύτητας των ευρίπων εκτιμήθηκε με βάση τη βιβλιογραφία (0.02)
- Ο χρόνος συγκέντρωσης κάθε θεάτρου εκτιμήθηκε με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη γωνία κλίσης του κοίλου εφόσον αυτή ήταν διαθέσιμη. Η γωνία κλίσης του ελληνικού κοίλου ήταν μεταξύ 20° και 30° ενώ της ρωμαϊκής cavea ξεπερνούσε τις 30° . Συνήθως η κλίση μεγάλωνε μετά το διάζωμα (Beckers and Borgia, 2007)
- Οι περίοδοι επαναφοράς για διάφορους χρόνους συγκέντρωσης εκτιμήθηκαν με βάση τις όμβριες καμπύλες γειτονικών σταθμών που διατίθενται από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ, 2016)

Δεδομένα και παραδοχές

Ανάλυση ευαισθησίας κρίσιμης έντασης βροχής

- Υποθετικό θέατρο με εμβαδόν κοίλου 7000 m², εύριπο ορθογωνικής διατομής με πλάτος 0.48, ύψος 0.30 m και μία έξοδο αποστράγγισης.
- Το παράδειγμα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε η κρίσιμη ένταση βροχής προκύπτει 100 mm/hr για συντελεστή απορροής 0.75, συντελεστή τραχύτητας 0.02 και κλίση ευρίπου 0.006.



Μελέτες Περίπτωσης

Παράδειγμα υπολογισμών (Θέατρο Εφέσου)



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΑΤΡΟΥ		ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΙΠΟΥ	
Dor (m)	25.8	Διατομή	ΟΡΘ
Rth (m)	71	Πλάτος (m)	0.7
ϕ (°)	180	Ύψος (m)	0.44
s (°)	25	Κλίση (m/m)	0.006
$\tan(s)$	0.47	Συντελεστής τραχύτητας	0.02
Ak (m ²)	7656	Εμβαδόν (m ²)	0.31
Lmax (m)	98.6	Βρεχόμενη περίμετρος (m)	1.58
ΔH (m)	27.1	Υδραυλική ακτίνα (m)	0.19
Χρόνος συγκέντρωσης (hr)	0.120	Ταχύτητα (m/s)	1.30
Χρόνος συγκέντρωσης (min)	7.2	Παροχетеυτικότητα (m ³ /s)	0.401
		Παροχетеυτικότητα (l/s)	401

ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΗ ΕΥΡΙΠΟΥ		ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ	
Ak (m ²)	7656	Σταθμός	Σάμος
c	0.75	κ	0.093
Ένταση υπερχειλίσσης (mm/hr)	251	λ'	477.3
		ψ'	0.744
		θ	0.134
		η	0.741

Περίοδος επαναφοράς για διάφορους χρόνους συγκέντρωσης

Χρόνος συγκέντρωσης (min)	5	10	7.2
Κρίσιμο ύψος (mm)	21.0	41.9	30.1
Περίοδος επαναφοράς (έτη)	77	306	146

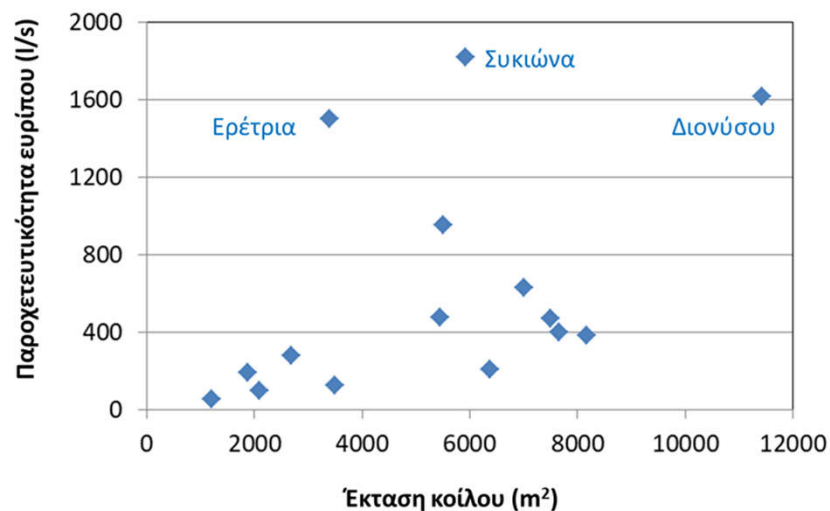
Σύνοψη

Θέατρο	Έκταση κοίλου (m ²)	Παροχетеυ- τικότητα ευρίπου (l/s)	Κρίσιμη ένταση υπερχείλισης (mm/hr)	Χρόνος συγκέντρωσης (min)	Κρίσιμο ύψος (mm)	Περίοδος επαναφοράς (έτη)
Βεργίνας	2094	94.8	326	4.7	16.9	190
Δήλου	1209	52.2	207	4.2	14.6	188
Διονύσου	11427	1615.2	678	7.9	89.9	>10000
Δωδώνης	6999	631.4	433	6.8	48.9	>10000
Επιδαύρου	7496	470.1	301	6.9	34.7	71
Ερέτριας	3401	1501.6	2119	6.0	211.9	>10000
Εφέσου	7656	401.0	251	7.2	30.1	146
Κορίνθου	5457	473.1	416	6.9	47.8	474
Λευκάδας	3500	122.1	167	5.7	16.0	1494
Μεγαλόπολης	6384	205.6	155	7.2	18.6	24
Οινιάδων	2682	277.3	496	5.2	43.1	>10000
Πειραιά	1885	191.0	486	5.2	42.6	>10000
Πριήνης	5517	950.9	827	6.6	91.6	>10000
Συκιώνας	5924	1819.6	1474	6.9	170.5	>10000
Συρακουσών	8168	380.5	224	7.3	37.3	1181

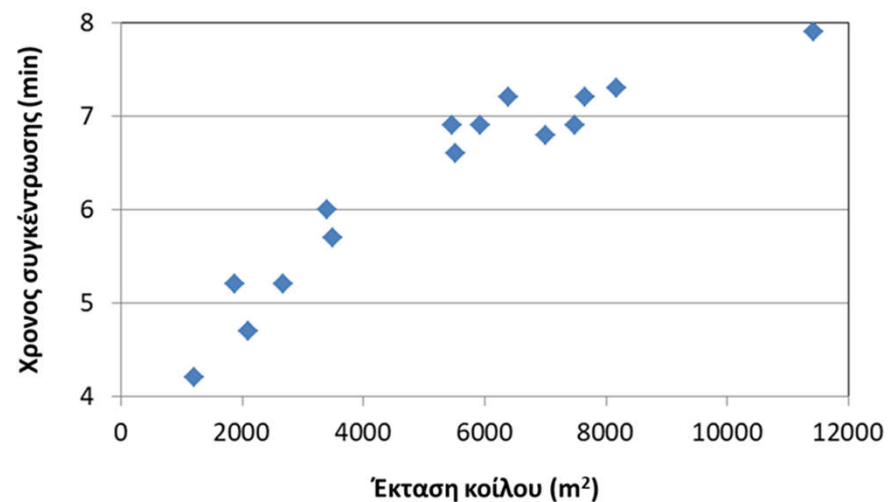
Σύνοψη

Συσχετίσεις μεγεθών

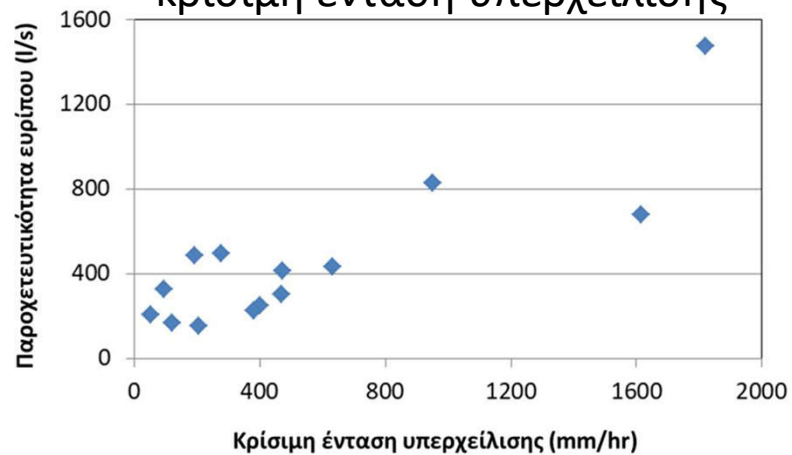
Παροχетеυτικότητα ευρίπου -
έκταση κοίλου



Χρόνος συγκέντρωσης του θεάτρου -
έκταση κοίλου



Παροχетеυτικότητα ευρίπου -
κρίσιμη ένταση υπερχείλισης



Συμπεράσματα

- Οι παροχετευτικότητες των ευρίπων κυμαίνονται από 50-1600 l/s, οι κρίσιμες εντάσεις υπερχείλισης από 200 έως 2000 mm/hr και οι χρόνοι συγκέντρωσης των κοίλων από 4 έως 8 min
- Σημαντική συσχέτιση (α) μεταξύ της έκτασης του κοίλου και της παροχετευτικότητας του ευρίπου, (β) μεταξύ της έκτασης του κοίλου και του χρόνου συγκέντρωσης και (γ) μεταξύ της παροχετευτικότητας του ευρίπου και της κρίσιμης έντασης υπερχείλισης
- Οι διατομές των ευρίπων στα 13 από τα 15 θέατρα που εξετάστηκαν ήταν ορθογωνικές
- Η αντιπλημμυρική προστασία ήταν επαρκής. Η περίοδος επαναφοράς της έντασης βροχής υπερχείλισης για το χρόνο συγκέντρωσης εκτιμήθηκε σε έξι θέατρα μεγαλύτερη από 10000 έτη, ενώ μόνο σε δύο θέατρα εκτιμήθηκε κάτω από 100 έτη (Μεγαλόπολης 24 έτη, Επιδαύρου, 71 έτη)
- Σε πολλές περιπτώσεις οι εύριποι ήταν πολύ μεγαλύτεροι από όσο χρειαζόταν ώστε να εξασφαλίζεται η αντιπλημμυρική προστασία της ορχήστρας. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο τρόπος κατασκευής τους ίσως να συνδέεται με αλλά αρχιτεκτονικά ή αισθητικά κριτήρια

Μελλοντική έρευνα

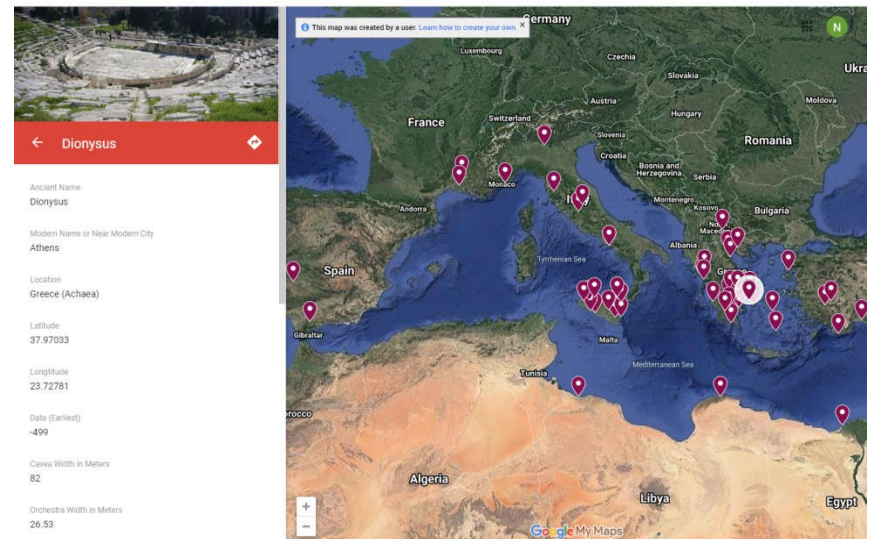
Λεπτομερέστερη αποτύπωση των αρχαίων θεάτρων. Θα πρέπει να προσδιοριστούν ακριβέστερα για κάθε θέατρο: (α) το σχήμα, οι διαστάσεις, η κλίση, ο συντελεστής απορροής και ο χρόνος συγκέντρωσης του κοίλου και (β) η κλίση, η τραχύτητα και ο τρόπος αποστράγγισης του ευρίπου

Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε περισσότερα θέατρα. Μόνο στη βάση δεδομένων του Παραρτήματος υπάρχουν 127 θέατρα.

Καταγραφή των χαρακτηριστικών του συνόλου των υδραυλικών έργων κάθε θεάτρου. Σε αυτά περιλαμβάνονται δεξαμενές αποθήκευσης ομβρίων, κανάλια αποχέτευσης περιμετρικά του κοίλου, υδραυλικές κατασκευές για την εκτέλεση ναυμαχιών κ.α.

<https://tinyurl.com/wjmkh78j>

Δημιουργία γεωγραφικής βάσης δεδομένων αρχαίων θεάτρων. Αυτή θα περιλαμβάνει το σύνολο των γεωμετρικών, υδραυλικών, κατασκευαστικών και λειτουργικών (έτος κατασκευής, αριθμός θεατών, προσανατολισμός) χαρακτηριστικών κάθε θεάτρου.



Σας ευχαριστώ

