



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

## Στοχαστική ανάλυση της χωροχρονικής μεταβολής της βροχόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου

Βασίλης Κουκοράβας

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτρης Κουτσογιάννης

Επιβλέπων διδάκτωρ: Γιάννης Μαρκόνης

Αθήνα, Μάρτιος 2017

# Σημασία κλίματος και βροχοπτώσεων και ανάγκη διαχείρισης υδατικών πόρων

- Ιστορικά, η διαθεσιμότητα και η διαχείριση υδατικών πόρων έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία αστικών κέντρων αλλά και στον αγροτικό τομέα και την κτηνοτροφία.
- Η κατανόηση και πρόβλεψη της εξέλιξης του κλίματος και του βροχοπτώσιου καθεστώτος είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία και την κοινωνία. (πρωτογενής παραγωγή, ύδρευση, άρδευση – βάση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων)

Ωστόσο, η βροχόπτωση εκτός από φυσικό μηχανισμό ανατροφοδότησης των (υπόγειων και επιφανειακών) υδροφορέων αποτελεί πηγή κινδύνων για τα σύγχρονα αστικά κέντρα.

- Σχεδιασμός και διαχείριση υδατικών πόρων
  - Υπολογισμός χωρητικότητας ταμιευτήρων, εκμετάλλευση του υδατικού ενεργειακού δυναμικού (ΥΗΕ)
  - Ανάπτυξη και συνδυασμός υδατικών συστημάτων (π.χ. επιφανειακά και υπόγεια ύδατα) και βελτιστοποίηση της διαχείρισής τους (π.χ. υδραγωγείο Αθήνας)

- Προστασία από έντονα καιρικά φαινόμενα
  - Αντιπλημμυρικά έργα (π.χ. διόδευση πλημμύρας σε αστικά κέντρα, εκτίμηση πλημμυρικών παροχών)
  - Παράκτια προστασία (π.χ. κυματοθραύστες, προστασία ακτών και λιμένων)

# Στόχος εργασίας

Εμπειρική προσέγγιση

- Μελέτη των κλιματικών χαρακτηριστικών της Μεσογείου και του βροχοπτώσιου καθεστώτος
- Ανάδειξη των κυριότερων μηχανισμών γένεσης και εξέλιξης των καιρικών συστημάτων που προκαλούν τη βροχόπτωση

Στοχαστική προσέγγιση

- Διερεύνηση των ετεροσυσχετίσεων των ημερήσιων βροχοπτώσεων χωρικά και χρονικά
- Ανάπτυξη ενός στοχαστικού μοντέλου για τη βελτίωση της πρόγνωσης της βροχόπτωσης (ή μη) βασιζόμενο στις πιθανότητες

- Έλεγχος του μοντέλου και αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με τα στοιχεία της εμπειρικής προσέγγισης
- Επισήμανση της χρησιμότητας των αποτελεσμάτων και προτάσεις για την εξέλιξη του μοντέλου

# Κλίμα και γεωμορφολογία Μεσογείου



Προέλευση: [euratlas.com](http://euratlas.com) μετά από προσαρμογή.

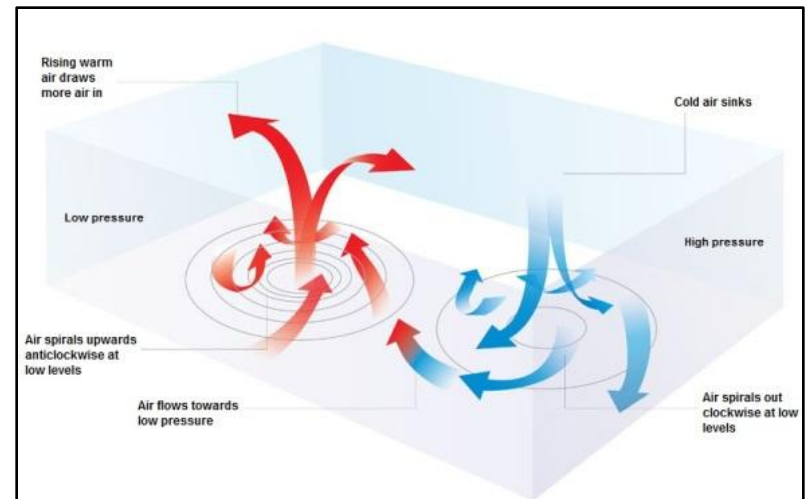
# Χαρακτηριστικά κυκλωνικών και αντικυκλωνικών συστημάτων

## • Κυκλώνες

- Περιοχή χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, σπειροειδής ανοδική κίνηση ανέμων με αντιωρολογιακή φορά (στο βόρειο ημισφαίριο)
- Κυκλογένεση: το σύνολο των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την ανάπτυξη ενός κυκλώνα
- Η κυκλογένεση εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στην τροπόσφαιρα σε συνδυασμό με τα ρεύματα ισχυρών ανέμων (jet stream) κοντά στο όριο τροπόσφαιρας – στρατόσφαιρας.
- Η ψύξη των ανερχόμενων θερμών και υγρών μαζών προκαλεί συμπύκνωση της υγρασίας δημιουργώντας νέφη βροχόπτωσης (π.χ. cumulonimbus clouds – σωρειτομελανίτες).

## • Αντικυκλώνες

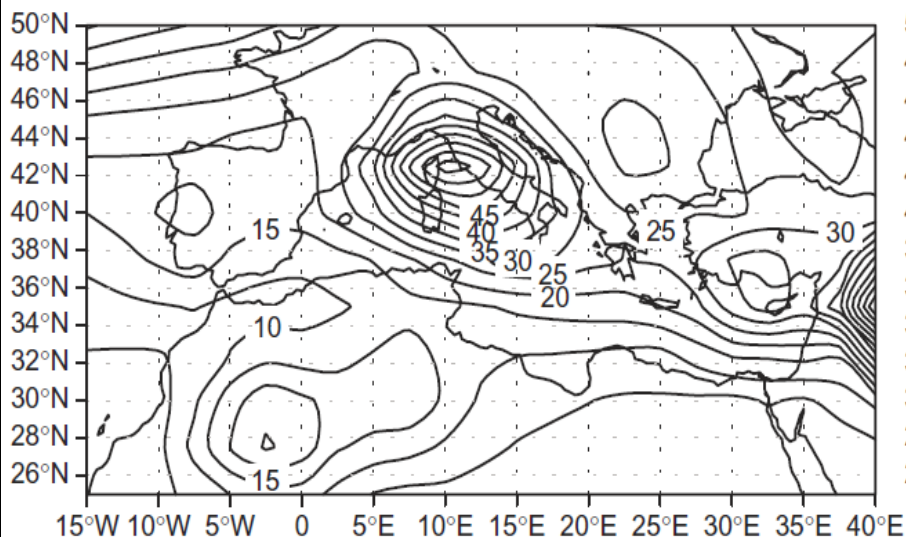
- Περιοχή υψηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, σπειροειδής καθοδική κίνηση ανέμων με ωρολογιακή φορά
- Καθοδική πορεία ψυχρών αερίων μαζών οι οποίες αποκλίνουν φτάνοντας στην επιφάνεια της γης.
- Προκαλούν ήπιους ανέμους, καθαρό ουρανό και ξηρές συνθήκες.



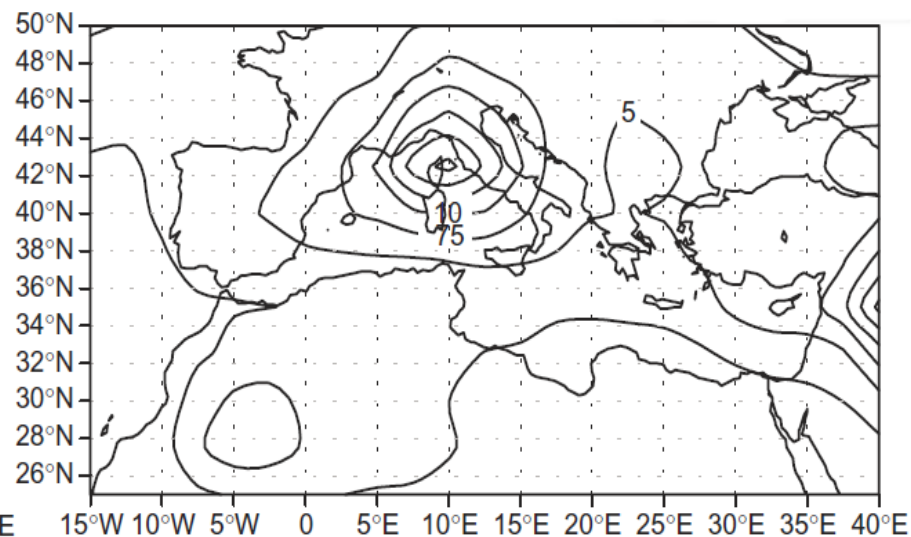
Πηγή: [metoffice.gov.uk](http://metoffice.gov.uk)

## Πιο συγκεκριμένα, για την περίοδο 1957-2002 στη λεκάνη της Μεσογείου:

α) cyclone track density



β) cyclogenesis



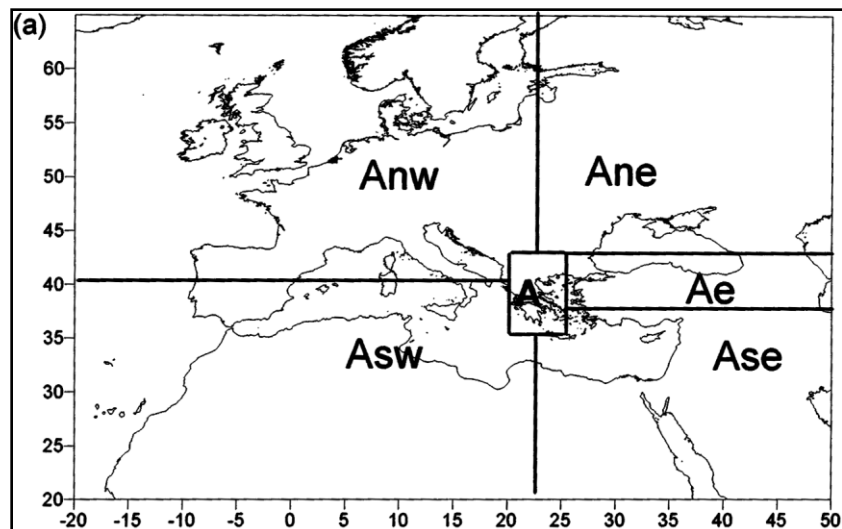
Πηγή: P. Lionello, 2012

- Η πυκνότητα κυκλωνικής δραστηριότητας είναι ιδιαίτερα αυξημένη στον κόλπο της Γένοβας και την Ιταλία.
- Υψηλή δραστηριότητα κυκλώνων στην Κύπρο (οροσειρά του Ταύρου), Βαλκάνια και νότια της οροσειράς του Άτλαντα.

- Κυριότερη κυκλογενετική περιοχή ο κόλπος της Γένοβας.
- Δευτερεύουσα κυκλογενετική περιοχή η οροσειρά του Άτλαντα.

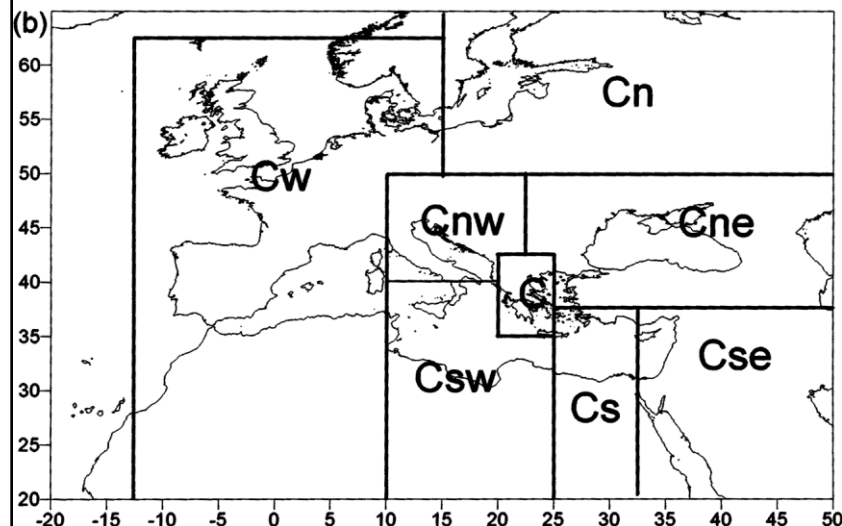


Κατάταξη κέντρων (a) αντικυκλωνικών και (b) κυκλωνικών συστημάτων με βάση την επιρροή τους στις βροχοπτώσεις της Ελλάδας κατά την περίοδο 1957 - 1997.



➤ Οι κυκλωνικοί τύποι C και Csw συνδέονται με ποσοστό >60% της συνολικής χειμερινής βροχόπτωσης στην Ελλάδα.

➤ Οι αντικυκλωνικοί τύποι καθώς και οι κυκλώνικοί τύποι Cse και Cn συνεισφέρουν σε πολύ μικρό ποσοστό της χειμερινής βροχόπτωσης.



➤ Το ισχυρό κέντρο χαμηλής πίεσης πάνω από την Ιταλία ευθύνεται για μεγάλο ποσοστό των χειμερινών βροχοπτώσεων στην Ελλάδα. Κυκλώνες από τη Γένοβα, κινούμενοι νοτιοανατολικά διαμέσω της Ιταλίας και της Αδριατικής επηρεάζουν το Ιόνιο και καταλήγουν στις νότιες ακτές της Τουρκίας.

# Στοχαστικές Μέθοδοι Ανάλυσης

## Συντελεστής Αυτο/Ετεροσυσχέτισης

- Συντελεστής αυτοσυσχέτισης

$$\rho(t, \tau) = \frac{\text{Cov}[x(t), x(t + \tau)]}{\sqrt{\text{Var}[x(t)] \text{Var}[x(t + \tau)]}}$$

- Συντελεστής ετεροσυσχέτισης

$$r_{xy}(t, \tau) = \frac{\text{Cov}[x(t), y(t + \tau)]}{\sqrt{\text{Var}[x(t)] \text{Var}[y(t + \tau)]}}$$

## Πιθανότητες και Αλυσίδες Μαρκόφ

- Αδέσμευτη πιθανότητα

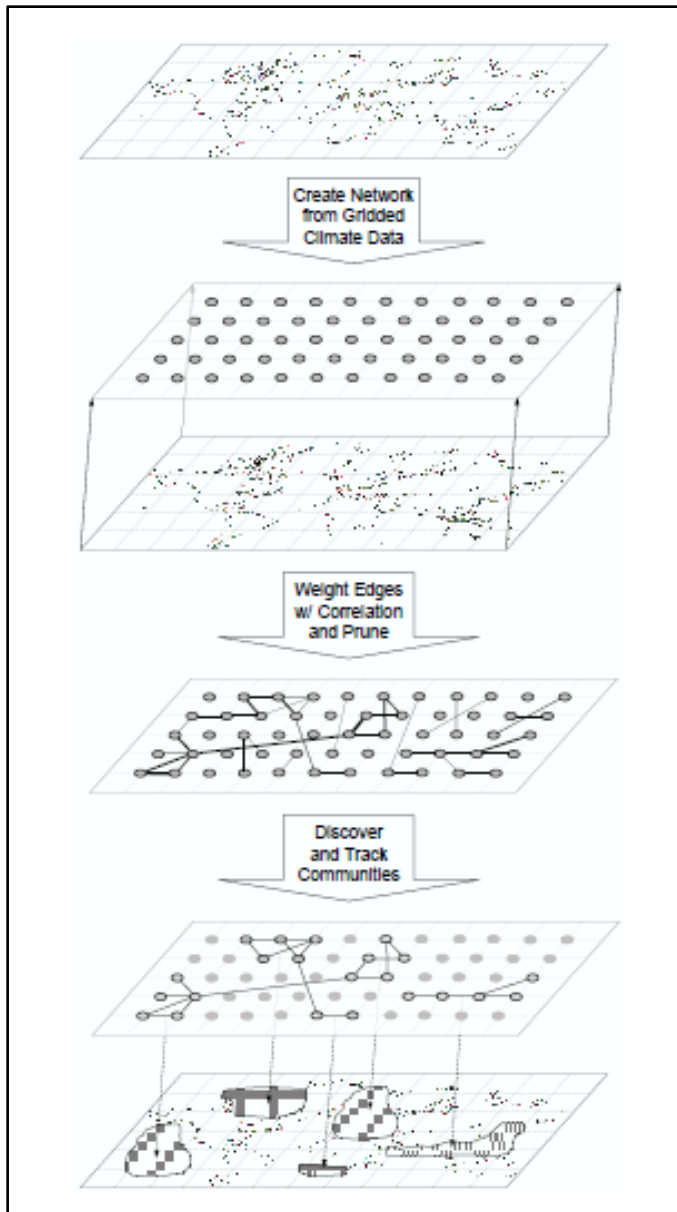
$$P(A) = \frac{\text{Αριθμός πειραμάτων με αποτέλεσμα A}}{\text{Συνολικός αριθμός πειραμάτων}}$$

- Αλυσίδες Μαρκόφ (πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης)

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} w & d \end{matrix} \\ \begin{matrix} w \\ d \end{matrix} & \begin{pmatrix} a & 1-a \\ 1-b & b \end{pmatrix} \end{matrix}$$



# Παράδειγμα δικτύου ετεροσυσχετίσεων



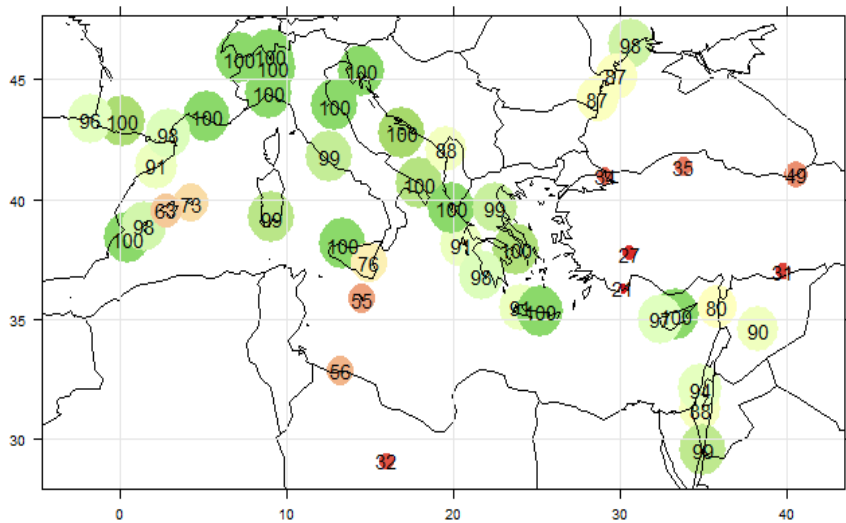
- Δημιουργία ενός δικτύου με την αποτύπωση των σημείων – κόμβων τα δεδομένα των οποίων θα χρησιμοποιηθούν

- Υπολογισμός του συντελεστή ετεροσυσχέτισης των κλιματικών μεταβλητών μεταξύ των κόμβων του δικτύου

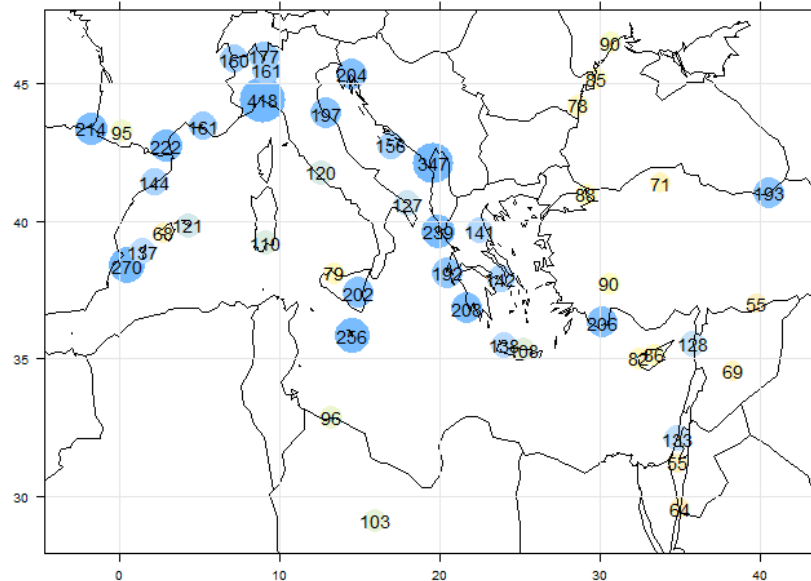
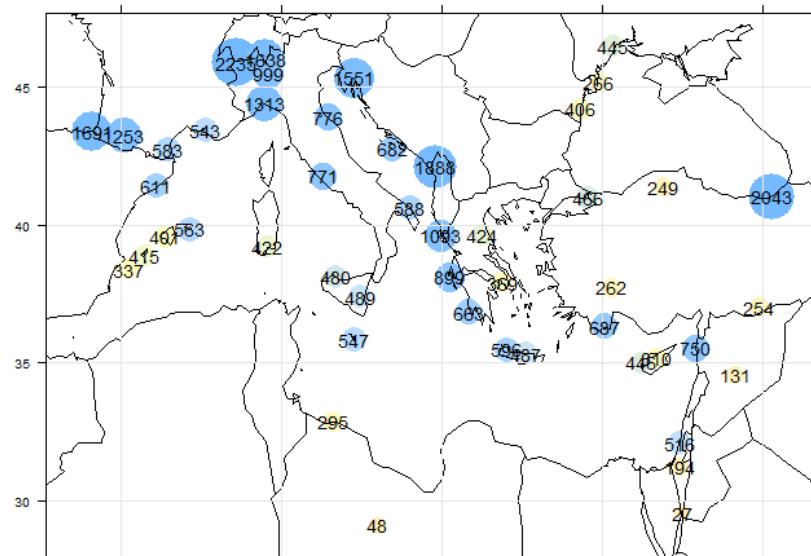
- Προσθήκη σταθμισμένων συνδέσμων (με μόνο κριτήριο το βαθμό ετεροσυσχέτισης των μεταβλητών) μεταξύ των κόμβων και απομόνωση των ισχυρότερων από αυτούς

- Ανίχνευση «κοινοτήτων» υψηλών ετεροσυσχετίσεων και μελέτη του τρόπου σύνδεσης και αλληλεπίδρασης με παρακείμενες περιοχές

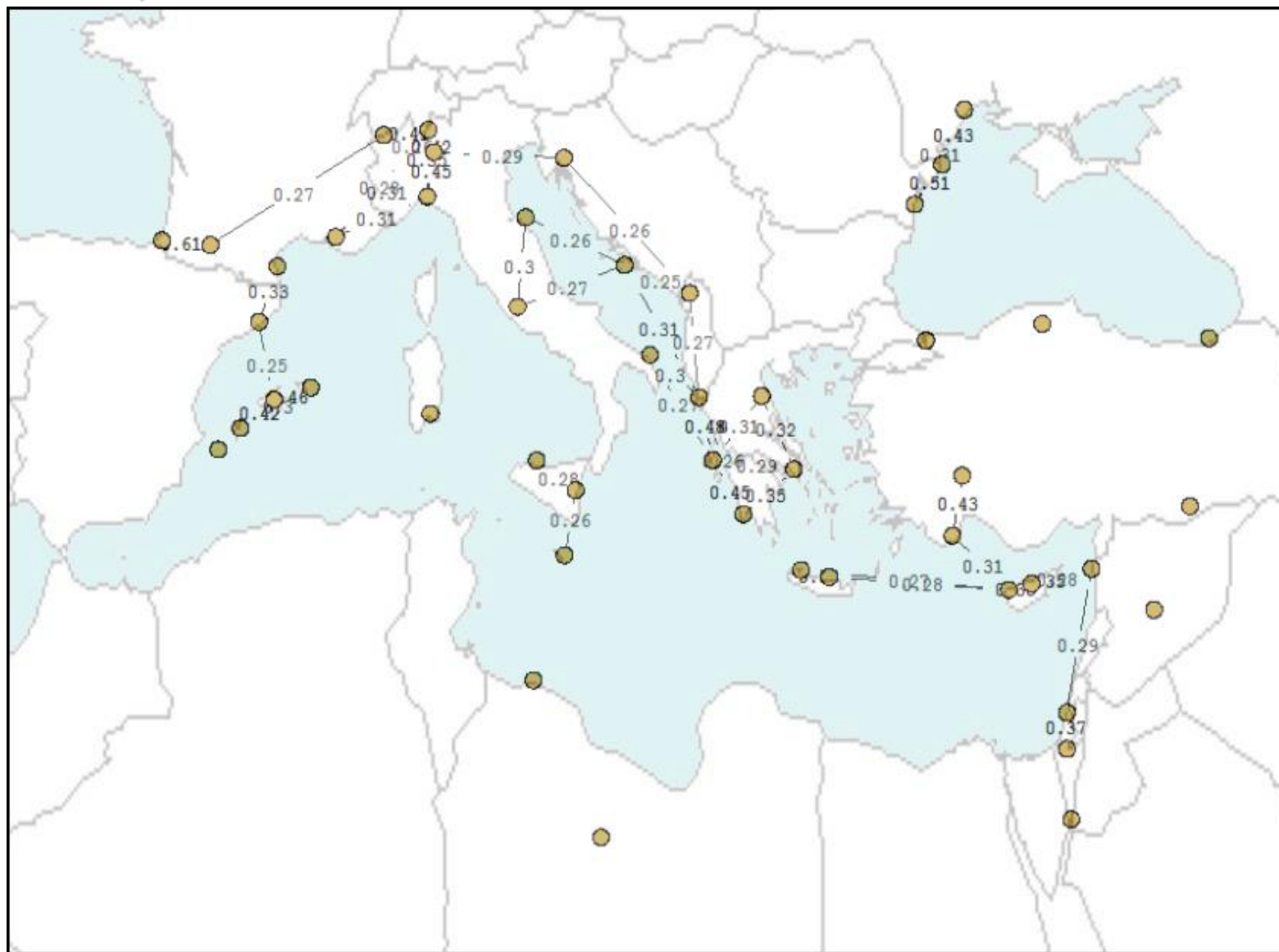
# Χάρτης κατανομής Υ/Μ σταθμών και πληρότητα καταγραφών βροχοπτώσεων



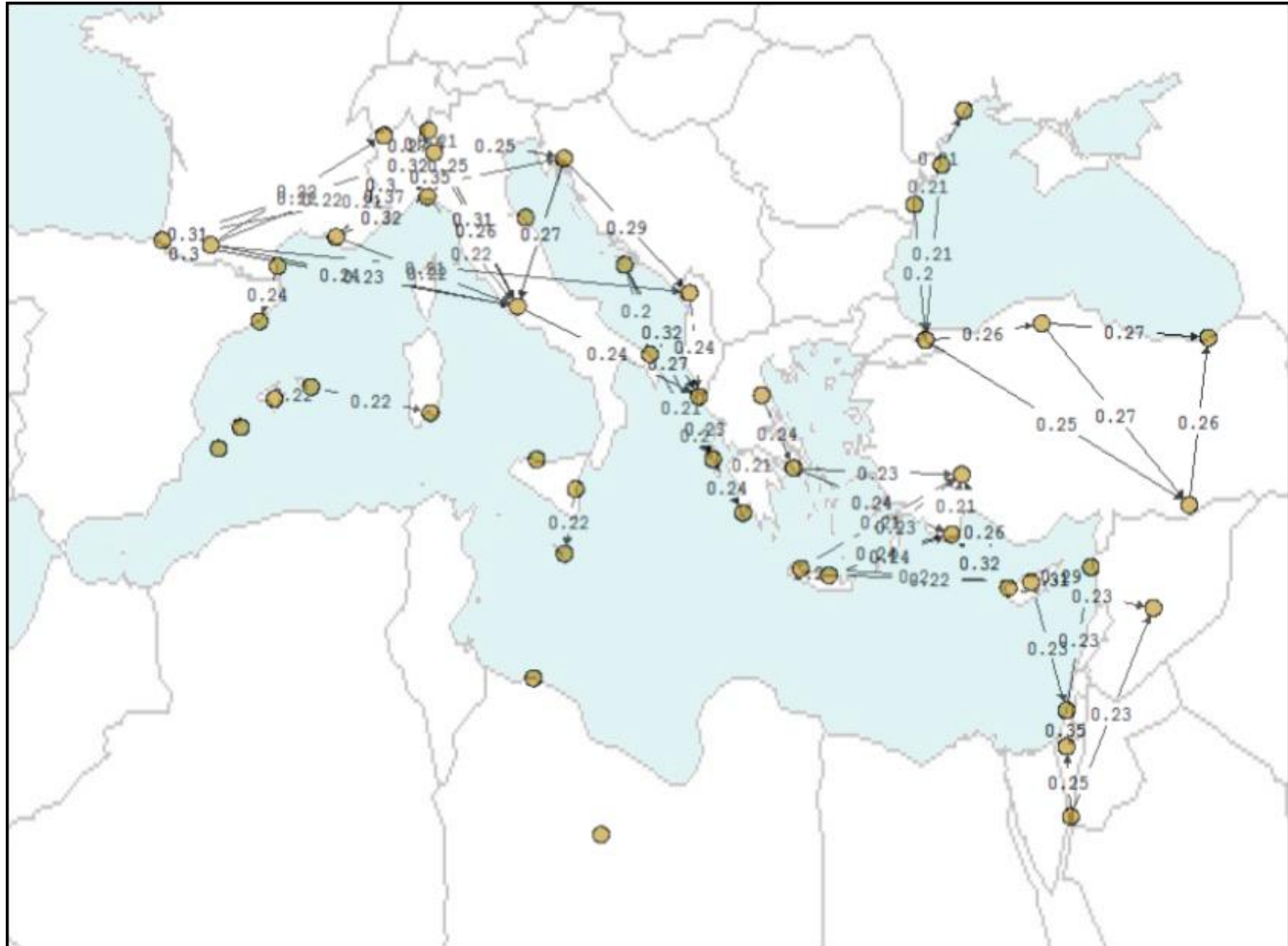
# Μέσες ετήσιες και μέγιστες ημερήσιες βροχοπτώσεις Υ/Μ σταθμών



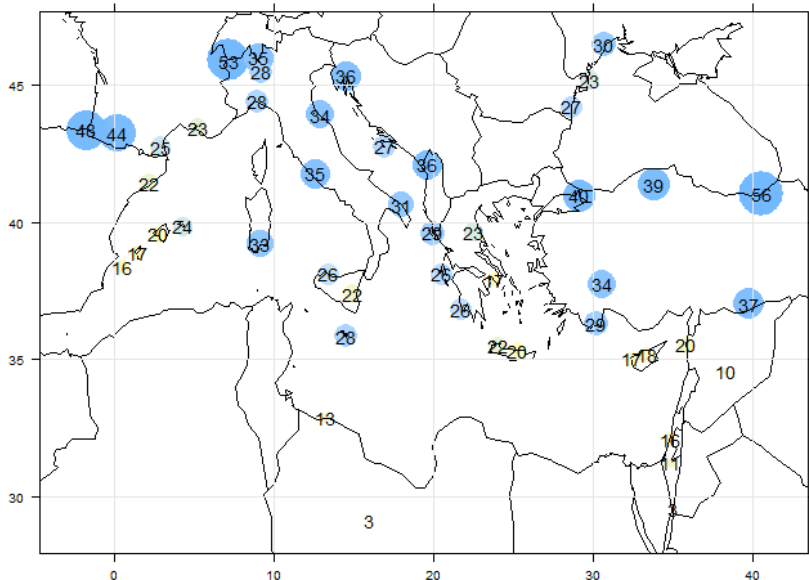
# Χάρτης μεγίστων ετεροσυσχετίσεων των ημερήσιων βροχοπτώσεων όλου του έτους



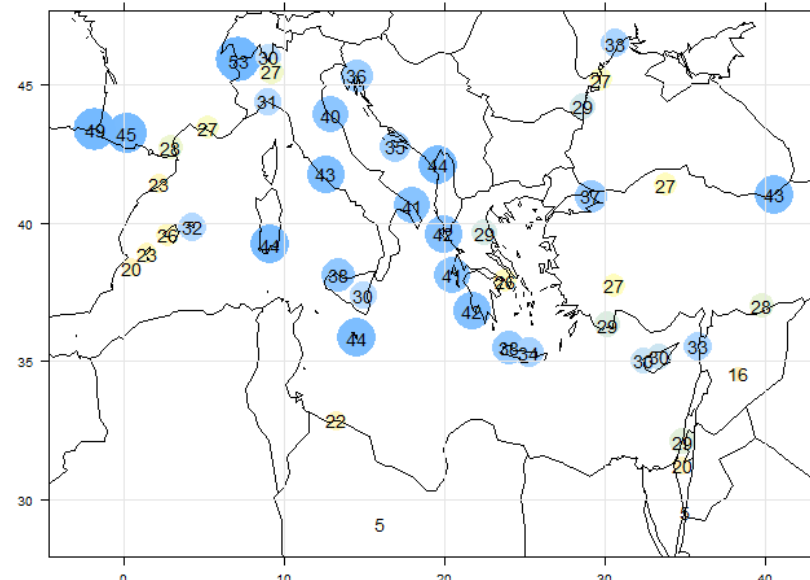
# Συντελεστής ετεροσυσχέτισης ημερήσιων βροχοπτώσεων υγρής περιόδου για υστέρηση μίας ημέρας



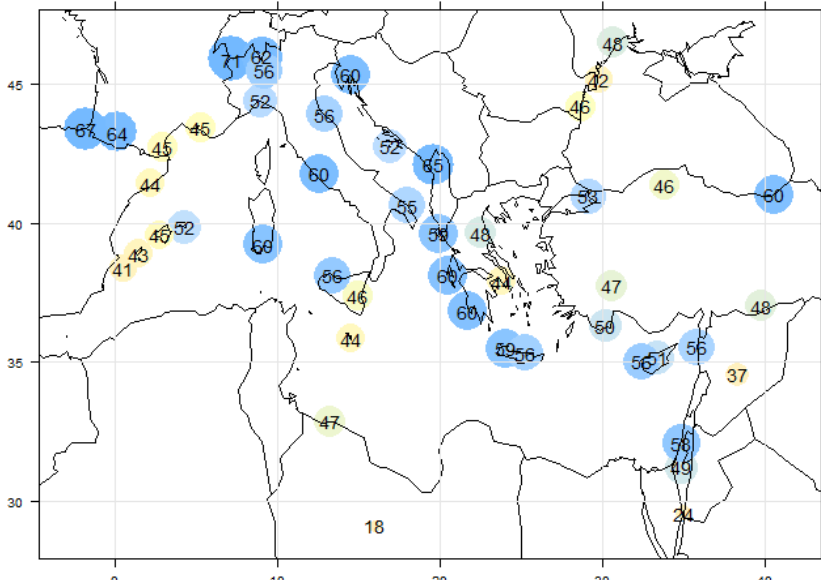
# Αδέσμευτες πιθανότητες και πιθανότητες διαδοχικών βροχοπτώσεων



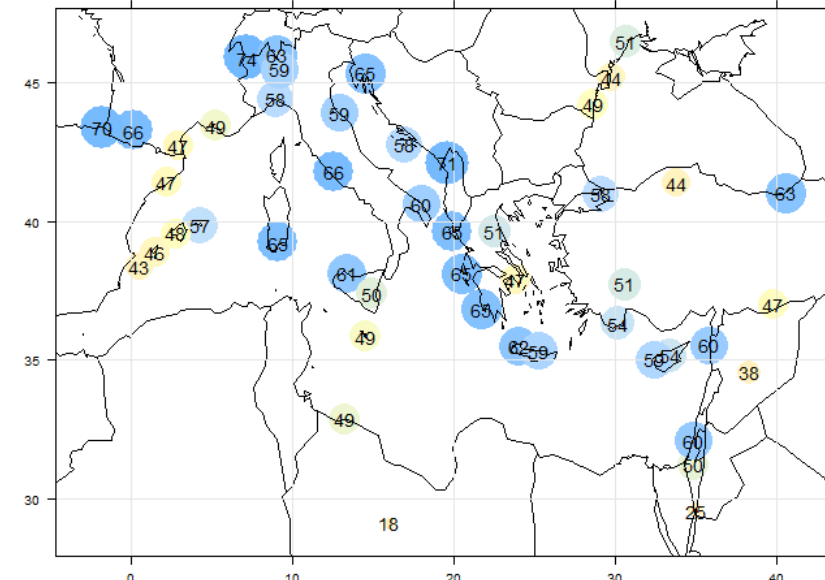
Πιθανότητα βροχόπτωσης καθόλη τη διάρκεια του έτους



Πιθανότητα βροχόπτωσης κατά την υγρή περίοδο



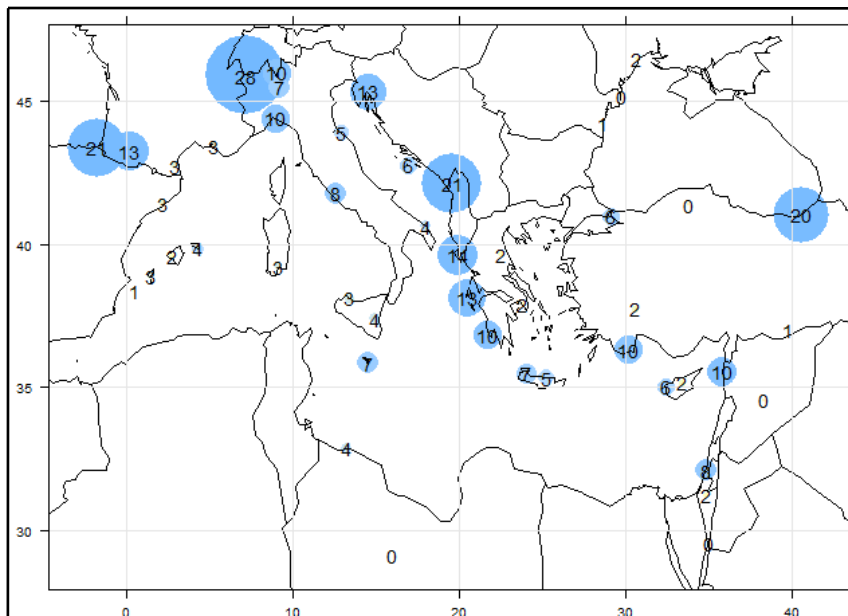
Πιθανότητα βροχόπτωσης έπειτα από βροχερή μέρα καθόλη τη διάρκεια του έτους



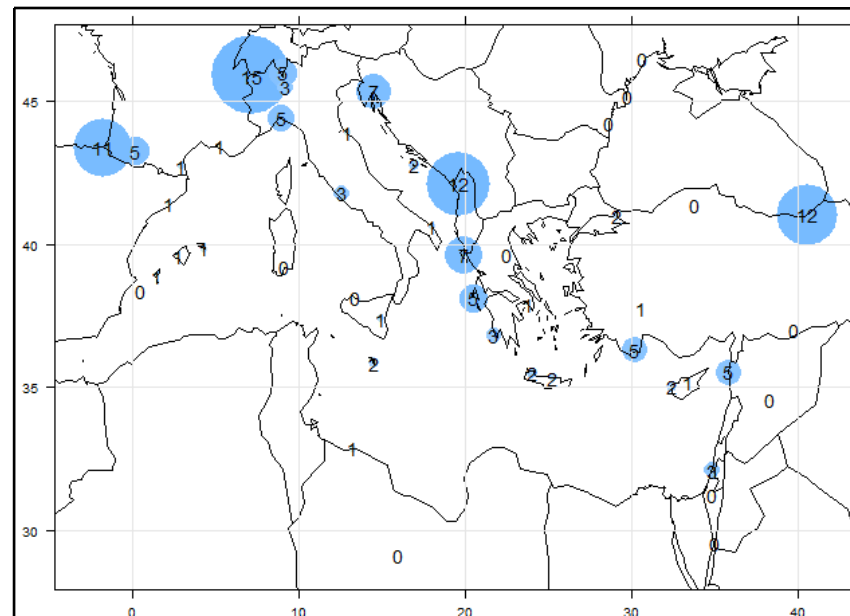
Πιθανότητα βροχόπτωσης έπειτα από βροχερή μέρα κατά την υγρή περίοδο



## Πιθανότητα παρατήρησης διαδοχικών βροχερών ημερών



Πιθανότητα βροχόπτωσης άνω των 5mm τουλάχιστον 3 από τις 5 συνεχόμενες ημέρες κατά την υγρή περίοδο

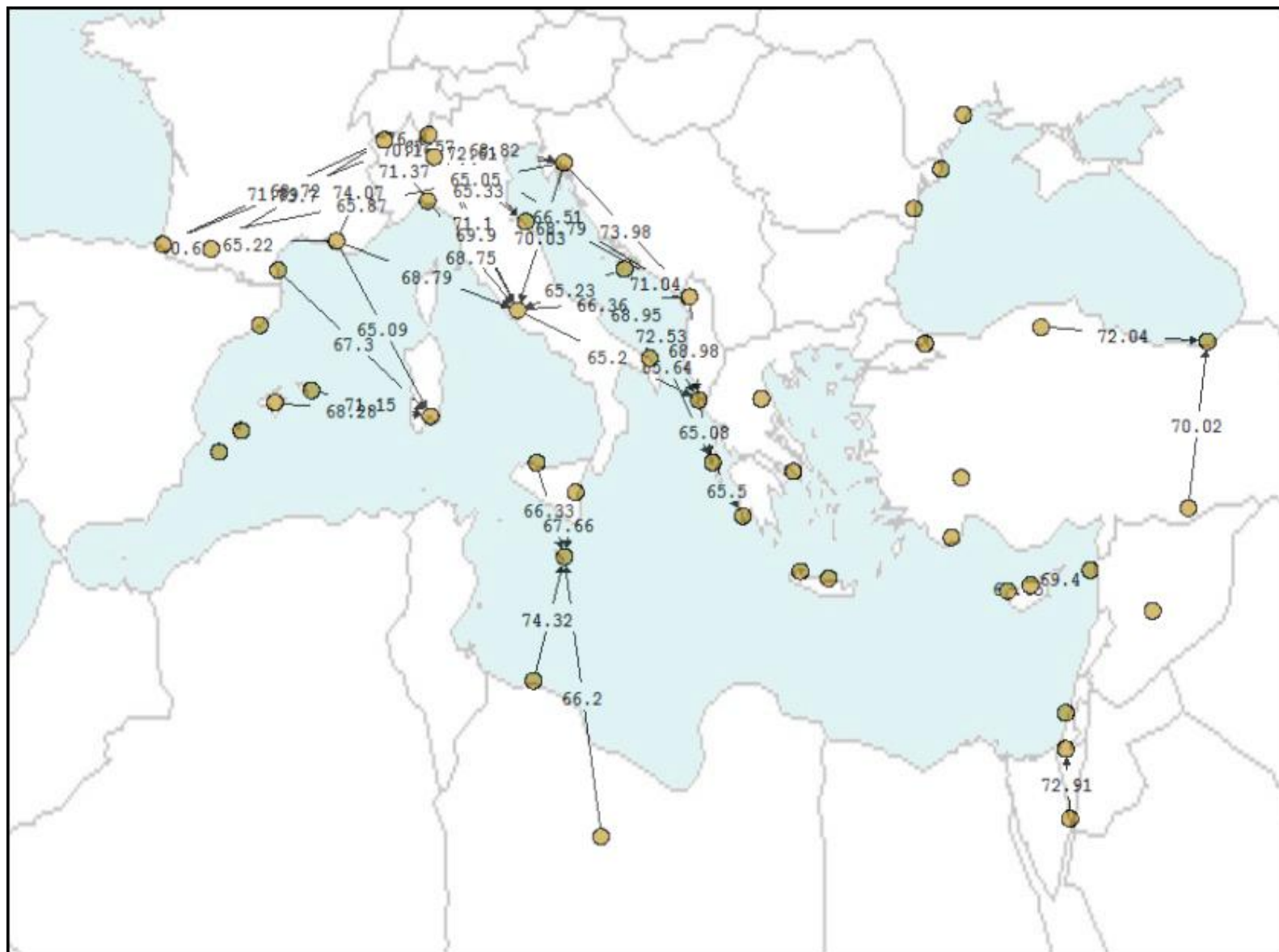


Πιθανότητα βροχόπτωσης άνω των 10mm τουλάχιστον 5 από τις 5 συνεχόμενες ημέρες κατά την υγρή περίοδο

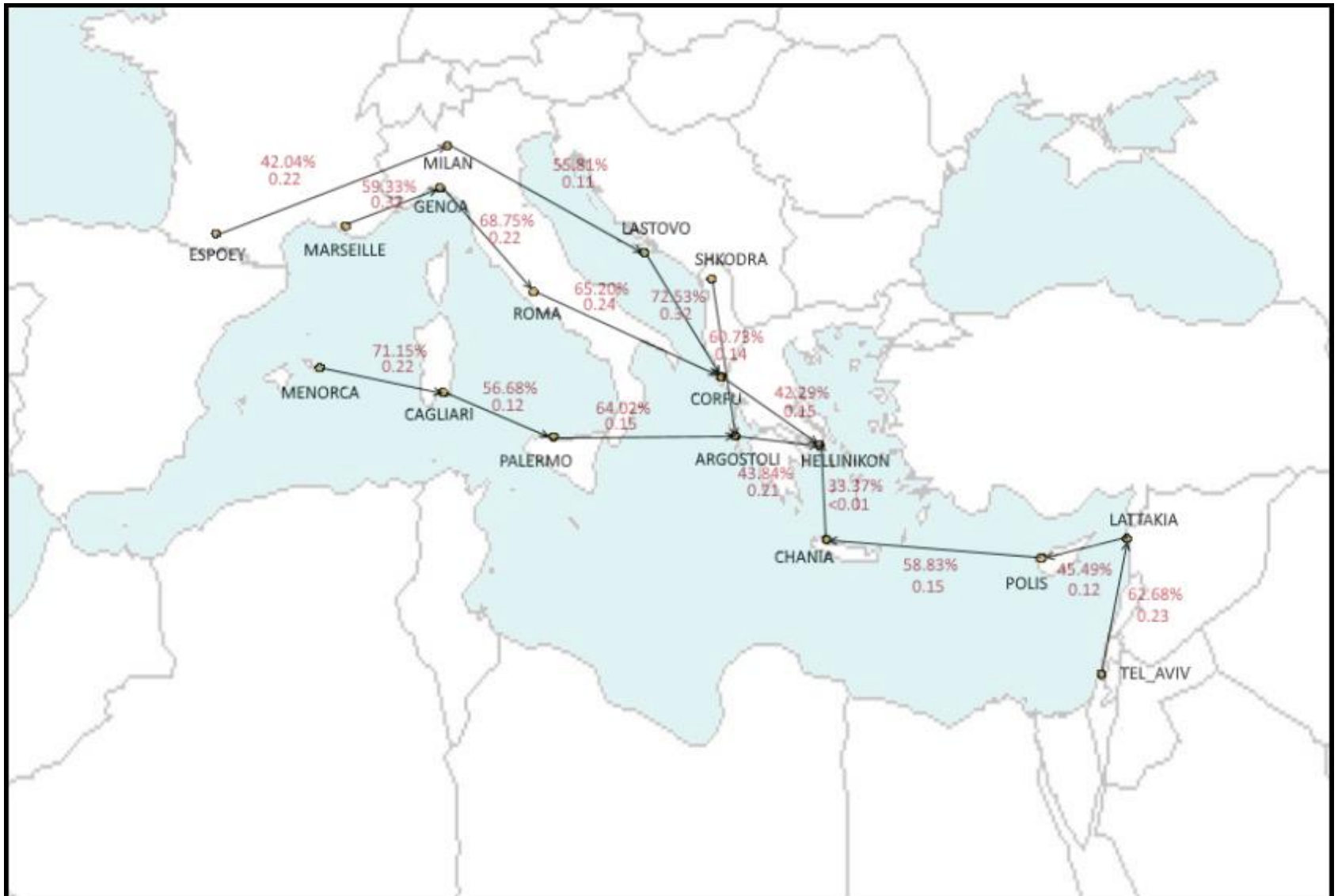
- Οι μεγαλύτερες πιθανότητες εμφάνισης ενός μπλοκ συνεχόμενων βροχερών ημερών για μέσες (>5mm) και ισχυρές (>10mm) ημερήσιες βροχοπτώσεις παρατηρούνται στο βόρειο και βορειοδυτικό τμήμα κυρίως κοντά σε ορεινούς όγκους (Πυρηναία – Άλπεις), αλλά και στις ανατολικές ακτές της Αδριατικής – Ιόνιο.
- Χρήσιμος υπολογισμός για την ανάδειξη περιοχών – κέντρων που επηρεάζονται από καιρικά συστήματα που εμμένουν για διάστημα ημερών, έχοντας επιπτώσεις στη διαχείριση υδατικών πόρων και των αντίστοιχων κινδύνων του φαινομένου.



# Πιθανότητες βροχόπτωσης για υστέρηση μίας μέρας



# Κυριότεροι σταθμοί και σύνδεσμοι που καταλήγουν στο σταθμό του Ελληνικού



# Κυριότερες αλυσίδες και αντίστοιχες πιθανότητες βροχόπτωσης στο Ελληνικό

Υδρομετεωρολογικοί Σταθμοί					Πιθανότητα μη βροχόπτωσης στο σταθμό του βήματος (i) με δεδομένο ότι δεν έχει βρέξει σε όλα τα προηγούμενα βήματα (%)	Πιθανότητα βροχόπτωσης στο σταθμό του βήματος (i) με δεδομένο ότι έχει βρέξει σε όλα τα προηγούμενα βήματα (%)	
Βήμα (i-4)	Βήμα (i-3)	Βήμα (i-2)	Βήμα (i-1)	Βήμα (i)	ύψος βροχ = 0mm	ύψος βροχ > 0mm	ύψος βροχ > 10mm
MENORCA	→ CAGLIARI	→ PALERMO	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	89.08	39.75	0
	CAGLIARI	→ PALERMO	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	88.09	43.29	8.33
		PALERMO	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	87.01	44.42	14.91
			ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	85.94	43.84	16.03
ESPOEY	→ MILAN	→ LASTOVO	→ CORFU	→ HELLINIKON	87.43	41.07	5
	MILAN	→ LASTOVO	→ CORFU	→ HELLINIKON	86.13	40.64	8.77
		LASTOVO	→ CORFU	→ HELLINIKON	86.75	43.14	13.58
			CORFU	→ HELLINIKON	85.34	42.29	12.35
		SHKODRA	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	88.04	44.5	15.54
			& CORFU ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	88.37	47.71	17.63

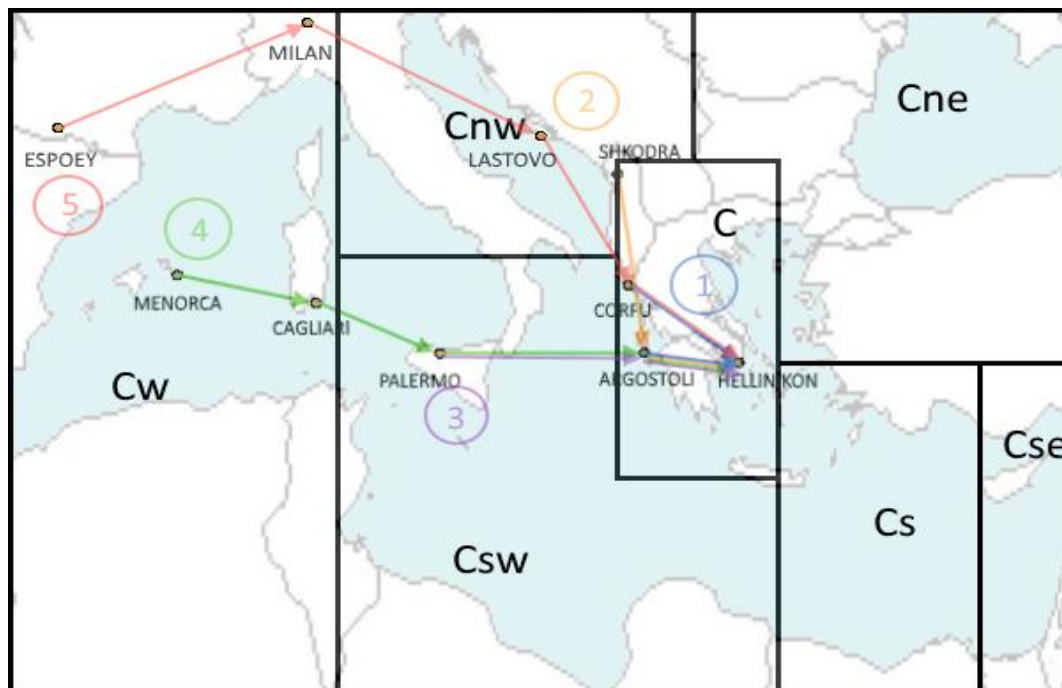
Πιθανότητα μη βροχόπτωσης μία οποιαδήποτε μέρα στο HELLINIKON (%)	Πιθανότητα βροχόπτωσης μία οποιαδήποτε μέρα στο HELLINIKON (%)	Πιθανότητα βροχόπτωσης ύψους άνω των 10mm μία οποιαδήποτε μέρα στο HELLINIKON (%)
73.82	26.18	5.19

# Ποσοστά μεταβολής των πιθανοτήτων μετάβασης κατά την επαλήθευση

Υδρομετεωρολογικοί Σταθμοί					Ποσοστό μεταβολής της πιθανότητας μη βροχόπτωσης του ελέγχου σε σχέση με τον αρχικό υπολογισμό (%)	Ποσοστό μεταβολής της πιθανότητας βροχόπτωσης του ελέγχου σε σχέση με τον αρχικό υπολογισμό (%)	
Βήμα (i-4)	Βήμα (i-3)	Βήμα (i-2)	Βήμα (i-1)	Βήμα (i)	ύψος βροχ = 0mm	ύψος βροχ > 0mm	ύψος βροχ > 10mm
ESPOEY	→ MILAN	→ LASTOVO	→ CORFU	→ HELLINIKON	-2.3	+57.1	-
	MILAN	→ LASTOVO	→ CORFU	→ HELLINIKON	-1.9	+54.5	-
		LASTOVO	→ CORFU	→ HELLINIKON	-4.1	+23.8	-43.4
			CORFU	→ HELLINIKON	-0.5	+25.5	+55.3
MENORCA	→ CAGLIARI	→ PALERMO	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	+2.2	+28.2	-
	CAGLIARI	→ PALERMO	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	+3.4	+7.4	-
		PALERMO	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	+4.5	+6.8	-39
			ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	+1.7	+15.6	+15.8
		PRILEP (SHKODR,	→ ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	+7	+21.8	+28.7
			& CORFU ARGOSTOLI	→ HELLINIKON	+1.1	+20.	-5.4

Ποσοστό μεταβολής της πιθανότητας μη βροχόπτωσης του ελέγχου σε σχέση με τον αρχικό υπολογισμό στο HELLINIKON (%)	Ποσοστό μεταβολής της πιθανότητας βροχόπτωσης του ελέγχου σε σχέση με τον αρχικό υπολογισμό στο HELLINIKON (%)	Ποσοστό μεταβολής της πιθανότητας βροχόπτωσης άνω των 10mm του ελέγχου σε σχέση με τον αρχικό υπολογισμό στο HELLINIKON (%)
-3.2	+9.1	-22.4

# Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και επαλήθευσης



		Πιθανότητα μη βροχόπτωσης (%)	Ποσοστό αύξησης της πιθανότητας μη βροχόπτωσης (%)	Πιθανότητα βροχόπτωσης (%)	Ποσοστό αύξησης της πιθανότητας βροχόπτωσης (%)	Πιθανότητα βροχόπτωσης >10mm (%)	Ποσοστό αύξησης της πιθανότητας βροχόπτωσης >10mm (%)
	HELLINIKON	analysis	<b>73.82</b>	-	<b>26.18</b>	<b>5.19</b>	-
		test	<b>71.43</b>	-	<b>28.57</b>	<b>4.03</b>	-
①	CORFU & ARGOSTOLI - HELLINIKON	analysis	88.37	20	<b>47.71</b>	<b>17.63</b>	<b>240</b>
		test	89.36	25	57.23	16.67	314
②	SHKODRA - CORFU - HELLINIKON	analysis	88.04	19	44.5	15.54	200
		test	88.67	24	54.2	<b>20.00</b>	<b>396</b>
③	PALERMO - ARGOSTOLI - HELLINIKON	analysis	87.01	18	44.42	14.91	187
		test	90.91	27	47.46	9.09	126
④	MENORCA - CAGLIARI - PALERMO - ARGOSTOLI - HELLINIKON	analysis	<b>89.08</b>	<b>21</b>	39.75	-	-
		test	<b>91.03</b>	<b>27</b>	50.94	-	-
⑤	ESPOEY - MILAN - LASTOVO - CORFU - HELLINIKON	analysis	87.43	18	41.07	-	-
		test	85.42	20	<b>64.52</b>	<b>126</b>	-

## Συμπεράσματα

- ❑ Η ορογραφία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην διαμόρφωση του καιρού και του κλίματος στη λεκάνη της Μεσογείου
- ❑ Μελετώντας τις πιθανότητες διαδοχικών ημερήσιων βροχοπτώσεων μεγάλου ύψους βελτιώνεται η πρόγνωση ακραίων καιρικών καταστάσεων (π.χ. πλημμυρες) και κατ' επέκταση η διαχείρησή τους
- ❑ Η ανάπτυξη ενός προσανατολισμένου δικτύου ετεροσυσχετίσεων χωρικά και χρονικά βοηθά στην αποτύπωση της κυρίαρχης ατμοσφαιρικής ροής και στην ανάδειξη κομβικών σημείων διέλευσής της
- ❑ Η χωροχρονική κατανομή των βροχοπτώσεων της Ελλάδας διαμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό από τη δυτικογενή ροή καιρικών συστημάτων σε συνδυασμό με την οροσειρά της Πίνδου
- ❑ Παρόλο που υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις συσχέτισης των βροχοπτώσεων της δυτικής Ελλάδας με τα κυκλωνικά συστήματα που προέρχονται από την Ιταλία, η πρόγνωση της βροχόπτωσης στην Αθήνα με μεγάλη βεβαιότητα καθίσταται δυσχερής λόγω της ιδιαιτερότητας της τοπογραφίας



## Χρησιμότητα μεθόδου

- Η γνώση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των καιρικών συστημάτων που προκαλούν τη βροχόπτωση μέσω εμπειρικών προσεγγίσεων, μπορεί να αξιοποιηθεί ως οδηγός για την εφαρμογή στοχαστικών προσεγγίσεων
- Η διαλείπουσα φύση του φαινομένου της βροχόπτωσης καθιστά τη στοχαστική ανάλυσή της αρκετά ικανοποιητική μέθοδο (π.χ. μελέτη της αλληλοδιαδοχής των βροχερών ημερών μέσω αλυσίδων Μαρκόφ)
- Από τη στατιστική μελέτη ιστορικών χρονοσειρών κλιματικών μεταβλητών σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες μπορούν να προκύψουν ενδείξεις για κλιματικές μεταβολές (ή εμμονή)
- Η ανάπτυξη ενός ισχυρού δικτύου πιθανοτήτων μετάβασης για τη διερεύνηση σεναρίων της εξέλιξης του καιρού και του κλίματος

## Προτάσεις για την επέκταση της ανάλυσης και βελτίωση του μοντέλου

- Εισαγωγή περισσότερων μεταβλητών στον υπολογισμό των ετεροσυσχετίσεων – πιθανοτήτων. Πολυμεταβλητό μοντέλο περισσότερων διαστάσεων (π.χ. ταυτόχρονη διερεύνηση βροχοπτώσεων, ταχύτητας και φοράς ανέμων, θερμοκρασίας, πιέσεων στην επιφάνεια της θάλασσας κ. α.)
- Εισαγωγή δεδομένων για βόρειο τμήμα Αφρικής και Τουρκία είτε χρήση δεδομένων σε grids (κάναβος) για την καλύτερη εποπτεία του δικτύου
- Έλεγχος περιοδικότητας αύξησης/μείωσης των ετεροσυσχετίσεων και των πιθανοτήτων μετάβασης και αντιπαραβολή με αντίστοιχη περιοδικότητα στην εμφάνιση κυκλωνικών συστημάτων σε συγκεκριμένες περιοχές (π.χ. κυκλώνες Γένοβας)
- Εκτενέστερη μελέτη των κυριότερων κόμβων (υπερκόμβων) οι οποίοι συγκεντρώνουν μεγάλο πλήθος συνδέσμων και ανίχνευση μοτίβων στις τροχιές μετάδοσης των διαταραχών.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- ❖ Lionello, P., *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*, Elsevier, 2012.
- ❖ Maheras, P., K. Tolika, C. Anagnostopoulou, M. Vafiadis, I. Patrikas, H. Flocas, *On the Relationships Between Circulation Types and Changes in Rainfall Variability in Greece*, *International Journal of Climatology*, 24, 1695–1712, 2004.
- ❖ Steinhäuser, K., N. V. Chawla and A. R. Ganguly, *An Exploration of Climate Data Using Complex Networks*, *ACM SIGKDD Explorations*, 12(1), 25-32, 2010.
- ❖ Σημειώσεις μαθήματος «Στοχαστικές Μέθοδοι στους Υδατικούς Πόρους», Δ. Κουτσογιάννης, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 2013.

*Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!*