

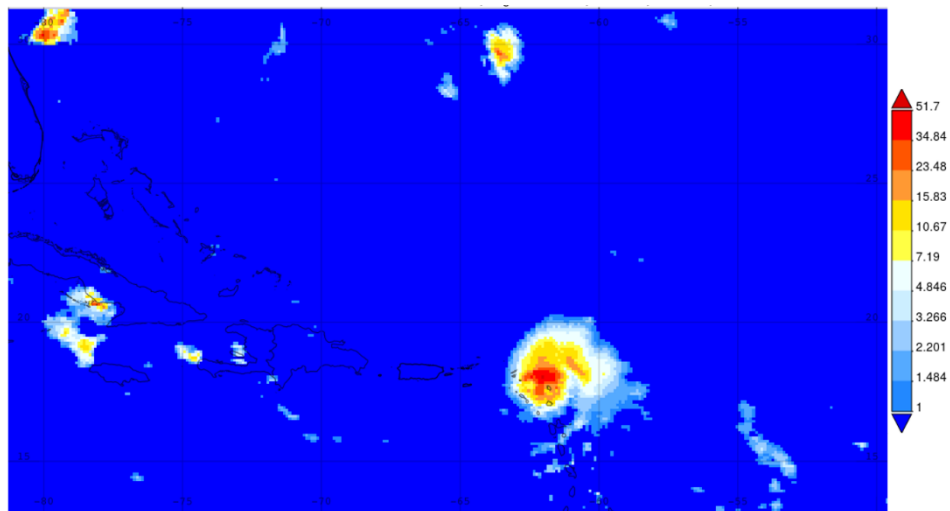
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΗΜΗΤΡΑ Χ. ΡΩΣΣΙΟΥ

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΙΡΜΑ
ΤΟΥ 2017 ΣΤΟΝ ΒΟΡΕΙΟ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟ ΩΚΕΑΝΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΔΗΜΗΤΡΑ ΡΩΣΣΙΟΥ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5738

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΙΡΜΑ ΤΟΥ 2017
ΣΤΟΝ ΒΟΡΕΙΟ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟ ΩΚΕΑΝΟ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Επιβλέπων

Ιωάννης Πυθαρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής



©Δήμητρα Χ. Ρώσσιου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας
Κλιματολογίας, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΙΡΜΑ ΤΟΥ 2017
ΣΤΟΝ ΒΟΡΕΙΟ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟ ΩΚΕΑΝΟ – *Διπλωματική Εργασία*

© Dimitra C. Rossiou, School of Geology, Dept. of Meteorology Climatology, 2021
All rights reserved.
SYNOPTIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF THE NORTH ATLANTIC
HURRICANE IRMA IN 2017 – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

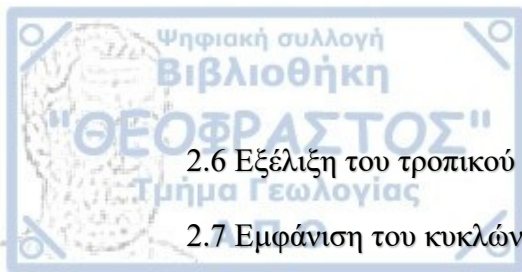
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Δορυφορική εκτίμηση του νετού (mm σε λογαριθμική κλίμακα) της Irma μεταξύ 6 Σεπτεμβρίου 2017, 00Z - 7 Σεπτεμβρίου 2017, 00Z στη λεκάνη του Βόρειου Ατλαντικού από τα δεδομένα GPM-IMERG.



Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	9
1.1 Τροπικοί κυκλώνες.....	9
1.2 Περιοχές προέλευσης των τροπικών κυκλώνων	15
1.3 Η Δομή	16
1.3.1 Το τοίχωμα του ματιού	17
1.3.2 Το μάτι του κυκλώνα.....	18
1.3.3 Ζώνες βροχόπτωσης	19
1.3.4 Ασυμμετρίες	21
1.4 Σχηματισμός.....	21
1.5 Το πρόβλημα της τροπικής κυκλογένεσης.....	24
1.5.1 Έλλειψη δεδομένων για τους τροπικούς ωκεανούς	24
1.5.2 Η πιθανολογική φύση της τροπικής κυκλογένεσης.....	24
1.6 Πρόγνωση	25
1.7 Σκοπός της εργασίας	26
Κεφάλαιο 2. Εξέλιξη του κυκλώνα Irma (2017)	27
2.1 Περίοδος Τροπικών Κυκλώνων 2017 στον Τροπικό Βόρειο Ατλαντικό	27
2.2 Τροπικός Κυκλώνας Irma – Θάνατοι, Καταστροφές.....	29
2.2.1 Πορεία της πίεσης και της ταχύτητας του ανέμου	29
2.3 Δεδομένα και μεθοδολογία	31
2.4 Συνθήκες πριν την γέννηση του τροπικού κυκλώνα Irma	32
2.5 Συνθήκες γέννησης του τροπικού κυκλώνα Irma	34



2.6 Εξέλιξη του τροπικού κυκλώνα Irma.....	36
2.7 Εμφάνιση του κυκλώνα Irma πάνω από τις Η.Π.Α.	43
2.8 Δορυφορική Ανάλυση του τροπικού κυκλώνα Irma	47
Κεφάλαιο 3. Δομή του τροπικού κυκλώνα Irma	52
3.1 Δομή τροπικής ύφεσης.....	52
3.2 Δομή Τροπικής Καταιγίδας.....	56
3.3 Δομή Κυκλώνα.....	58
3.4 Δομή ισχυρού κυκλώνα.....	62
3.5 Δομή του τροπικού κυκλώνα κατά τη μετάβαση στην ξηρά	68
Κεφάλαιο 4. Περίληψη και συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία	75

Οι τροπικοί κυκλώνες αποτελούν μια από τις πιο μεγάλες απειλές τόσο για την ανθρώπινη ζωή όσο και για την ανθρώπινη περιουσία. Η μελέτη τους βοηθάει στην όλο και καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους, ελπίζοντας κάποια στιγμή να είναι δυνατή και η ακριβής πρόγνωση της δημιουργίας, έντασης και πορείας τους.

Ο σκοπός της εργασίας ήταν η συνοπτική και δυναμική ανάλυση του κυκλώνα Irma του 2017 στον Βόρειο τροπικό Ατλαντικό ωκεανό. Ο κυκλώνας αυτός ήταν ιδιαίτερα ισχυρός και με βάση τα δεδομένα του Εθνικού Κέντρου Κυκλώνων η ταχύτητα του ανέμου άγγιξε τους 155 kt, την στιγμή που η ελάχιστη πίεση ήταν 914 hPa. Οι υλικές ζημιές που προκλήθηκαν ανέρχονται στα 50 δισεκατομμύρια δολάρια και οι ανθρώπινες ζωές που χάθηκαν εξαιτίας της σφοδρότητας του ανέρχονται στις 134. Μελετήθηκε η εξέλιξη και η δομή του κυκλώνα καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες αναπτύχθηκε. Έγινε χρήση πλεγματικών αναλύσεων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού, δορυφορικών εικόνων και δεδομένων της θέσης και έντασης του κυκλώνα από το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων των Η.Π.Α.

Από τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι οι επιφανειακές θαλάσσιες θερμοκρασίες στα αρχικά στάδια σχηματισμού προσέγγιζαν τους 28 °C και η κατακόρυφη διάτμηση του ανέμου για το ίδιο χρονικό διάστημα λάμβανε μικρές τιμές, δηλαδή 2-3 m/s. Ο σχετικός στροβιλισμός ήταν μικρός στα αρχικά στάδια της Irma με τιμές που κυμαίνονταν μεταξύ 10^{-4} s^{-1} και $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, ενώ την ημέρα που απέκτησε ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης αυξήθηκε σε $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Την ίδια στιγμή οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας έφταναν τους 29 °C. Για το χρονικό διάστημα που ακολούθησε μέχρι να διαλυθεί οι τιμές του στροβιλισμού εμφάνιζαν πτωτική τάση, ενώ οι τιμές της θερμοκρασίας της θάλασσας μια μικρή αύξηση. Το σύστημα εμφάνισε ξεκάθαρη δομή θερμού πυρήνα τόσο στη θερμοκρασία όσο και στο ανεμολογικό πεδίο.



Abstract

Tropical cyclones are among the biggest threats for both human life and property. Studying them helps to better understand their behavior, hoping that one day it will be possible to predict very accurately their formation, intensity and track. The aim of this dissertation was the overall synoptic and dynamic analysis of North Atlantic Hurricane Irma in 2017. This cyclone was very strong and according to the data of the National Hurricane Center the wind speed reached 155 kt, when the minimum pressure was 914 hPa.

The material damage amounted to \$ 50 billion and the human lives lost due to its severity amounted to 134. The evolution and structure of the hurricane as well as the environmental conditions in which it developed were studied. Operational gridded analyses of the European Center for Medium-range Weather Forecasts, satellite images and cyclone location and intensity data by the US National Hurricane Center, were used.

The study found that sea surface temperatures in the early stages of formation were close to 28 °C and the vertical wind shear for the same time period exhibited small favorable values, i.e. 2-3 m / s. The relative vorticity was relatively weak in the early stages of Irma with values fluctuating between 10^{-4} s^{-1} and $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, while on the day it acquired its minimum mean sea-level pressure the vorticity increased to $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. At the same time the sea surface temperatures reached 29 °C. For the period that followed until its dissipation vertical vorticity showed a downward trend, while the sea temperature values increased slightly. The system exhibited a clear warm core structure in the temperature, wind and relative vorticity fields.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Τροπικοί κυκλώνες

Τροπικός κυκλώνας είναι ο γενικός όρος για ένα συνοπτικό σύστημα χαμηλών πιέσεων χωρίς μέτωπα που προέρχεται από τροπικά ή υποτροπικά νερά με οργανωμένη αστάθεια και συγκεκριμένη κυκλωνική επιφανειακή κυκλοφορία ανέμου. Οι τροπικοί κυκλώνες αντλούν ενέργεια κυρίως από την εξάτμιση του ωκεανού και τη συναφή συμπύκνωση σε κατακόρυφης ανάπτυξης νέφη συγκεντρωμένα κοντά στο κέντρο τους σε σύγκριση με καταιγίδες μέσω γεωγραφικών πλατών που λαμβάνουν κυρίως ενέργεια από την οριζόντια θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, οι τροπικοί κυκλώνες χαρακτηρίζονται από «θερμό πυρήνα» (σχετικά θερμότερο από το περιβάλλον στο ίδιο επίπεδο πίεσης) στην τροπόσφαιρα. Είναι αυτή η μοναδική δομή θερμού πυρήνα σε ένα τροπικό κυκλώνα που παράγει πολύ δυνατούς ανέμους κοντά στην επιφάνεια και προκαλεί ζημιές σε παράκτιες περιοχές και νησιά λόγω ακραίου ανέμου, κυμάτων θύελλας και κυματικής δράσης (Sharkov, 2011). Σύμφωνα με τον ορισμό του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (World Meteorological Organization, WMO), ο τροπικός κυκλώνας είναι ένας γενικός όρος για τα ακόλουθα τέσσερα στάδια μιας καταιγίδας (Pytharoulis, 1999):

- Τροπική Διαταραχή: περιοχή οργανωμένης αστάθειας με διάμετρο 200-600 χλμ που έχει μη μετωπικό μεταβατικό χαρακτήρα
- Τροπική ύφεση: ένας ασθενής τροπικός κυκλώνας με ξεκάθαρη κλειστή επιφανειακή κυκλοφορία και μέγιστους άνεμους κάτω των 17 m/s (~ 34 κόμβοι)
- Τροπική καταιγίδα: ένας τροπικός κυκλώνας με κλειστές ισοβαρείς και μέγιστο άνεμο με ταχύτητες από 17 έως 32 m/s (34 έως 63 κόμβους) και
- Κυκλώνας: Ένας έντονος τροπικός κυκλώνας με μέγιστους ανέμους 33 m/s (64 κόμβοι) ή περισσότερο.

Ένας τροπικός κυκλώνας παίρνει όνομα όταν φτάσει στο στάδιο της τροπικής καταιγίδας και δεν το χάνει (μέχρι να διαλυθεί τελείως) είτε ενισχυθεί σε Κυκλώνα ή αποδυναμωθεί σε κατώτερη κατηγορία. Οι κυκλώνες του Βόρειου Ατλαντικού και του βορειοανατολικού Ειρηνικού κατηγοριοποιούνται επίσης χρησιμοποιώντας την κλίμακα έντασης κυκλώνα *Saffir-Simpson*. Ο Πίνακας 1.1 δείχνει πώς ταξινομούνται

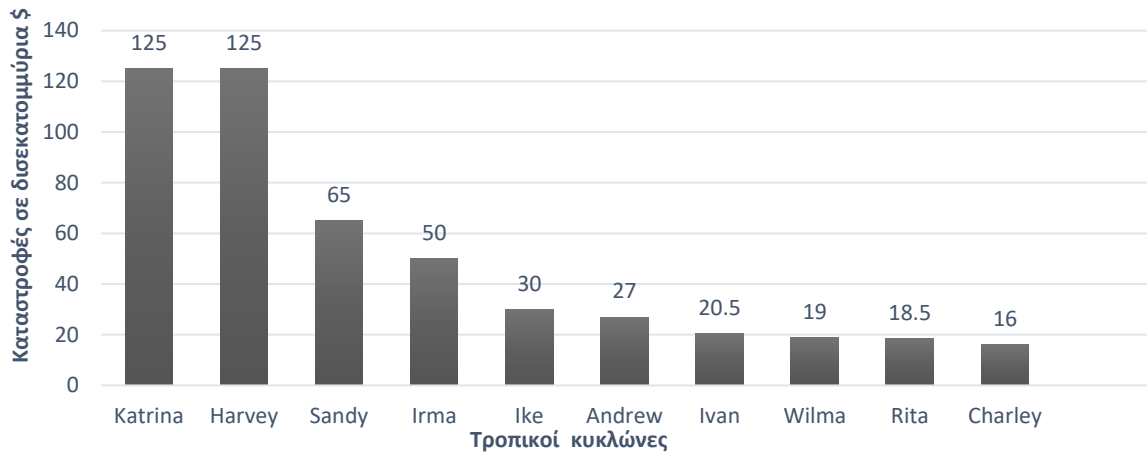
Οι κυκλώνες σύμφωνα με τα παρατηρούμενα ή εκτιμώμενα χαρακτηριστικά. Οι κυκλώνες κατηγορίας 3 και άνω αναφέρονται ως έντονοι (ή ισχυροί) κυκλώνες και αυτοί συνήθως προκαλούν τη μεγαλύτερη ζημιά κατά την άφιξή τους στην ξηρά (Pytharoulis, 1999).

Category	Miles Per Hour	Meters per Second	Knots
1	74-95	33-42	64-82
2	96-110	42-49	83-95
3	111-129	49-57	96-112
4	130-156	58-69	113-135
5	≥157	>70	>136

Πίνακας 1.1 Η κλίμακα έντασης Saffir-Simpson (NOAA, <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>)

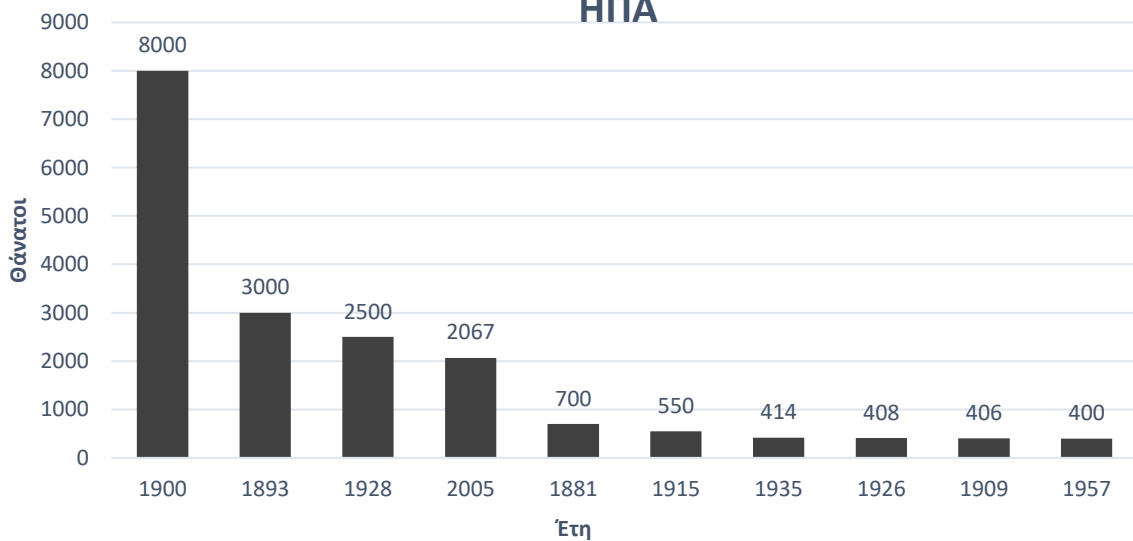
Οι τροπικοί κυκλώνες είναι από τις μεγαλύτερες απειλές για την ζωή και για την περιουσία ακόμα και στα διαμορφωτικά στάδια ανάπτυξης τους. Περιλαμβάνουν έναν αριθμό από διάφορους κινδύνους που ο καθένας μπορεί να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στην ζωή και στην περιουσία, όπως κύμα θύελλας, πλημμύρες, ακραίους ανέμους, ανεμοστρόβιλους και αστραπές. Σε συνδυασμό αυτοί οι κίνδυνοι αλληλοεπιδρούν ο ένας με τον άλλον και αυξάνουν σημαντικά τις πιθανότητες απώλειας ζωής και υλικών ζημιών (WMO, <https://public.wmo.int/>). Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται οι 10 πιο επιζήμιοι τροπικοί κυκλώνες στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής ενώ στο Σχήμα 1.2 φαίνονται τα 10 έτη με τους περισσότερους θανάτους στις ΗΠΑ εξαιτίας κυκλώνων.

Οι 10 πιο κοστοβόροι τροπικοί κυκλώνες στις ΗΠΑ



Σχήμα 1.1 Οι 10 τροπικοί κυκλώνες με το μεγαλύτερο κόστος ζημιών στις Η.Π.Α. (NOAA, <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>)

Τα 10 πιο θανατηφόρα χρόνια λόγω κυκλώνων στις ΗΠΑ

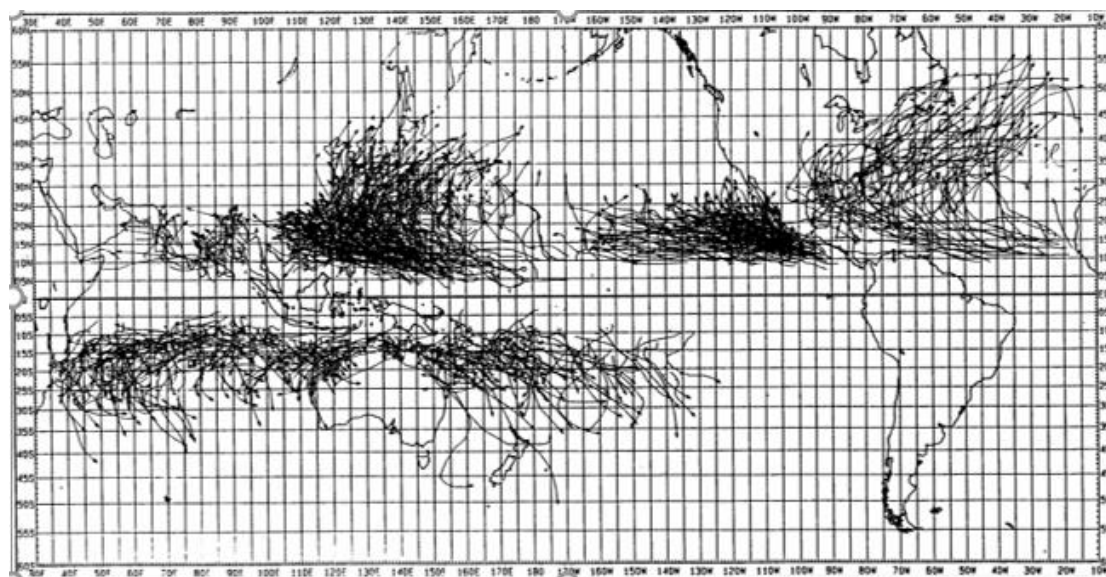


Σχήμα 1.2 Τα 10 χρόνια με τους πιο πολλούς θανάτους λόγω κυκλώνων (NOAA, <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>)

Σύμφωνα με τον Zehnder (2021) οι τροπικοί κυκλώνες είναι συμπαγείς, κυκλικές καταιγίδες, γενικά διαμέτρου περίπου 320 km (200 μίλια), των οποίων οι άνεμοι περιστρέφονται γύρω από μια κεντρική περιοχή χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι άνεμοι οδηγούνται από αυτόν τον πυρήνα χαμηλής πίεσης και από την περιστροφή της

Γης, η οποία εκτρέπει την πορεία του ανέμου μέσα από ένα φαινόμενο γνωστό ως δύναμη *Coriolis*. Ως αποτέλεσμα, οι τροπικοί κυκλώνες περιστρέφονται με αριστερόστροφη (ή κυκλωνική) κατεύθυνση στο Βόρειο ημισφαίριο και με δεξιόστροφη (ή αντικυκλωνική) κατεύθυνση στο Νότιο Ημισφαίριο.

Τροπικοί κυκλώνες σχηματίζονται πάνω από τους θερμούς τροπικούς ωκεανούς και συνήθως κινούνται δυτικά και προς τους πόλους, αν και κομμάτια μεμονωμένων καταιγίδων μπορεί να είναι αρκετά απρόβλεπτα. Σε μια πρώτη προσέγγιση οι τροπικοί κυκλώνες καθοδηγούνται από ένα σταθμισμένο μέσο όρο ανέμων ευρείας κλίμακας σε ένα στρώμα της τροπόσφαιρας. Είναι συνηθισμένο για καταιγίδες που φτάνουν σε αρκετά μεγάλα γεωγραφικά πλάτη να κάμπτονται και να κινούνται προς την ανατολή (Smith, 2006). Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται οι καταγραφές των ιχνών των τροπικών κυκλώνων από το 1979 μέχρι το 1988.



Σχήμα 1.3 Καταγραφές ιχνών κίνησης των τροπικών κυκλώνων περιόδου 1979-1988 (Smith, 2006)

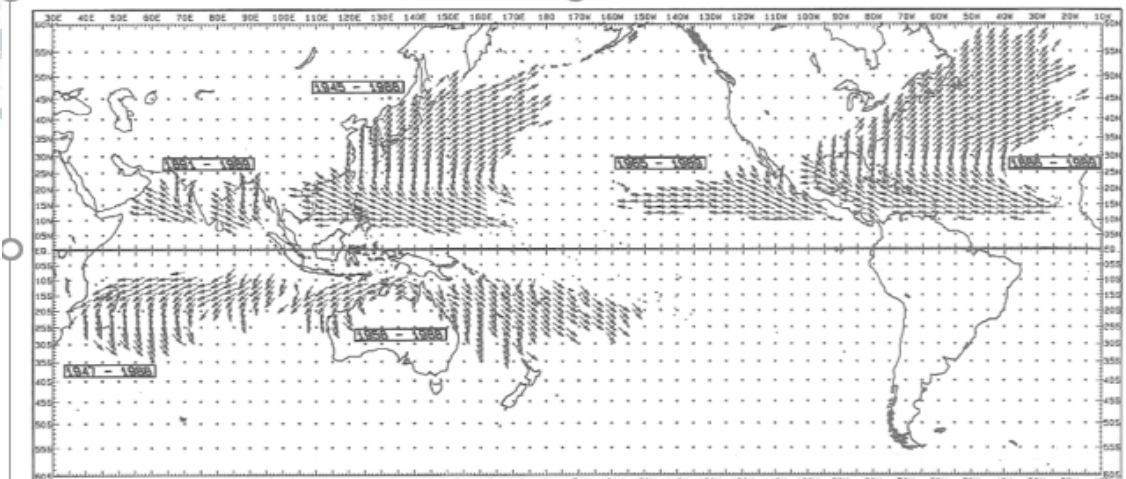
Τα μέρη με τις υψηλότερες εποχιακές τιμές περιστροφής είναι συνήθως μέρη που βρίσκονται στη ζώνη νηνεμιών του Ισημερινού ή στην Ενδοτροπική ζώνη σύγκλισης. Αυτές είναι πολύ ευνοϊκές τοποθεσίες για κυκλογένεση. Ο Ramage (1974) έχει δώσει περισσότερα στατιστικά για τη σχέση της ενδοτροπικής ζώνης σύγκλισης και της κυκλογένεσης. Η περιστροφή είναι φυσικά υψηλή στην ισημερινή ή κυκλωνική πλευρά των ανέμων στα γεωγραφικά πλάτη των 5- 15° (Gray, 1975). Η γένεση είναι επίσης συχνή σε γεωγραφικά πλάτη 5-10°, όπως στο βορειοδυτικό Ειρηνικό από Ιανουάριο έως Μάρτιο και στον νότιο Ινδικό και νότιο Ειρηνικό ωκεανό από Απρίλιο έως Ιούνιο. Σε αυτά τα γεωγραφικά πλάτη οι δυνάμεις των ανέμων τον χειμώνα και το φθινόπωρο μειώνονται απότομα προς τον ισημερινό και υπάρχει κυκλωνική διάτμηση χαμηλού

επιπέδου και στις δύο πλευρές του ισημερινού. Όπως συζητήθηκε από τους Hubert et al. (1969), αυτό μπορεί να δώσει την εμφάνιση μια διπλής ενδοτροπικής ζώνης σύγκλιση. Έτσι, η τροπική κυκλογένεση τη χειμερινή εποχή δεν θα πρέπει να είναι απροσδόκητη σε ορισμένες τοποθεσίες μικρού γεωγραφικού πλάτους. Η ισόθερμος των 26°C της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας προσδιορίζει το προς τους πόλους όριο της κυκλογένεσης (Gray, 1975).

Πολλοί τροπικοί κυκλώνες στη περιοχή του Νότιου Ειρηνικού κινούνται ανατολικά κατά τη διάρκεια του κύκλου της ζωής τους. Εξαιτίας του περιορισμού της ξηράς στο όριο προς τον πόλο του Ινδικού Ωκεανού και του μοτίβου κύριας ροής προς τα δυτικά, μόνο ένας μικρός αριθμός τροπικών κυκλώνων στην περιοχή υφίστανται ολοκληρωτική κάμψη προς τα ανατολικά. Κυκλώνες στον ανατολικότερο Βόρειο Ειρηνικό έχουν μεγάλη διαδρομή προς τη δύση. Μόνο λίγα ίχνη κάμψης έχουν εντοπιστεί στον ανατολικό Ειρηνικό (Elsberry, 1995).

Μετά την διευθέτηση διαφόρων δυσκολιών με τα σύνολα δεδομένων ο Neumann (1993) παρήγαγε μια παγκόσμια κλιματολογία της μέσης καταγραφής τροπικών κυκλώνων (Elsberry, 1995). Το Σχήμα 1.4 δείχνει αυτή τη μέση κίνηση των τροπικών κυκλώνων.

Ο Allard (1984) βρίσκει ότι 40% από τις τροπικές καταιγίδες του Σεπτεμβρίου κάμπτονται. Ο Sadler (σε προσωπική συζήτηση με τον Elsberry, 1985) έχει προτείνει 2 παράγοντες που συνεισφέρουν στην αυξημένη συχνότητα κάμψης τον Σεπτέμβριο. Πρώτον ένας αντικυκλώνας στην ανώτερη τροπόσφαιρα που εντοπίζεται κοντά στις 32 μοίρες Βόρεια πάνω από τις βορειοδυτικές Η.Π.Α. κατά τον Ιούλιο και Αύγουστο και εξασθενεί τον Σεπτέμβριο. Δεύτερον ο επιφανειακός άνεμος και το μοτίβο πίεσης στα γεωγραφικά πλάτη που συμβαίνουν κάμψεις μεταβάλλονται έντονα. Αργά κινούμενοι τροπικοί κυκλώνες είναι πιο συχνοί στον Ατλαντικό από ότι στον Ειρηνικό (Elsberry, 1995). Οι τροπικοί κυκλώνες είναι εποχιακά φαινόμενα και οι περισσότερες λεκάνες εμφανίζουν αυξημένη συχνότητα σχηματισμού την περίοδο από αργά το καλοκαίρι έως και νωρίς το φθινόπωρο (McBride, 1995).



Σχήμα 1.4 Μέση κίνηση τροπικών κυκλώνων (Elsberry, 1995)

Πρόσφατα, μια αιτιώδης σχέση μεταξύ της αύξησης της συχνότητας και της έντασης των κυκλώνων και της αύξησης της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας (Sea Surface Temperature, SST) έχει διατυπωθεί, υποθέτοντας επιτάχυνση του υδρολογικού κύκλου (Webster et al., 2005). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.2) φαίνεται πως άλλαξε η συχνότητα σχηματισμού κυκλώνων κατηγορίας 4 και κατηγορίας 5. Διακρίνεται ότι την δεκαπενταετία 1990-2004 έχουμε αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης ισχυρών κυκλώνων σε όλους του ωκεανούς σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο (1975-1989) όπου το πλήθος τους ήταν αρκετά μικρότερο.

Basin	Period			
	1975-1989		1990-2004	
	Number	Percentage	Number	Percentage
East Pacific Ocean	36	25	49	35
West Pacific Ocean	85	25	116	41
North Atlantic	16	20	25	25
Southwestern Pacific	10	12	22	28
North Indian	1	8	7	25
South Indian	23	18	50	34

Πίνακας 1.2 Πλήθος κυκλώνων κατηγορίας 4 και 5 στις περιόδους 1975-1989 και 1990-2004 (Webster et al., 2005)

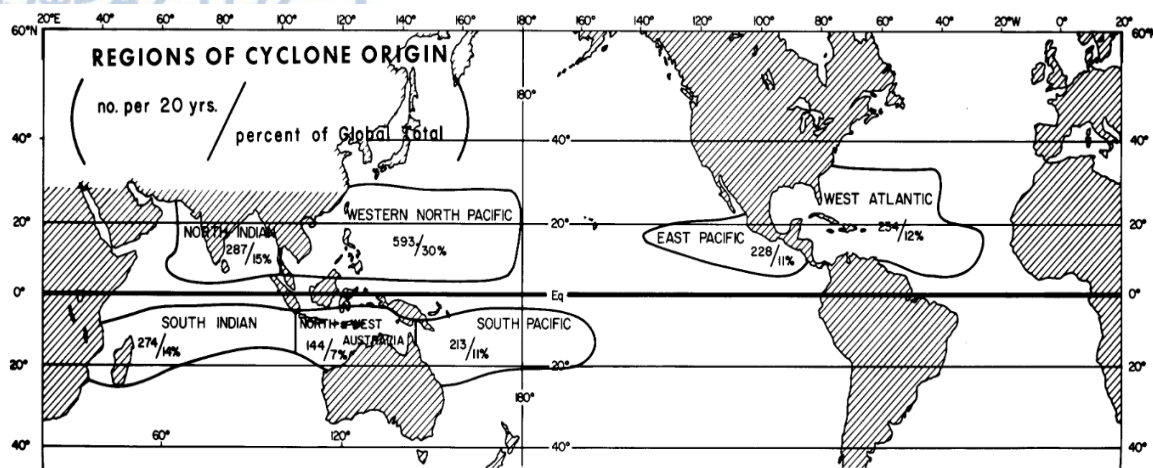
Για την περιοχή του Βορειοανατολικού Ειρηνικού οι Holland and Bruyere (2014) ανέλυσαν τις αλλαγές στη συχνότητα εμφάνισης τροπικών κυκλώνων διάφορων κατηγοριών, αξιολογώντας δεδομένα έντασης IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship)/JTWC (Joint Typhoon Warning Center) και ομογενοποιημένα δεδομένα έντασης βασισμένα σε δορυφόρους. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που βασίζονται σε δορυφόρους, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η παγκόσμια αναλογία των τυφώνων που φτάνουν στην ένταση της κατηγορίας 4 ή 5 έχει

αυξηθεί κατά 25-30% ανά βαθμό Κελσίου της υπερθέρμανσης του πλανήτη τις τελευταίες δεκαετίες. Βρήκαν μια παρόμοια αν και ασθενέστερη τάση χρησιμοποιώντας το ομογενοποιημένο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα καταγραφής της έντασης τροπικών κυκλώνων του Kossin et al. (2013) (Lee et al., 2020).

1.2 Περιοχές προέλευσης των τροπικών κυκλώνων

Ο Gray το 1975 παρουσίασε στο Σχήμα 1.5 τις περιοχές στις οποίες σχηματίζονται οι τροπικοί κυκλώνες για μια χρονική περίοδο 20 ετών και φαίνεται ότι για αυτό το χρονικό διάστημα οι περισσότεροι κυκλώνες σχηματίζονται στο βορειοδυτικό Ειρηνικό ωκεανό (30%). Στην ίδια μελέτη ο Gray (1975) σημείωσε τις παρακάτω παρατηρήσεις:

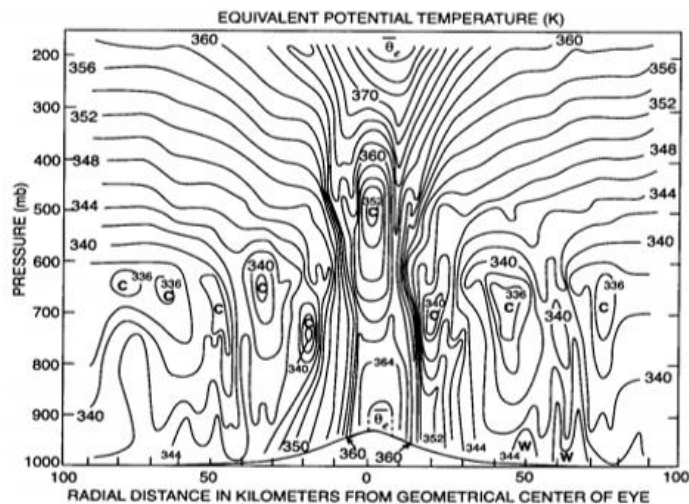
- Οι κυκλώνες δεν σχηματίζονται εντός 4-5° από τον ισημερινό. Η γένεση ευνοείται ιδιαίτερα στις ζώνες γεωγραφικού πλάτους 5-15°. Η γένεση δεν εμφανίζεται σε γεωγραφικό πλάτος από 22° και προς τους πόλους στο νότιο ημισφαίριο. Στο βόρειο ημισφαίριο γένεση εμφανίζεται σε γεωγραφικά πλάτη τόσο υψηλά όσο ~ 35°.
- Τα δύο τρίτα όλων των κυκλώνων σχηματίζονται στο ανατολικό ημισφαίριο. Οι περιοχές με γεωγραφικό μήκος περίπου 90° E, 140° E και 105° W είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για τη γένεση.
- Αν και η πλειοψηφία των τροπικών κυκλώνων σχηματίζεται το καλοκαίρι, η γένεση είναι δυνατή όλες τις εποχές στο βορειοδυτικό Ειρηνικό. Αυτή η περιοχή έχει σχεδόν το ένα τρίτο όλων των τροπικών κυκλώνων του πλανήτη.
- Υπάρχουν δύο εποχές το χρόνο σχηματισμού κυκλώνων στον βόρειο Ινδικό ωκεανό σε γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 5-15°.
- Ο νοτιοανατολικός Ειρηνικός και ο νότιος Ατλαντικός στερούνται τροπικούς κυκλώνες.
- Η κυκλογένεση ευνοείται ιδιαίτερα κοντά στη συνηθισμένη τοποθεσία της ενδοτροπικής σύγκλισης.



Σχήμα 1.5 Ποσοστό εμφάνισης των τροπικών κυκλώνων ανά περιοχή παγκοσμίως (1952-1971) (Gray, 1975).

1.3 Η Δομή

Οι ανεπτυγμένοι τροπικοί κυκλώνες είναι συστήματα θερμού πυρήνα. Θετικές ανωμαλίες θερμοκρασίας σε σχέση με το γύρω περιβάλλον τους παρατηρούνται σχεδόν σε όλα τα επίπεδα πάνω από το κέντρο χαμηλής πίεσης (δηλαδή τον πυρήνα τους) (Pytharoulis, 1999). Οι μέγιστες ανωμαλίες της θερμοκρασίας είναι συνήθως 15°C και εμφανίζονται στην άνω τροπόσφαιρα στα περίπου 250-300 hPa. Λόγω αυτής της δομής της θερμοκρασίας και της εξίσωσης του θερμικού ανέμου, οι ισχυρότεροι άνεμοι αναμένεται να είναι κοντά στην επιφάνεια. Συνήθως σε έναν ανεπτυγμένο τροπικό κυκλώνα, η ακτίνα των μέγιστων ανέμων είναι περίπου 20- 40 χλμ από το κέντρο. Σε έντονους κυκλώνες μπορεί να γίνει ακόμη μικρότερη και οι άνεμοι μπορεί να αποκτήσουν ταχύτητα πάνω από 80 m/s (Pytharoulis, 1999). Η «κλασική» δομή ενός πυρήνα τροπικού κυκλώνα που αποτελεί παράδειγμα είναι αυτή του κυκλώνα *Gilbert* στις 22:00 UTC στις 13 Σεπτεμβρίου (Σχήμα 1.6) (Smith, 2006).



Σχήμα 1.6 Η δομή του κυκλώνα Gilbert (1998) στο Β. Ατλαντικό (Smith, 2006).

Σε μια πρώτη καλή προσέγγιση ο ώριμος τροπικός κυκλώνας αποτελείται από μια οριζόντια σχεδόν συμμετρική κυκλοφορία πάνω από την οποία υπέρκειται μια θερμικά-άμεση κάθετη (εγκάρσια) κυκλοφορία. Αυτές μερικές φορές αναφέρονται ως «πρωτογενής κυκλοφορία» και «δευτερογενής κυκλοφορία», αντίστοιχα, όροι που επινοήθηκαν από τον Ooyama (1982). Ο συνδυασμός αυτών των δύο επιμέρους κυκλοφοριών οδηγεί σε μια σπειροειδή κίνηση. Οι σπειροειδείς κινήσεις είναι συχνά εμφανείς σε μοτίβα νεφών που παρατηρούνται σε δορυφορικές εικόνες και σε εικόνες ανάκλασης ραντάρ. Η πρωτογενής κυκλοφορία είναι ισχυρότερη σε χαμηλά επίπεδα στην περιοχή του τοιχώματος του ματιού και η ένταση ελαττώνεται τόσο με την ακτίνα όσο και με το ύψος (Smith, 2006). Η πρωτογενής, ή εφαπτομενική, κυκλοφορία είναι κυκλική σε όλο το βάθος της τροπόσφαιρας κοντά στον πυρήνα του συστήματος και σε μεγάλες ακτίνες σε χαμηλά επίπεδα. Στην ανώτερη τροπόσφαιρα και πέρα από 100-200 χλμ. από το κέντρο, η κυκλοφορία γίνεται αντικυκλωνική. Η δευτερογενής κυκλοφορία μπορεί να θεωρηθεί ως εγκάρσια κυκλοφορία από μέσα-προς τα έξω και είναι υπεύθυνη για τη συσσώρευση ενέργειας από τον ωκεανό και την κατανομή της κατακόρυφα και για τη γωνιακή μεταφορά ορμής. Το άνω σκέλος της δευτερεύουσας κυκλοφορίας σχετίζεται με ένα από τα πιο ξεχωριστά χαρακτηριστικά των τροπικών κυκλώνων στις δορυφορικές εικόνες, το τοίχωμα του ματιού (Pytharoulis, 1999).

1.3.1 Το τοίχωμα του ματιού

Το πιο επικίνδυνο και καταστροφικό μέρος ενός τροπικού κυκλώνα είναι το τοίχωμα του ματιού. Εδώ οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι, οι βροχοπτώσεις είναι εντονότερες και

τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης εκτείνονται από την επιφάνεια της Γης σε ύψος 15.000 μέτρων (49.000 πόδια). Όπως προαναφέρθηκε, οι ισχυροί άνεμοι οδηγούνται από ταχείες αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση κοντά στο μάτι, γεγονός που δημιουργεί μεγάλη δύναμη βαροβαθμίδας. Οι άνεμοι στη πραγματικότητα φτάνουν την μέγιστη τους ταχύτητα σε υψόμετρο περίπου 300 μέτρων πάνω από την επιφάνεια. Πιο κοντά στην επιφάνεια επιβραδύνονται από τριβή και υψηλότερα από 300 μέτρα αποδυναμώνονται με τη μείωση της δύναμης της οριζόντιας βαροβαθμίδας (Zehnder, 2021). Επειδή ο αέρας στο μάτι βυθίζεται σιγά-σιγά, δημιουργεί μια ανύψωση στο τοίχωμα του ματιού. Σε ιδιαίτερα έντονες καταιγίδες, μπορεί να εμφανιστούν ομόκεντροι κύκλοι τοιχωμάτων (ή ένας «κύκλος αντικατάστασης των τοιχωμάτων») (NOAA, <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>). Με βάση τα δορυφορικά δεδομένα 10 ετών (1997-2006), οι Hawkins and Helveston (2008) ανέφεραν ότι περίπου 80% των τροπικών κυκλώνων με ελάχιστη κεντρική επιφανειακή πίεση χαμηλότερη από 940-950 hPa ή με μέγιστο επιφανειακό άνεμο μεγαλύτερο από 50-60 m/s βιώνουν τουλάχιστον έναν ομόκεντρο κύκλο ματιών στον χρόνο ζωής τους στο δυτικό Βόρειο Ειρηνικό, ενώ η αναλογία μειώνεται σε 70% για τον Βόρειο Ατλαντικό, 50% για τον ανατολικό Ειρηνικό και 40% για το νότιο ημισφαίριο (Wang, 2012). Η αντικατάσταση του τοιχώματος συμβαίνει όταν μια καταιγίδα φτάσει το όριο έντασης και το μάτι συστέλλεται σε μικρότερο μέγεθος (5-15 μίλια). Ισχυρές ζώνες βροχόπτωσης στην εξωτερική καταιγίδα κινούνται εσωτερικά προς το μάτι, αφαιρώντας από το εσωτερικό μάτι την υγρασία και την ορμή του και η καταιγίδα εξασθενεί (NOAA, <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>).

1.3.2 Το μάτι του κυκλώνα

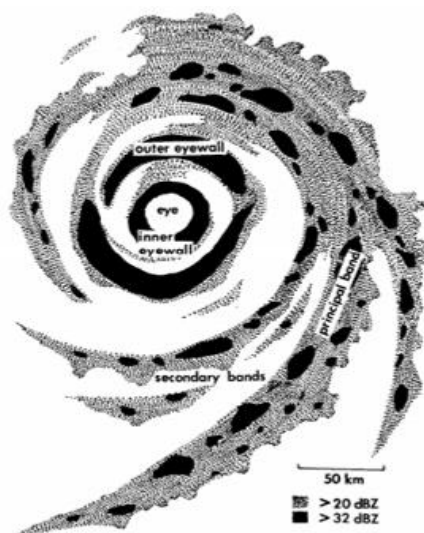
Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των τροπικών κυκλώνων είναι το μάτι, μια κεντρική περιοχή με καθαρό ουρανό, θερμές θερμοκρασίες και χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση (Zehnder, 2021). Σύμφωνα με τον NOAA (<https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>) μερικοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι η ακτινική εξάπλωση του ανέμου δημιουργεί μια θερμή ξηρή καθοδική ροή από την ανώτερη ατμόσφαιρα και αυτό σχηματίζει το ανέφελο μάτι. Άλλοι πιστεύουν ότι η απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας στα τοιχώματα του ματιού αναγκάζει την καθίζηση στο κέντρο της καταιγίδας

δημιουργώντας το μάτι. Συνήθως, η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 1.000 hPa. Στο κέντρο ενός τροπικού κυκλώνα, ωστόσο, είναι συνήθως περίπου 960 hPa, και σε έναν πολύ έντονο «υπερκυκλώνα» του δυτικού Ειρηνικού μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο 880 hPa. Εκτός από τη χαμηλή πίεση στο κέντρο, υπάρχει επίσης μια γρήγορη μεταβολή της πίεσης κατά μήκος της καταιγίδας, με το μεγαλύτερο μέρος της αλλαγής να συμβαίνει κοντά στο κέντρο. Αυτή η ταχεία διακύμανση οδηγεί σε μεγάλη δύναμη βαροβαθμίδας, η οποία είναι υπεύθυνη για τους ισχυρούς ανέμους που υπάρχουν στο τοίχωμα του ματιού (Zehnder, 2021). Μέσα στο μάτι, η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 28°C και το σημείο δρόσου είναι μικρότερο από 0°C. Αυτές οι θερμές και ξηρές συνθήκες είναι χαρακτηριστικές των ματιών σε εξαιρετικά έντονους τροπικούς κυκλώνες (Smith, 2006). Ο σχηματισμός ενός ματιού υποδηλώνει ότι ένας τροπικός κυκλώνας έχει φτάσει σε υψηλό επίπεδο οργάνωσης και ως εκ τούτου είναι συνήθως χαρακτηριστικό πιο έντονων συστημάτων. Στη μελέτη τροπικών κυκλώνων του Ατλαντικού της περιόδου 1988-2002 βρέθηκε ότι και οι 7 κυκλώνες κατηγορίας 5 έχουν μάτι, αλλά μόνο 9 από τις 172 τροπικές καταιγίδες (5,2%) έχουν μάτι τουλάχιστον μία φορά κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Αυτό επιβεβαιώνει και πάλι ότι το μάτι σχετίζεται με πιο οργανωμένα, ισχυρά συστήματα (Kimball et al., 2004).

1.3.3 Ζώνες βροχόπτωσης

Εκτός από τα βαθιά κατακόρυφης ανάπτυξης κύτταρα (συμπαγείς περιοχές της κάθετης κίνησης του αέρα) που περιβάλλουν το μάτι, υπάρχουν συχνά δευτερεύοντα κύτταρα διατεταγμένα σε ζώνες γύρω από το κέντρο. Αυτές οι ζώνες, συνήθως αποκαλούμενες ζώνες βροχόπτωσης, περιστρέφονται στο κέντρο της καταιγίδας (Zehnder, 2021). Ανάλογα με τις θεμελιώδεις διαφορές τους στη δυναμική και τη θερμοδυναμική, αυτές οι ζώνες βροχής μπορούν να ταξινομηθούν σε εσωτερικές ζώνες βροχής και εξωτερικές ζώνες βροχής (Wang, 2012). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ζώνες βροχόπτωσης είναι σταθερές σε σχέση με το κέντρο της κινούμενης καταιγίδας και σε άλλες περιπτώσεις φαίνεται να περιστρέφονται γύρω από το κέντρο. Οι περιστρεφόμενες ζώνες νεφών συχνά συνδέονται με μια φαινομενική ταλάντωση της καταιγίδας (Zehnder, 2021). Με την άφιξη ενός τροπικού κυκλώνα, αυξάνεται η τριβή της επιφάνειας, η οποία με τη

σειρά της αυξάνει τη σύγκλιση της ροής του αέρα στο μάτι και την κατακόρυφη κίνηση του αέρα που συμβαίνει εκεί. Η αυξημένη σύγκλιση και η αύξηση της υγρασίας του αέρα είναι υπεύθυνη για τις καταρρακτώδεις βροχές που σχετίζονται με τροπικούς κυκλώνες, οι οποίες ενδέχεται να υπερβαίνουν τα 250 mm (10 ίντσες) σε μια περίοδο 24 ωρών. Μερικές φορές μια καταιγίδα μπορεί να σταματήσει, επιτρέποντας τις έντονες βροχές να παραμείνουν σε μια περιοχή για αρκετές ημέρες. Σε ακραίες περιπτώσεις, έχουν αναφερθεί συνολικά βροχοπτώσεις 760 mm (30 ίντσες) σε περίοδο πέντε ημερών (Zehnder, 2021). Οι πιο αρχικές παρατηρήσεις των τροπικών κυκλώνων από μετεωρολογικά ραντάρ εντόπισαν αυτές τις ζώνες, οι οποίες έχουν συνήθως πλάτος 5-50 km και μήκος 100-300 km. Ωστόσο, πολλές πτυχές του σχηματισμού τους, της δυναμικής τους και της αλληλεπίδρασής τους με τον συμμετρικό στροβιλισμό δεν έχουν ακόμη επιλυθεί. Οι λωρίδες χωρίς κατακρημνίσματα μεταξύ των ζωνών τείνουν να είναι κάπως ευρύτερες από τις ζώνες βροχόπτωσης. Καθώς ο τροπικός κυκλώνας γίνεται πιο έντονος, τα εσωτερικά άκρα των ζωνών πλησιάζουν το κέντρο λιγότερο απότομα και μετά προσεγγίζουν τόξα των κύκλων (Smith, 2006). Η δομή τους φαίνεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7 Ανακλαστικότητα και ζώνες βροχόπτωσης ενός τροπικού κυκλώνα (Smith, 2006).

1.3.4 Ασύμμετρίες

Οι παρατηρήσεις των τροπικών κυκλώνων δείχνουν ότι οι καταιγίδες που μπορεί να προσεγγιστούν στενά ως αξονικά συμμετρικές είναι σπάνιες. Τέτοιες καταιγίδες τείνουν να είναι οι πιο έντονες και ακόμα είναι σύνηθες μόνο η περιοχή του εσωτερικού πυρήνα να είναι περίπου συμμετρική. Η εξωτερική περιοχή των καταιγίδων είναι πάντα ασύμμετρη, και οι ασθενέστερες καταιγίδες είναι συνήθως έντονα ασύμμετρες (Smith, 2006). Κανονικά μόνο οι περιοχές εσωτερικού πυρήνα έντονων τροπικών κυκλώνων παρουσιάζουν σημαντικό βαθμό αξονικής συμμετρίας. Αν και η εσωτερική δομή του πυρήνα ενός έντονου τροπικού κυκλώνα είναι σχεδόν αξονικά συμμετρική, παρατηρούνται συχνά σημαντικές ασύμμετρες δομές. Αυτές οι ασυμμετρίες στον εσωτερικό πυρήνα ενδέχεται να περιορίσουν την ένταση των τροπικών κυκλώνων (Wang, 2012).

1.4 Σχηματισμός

Ο Gray (1979) παρουσίασε έναν αριθμό παραγόντων που θεωρούνται σημαντικοί στο σχηματισμό τροπικών κυκλώνων, αλλά οι οποίοι δεν αποτελούν επαρκείς προϋποθέσεις για τροπική κυκλογένεση. Αυτοί οι παράγοντες είναι (Pytharoulis, 1999):

- i. Σχετικός στροβιλισμός στην κατώτερη τροπόσφαιρα: Παρατηρείται ότι οι τροπικοί κυκλώνες σχηματίζονται σε περιοχές με κυκλωνικό σχετικό στροβιλισμό στην κατώτερη τροπόσφαιρα (Pytharoulis, 1999). Όσο μεγαλύτερος ο στροβιλισμός της κατώτερης τροπόσφαιρας τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης κυκλώνα (Gray, 1975).
- ii. Παράμετρος Coriolis: Γενικά, οι τροπικοί κυκλώνες δεν σχηματίζονται πολύ κοντά στον ισημερινό (εντός 5° γεωγραφικού πλάτους) (Pytharoulis, 1999). Για την ανάπτυξη του χαρακτηριστικού ταχείας περιστροφής των τροπικών κυκλώνων, το κέντρο χαμηλής πίεσης πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 500 χλμ. (300 μίλια) μακριά από τον Ισημερινό (Zehnder, 2021). Βρέθηκε σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της συχνότητας γένεσης των τροπικών καταιγίδων και του γεωγραφικού πλάτους από τον Gray (1979) μεταξύ 3° και 15° B, με

περισσότερες τροπικές καταιγίδες να σχηματίζονται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη (Pytharoulis, 1999).

- iii. Κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου: Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι οι τροπικοί κυκλώνες συνήθως δεν σχηματίζονται σε περιοχές με μεγάλη κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου (Pytharoulis, 1999). Σύμφωνα με τους Landsea et al. (1998) στον τροπικό Βόρειο Ατλαντικό το κατώφλι της κατακόρυφης διάτμησης ανάμεσα στα 850 hPa και 200 hPa είναι τα 7.5-10 m/s. Εάν οι άνεμοι μεταβάλλονται πάρα πολύ με το υψόμετρο, ο θερμός πυρήνας του συστήματος δεν θα είναι πλέον κάθετα ευθυγραμμισμένος πάνω από το κέντρο χαμηλών πιέσεων (Zehnder, 2021).
- iv. Θερμοκρασίες επιφάνειας της θάλασσας: Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι τροπικοί κυκλώνες μπορούν να σχηματιστούν μόνο σε περιοχές με θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας θερμότερες από 26°-27°C μέχρι το βάθος των 60 m. Ο ωκεανός και ειδικά ο ζεστός ωκεανός είναι πολύ σημαντικός για τους τροπικούς κυκλώνες επειδή η ενέργεια για τη συντήρηση και ανάπτυξη τους λαμβάνεται από τη θάλασσα μέσω επιφανειακών ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας (Pytharoulis, 1999). Τα θερμότερα νερά εμφανίζονται στον Δυτικό Ειρηνικό, τη λεγόμενη «περιοχή της θερμής πισίνας», ενώ οι θερμοκρασίες των ωκεανών στο Νοτιοανατολικό Ειρηνικό είναι σχετικά κρύες (Smith, 2006). Ο Merrill (1987) εξέτασε την σχέση μεταξύ της έντασης της καταιγίδας και των θαλάσσιων επιφανειακών θερμοκρασιών για τροπικούς κυκλώνες του Ατλαντικού περιόδου 12 ετών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι πιο έντονες καταιγίδες συμβαίνουν πάνω από περιοχές με υψηλότερες θερμοκρασίες θάλασσας, αλλά η ύπαρξη θερμών υδάτων δεν είναι επαρκής συνθήκη για να οδηγήσει σε αύξηση της έντασης (DeMaria and Kaplan, 1994).
- v. Κατακόρυφη βαθμίδα ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και των 500 hPa: Η κυκλοφορία των τροπικών κυκλώνων, εκτείνεται σε ολόκληρη την τροπόσφαιρα. Οι κυκλώνες δεν εμφανίζονται εκτός εάν υπάρχει μια καλά καθιερωμένη κατακόρυφη σύζευξη του κάτω και πάνω μοτίβου ροής στην τροπόσφαιρα. Η δημιουργία καταιγιδοφόρων νεφών (cumulonimbus) λειτουργεί ως ο κύριος μηχανισμός αυτής της κατακόρυφης σύζευξης (Gray, 1975). Η παραγωγή πολυάριθμων καταιγιδοφόρων νεφών (cumulonimbus) κατά την κυκλογένεση φαίνεται να εξαρτάται επίσης από το

βαθμό της δυνητικής αστάθειας που συμβαίνει στην περιοχή (δηλαδή την κατακόρυφη βαθμίδα της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας, θε) (Pytharoulis, 1999).

- vi. Σχετική υγρασία: Οι τροπικοί κυκλώνες αποτελούνται από πολλά νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης. Στις τροπικές περιοχές μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη πάνω από τους ωκεανούς δεν συμβαίνει συνήθως όταν η σχετική υγρασία στη μέση τροπόσφαιρα ($\sim 700\text{-}500\text{ hPa}$) είναι μικρότερη από 50-60% (Pytharoulis, 1999). Πάνω από τους τροπικούς ωκεανούς η υψηλή μέσου επιπέδου υγρασία φαίνεται να ενισχύει, παρά να αναστέλλει την κατακόρυφη ανάπτυξη νεφών (Gray, 1975).

Οι τρεις πρώτοι παράγοντες είναι συναρτήσεις της οριζόντιας δυναμικής, ενώ οι τρεις τελευταίοι είναι θερμοδυναμικές παράμετροι. Όπως ανέλυσαν ο Gray (1975) και ο McBride (1981) οι θερμοδυναμικές παράμετροι ποικίλουν αργά με τον χρόνο και αναμένεται να παραμείνουν πάνω από κάθε όριο των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των τροπικών κυκλώνων κατά τη διάρκεια της εποχής κυκλώνων (McBride, 1995). Ο Frank (1987) σημείωσε ότι οι παραπάνω έξι περιβαλλοντικές παράμετροι δεν είναι ανεξάρτητες. Στις τροπικές περιοχές, περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας συνδέονται πάντοτε με αστάθεια υπό όρους λόγω των ασθενών οριζόντιων θερμοβαθμίδων στην χαμηλή τροπόσφαιρα. Έτσι, ο Frank μείωσε τη λίστα σε τέσσερις παραμέτρους συνδυάζοντας τις παραμέτρους (i) και (ii) στον απόλυτο στροβιλισμό σε χαμηλά επίπεδα, διαγράφοντας τη (v) και προσθέτοντας τη μέση κάθετη κίνηση προς τα πάνω στο (vi) (Smith, 2006).

Το καύσιμο για έναν τροπικό κυκλώνα παρέχεται με μεταφορά αισθητής και κυρίως λανθάνουσας θερμότητας από τον θερμό ωκεανό στον υπερκείμενο αέρα, που προέρχεται από την εξάτμιση στην επιφάνεια της θάλασσας. Καθώς ο θερμός, υγρός αέρας ανεβαίνει, διογκώνεται και ψύχεται, γρήγορα θα κορεστεί και απελευθερώνει λανθάνουσα θερμότητα μέσω της συμπύκνωσης υδρατμών. Η στήλη του αέρα στον πυρήνα της αναπτυσσόμενης διαταραχής θερμαίνεται και υγραίνεται από αυτή τη διαδικασία. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού, ανερχόμενου αέρα και του ψυχρότερου περιβάλλοντος προκαλεί την αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας του αέρα που ανέρχεται, ενισχύοντας περαιτέρω την ανοδική του κίνηση (Zehnder, 2021).

1.5 Το πρόβλημα της τροπικής κυκλογένεσης

Η τροπική κυκλογένεση είναι ένα δυσνόητο, αλλά σημαντικό πρόβλημα της μετεωρολογίας. Δύο ζητήματα, τα οποία σχετίζονται με την ελλιπή κατανόηση αυτού του προβλήματος και την αδυναμία μας να προβλέψουμε σωστά το χρόνο και τη θέση του σχηματισμού τροπικών κυκλώνων, θα συζητηθούν εδώ. Αυτά είναι (Pytharoulis, 1999):

- η έλλειψη δεδομένων - κυρίως στην άνω τροπόσφαιρα - πάνω από τους τροπικούς ωκεανούς και
- η πιθανολογική φύση της τροπικής κυκλογένεσης

Πέρα από αυτά τα προβλήματα ο Smith (2006) αναφέρει το πρόβλημα του διαχωρισμού, δηλαδή την δυσκολία διαχωρισμού του κυκλώνα με το περιβάλλον του.

1.5.1 Έλλειψη δεδομένων για τους τροπικούς ωκεανούς

Η πλειονότητα των τροπικών κυκλώνων σχηματίζεται πάνω από τον ανοιχτό ωκεανό, πολύ μακριά από οποιεσδήποτε παράκτιες περιοχές και ειδικά από περιοχές όπου λαμβάνονται τακτικά παρατηρήσεις. Είναι γνωστό ότι οι παρατηρήσεις των ωκεανών είναι πολύ περιορισμένες. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος για σφάλματα ανάλυσης του μοντέλου και συνεπώς για σφάλματα πρόβλεψης (Pytharoulis, 1999).

1.5.2 Η πιθανολογική φύση της τροπικής κυκλογένεσης

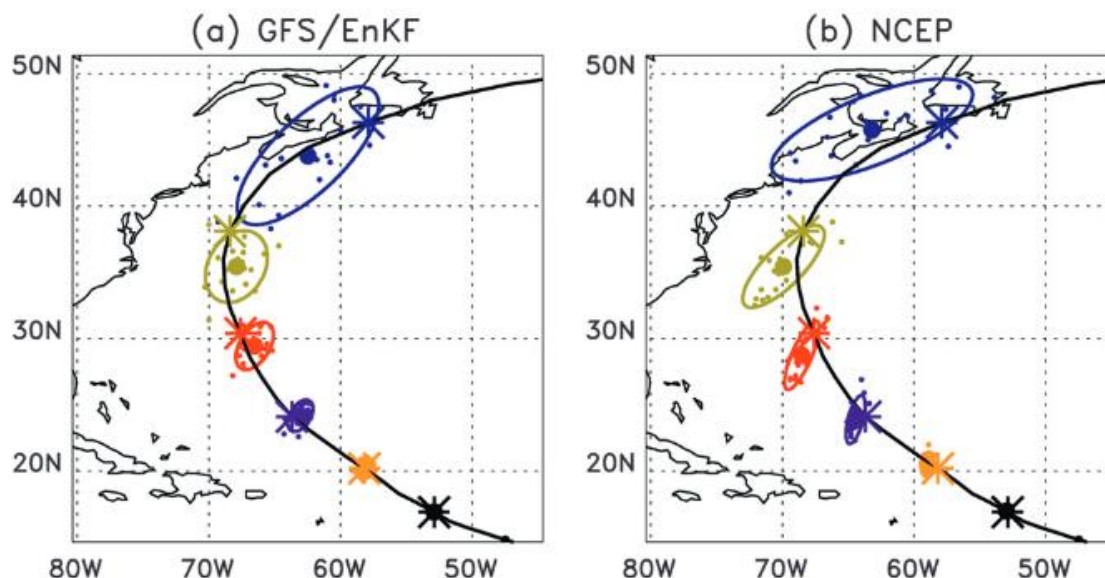
Αν και πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να βρουν κλιματολογικές και συνοπτικές συνθήκες μεγάλης κλίμακας που μπορεί να ευνοούν την τροπική κυκλογένεση (π.χ. Gray 1979) έχει υποστηριχθεί από τον Ooyama (1982) ότι αυτές οι συνθήκες δεν καθορίζουν άμεσα τη διαδικασία της γένεσης, αλλά μπορούν να επηρεάσουν μόνο την πιθανότητα να συμβεί. Υποστήριξε ότι το κύριο πρόβλημα με την τροπική κυκλογένεση έγκειται στην πιθανολογική της φύση η οποία δεν οφείλεται απλώς στην έλλειψη δεδομένων, αλλά συνδέεται κυρίως με τη δυναμική που εξαρτάται από την κλίμακα της ατμόσφαιρας (Pytharoulis, 1999).

1.6 Πρόγνωση

Οι τροπικοί κυκλώνες αποτελούσαν ανέκαθεν ανησυχία των μετεωρολόγων και υπάρχουν πολλές μελέτες σχετικά με τις αξονικές συμμετρικές δομές, τους δυναμικούς μηχανισμούς και τις τεχνικές πρόβλεψης τα τελευταία 100 χρόνια. Ωστόσο, πολλά προβλήματα με τις δυνατότητες πρόβλεψης παραμένουν, ιδιαίτερα με την ένταση της τροπικής κυκλογένεσης και τις προβλέψεις επικινδυνότητας. Γενικά, τα πιο δημοφιλή δυναμικά μοντέλα πρόβλεψης τροπικών κυκλώνων έχουν σχετικά χαμηλή ακρίβεια, η οποία οφείλεται κυρίως στην ανακριβή εκκίνηση του στροβιλισμού των τροπικών κυκλώνων, την ατελή αναπαράσταση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών και την προσεγγιστική ανάλυση.

Προκειμένου να επιλυθούν αυτά τα προβλήματα των παραδοσιακών μεθόδων, οι επιστήμονες άρχισαν να σκέφτονται τη χρήση μηχανικής μάθησης (Machine Learning, ML) για εξερεύνηση δεδομένων δορυφόρων, ραντάρ, παρατηρήσεων κ.λ.π. για τη βελτίωση των δυνατοτήτων πρόβλεψης των τροπικών κυκλώνων τα τελευταία χρόνια. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, ως μέσο τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence), μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις εφαρμογές τους: επιλογή χαρακτηριστικών, ομαδοποίηση και παλινδρόμηση ή ταξινόμηση (Chen et al., 2020). Η ακρίβεια των επίσημων προβλέψεων της πορείας των τροπικών κυκλώνων από τα Διεθνή Μετεωρολογικά Κέντρα έχει βελτιωθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Εν μέρει, αυτό μπορεί να αποδοθεί στις γενικές βελτιώσεις των αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού, όπως την καλύτερη ανάλυση, τις βελτιωμένες μεθόδους αρχικοποίησης, τις πιο ρεαλιστικές φυσικές παραμετροποιήσεις και τη διαθεσιμότητα μεγαλύτερου αριθμού μοντέλων για γενικές συνδυαστικές προβλέψεις. Εν τω μεταξύ, η βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων έντασης έχει αποδειχθεί πολύ πιο δύσκολη. Ένα σημαντικό συστατικό του προγράμματος βελτίωσης των προβλέψεων κυκλώνων είναι η ανάπτυξη σύγχρονων μεθόδων βασισμένες σε παγκόσμια στοχαστικά/συνολικά προγνωστικά συστήματα (ensemble prediction systems). Καθώς τα στοχαστικά προγνωστικά συστήματα βελτιώνονται, η χρησιμότητα των προϊόντων πρόβλεψης τυφώνων θα μπορούσε επίσης να βελτιωθεί δραματικά (Hamill et al., 2011). Στο Σχήμα 1.8 διακρίνεται η πορεία του κυκλώνα Bill (2009) πως αποτυπώνεται από 2 στοχαστικά μοντέλα σε σχέση με την πορεία που ακολούθησε στην πραγματικότητα ο κυκλώνας και αναγράφεται με την μαύρη γραμμή. Διακρίνεται λοιπόν ότι χρησιμοποιώντας τα

στοχαστικά μοντέλα η ακρίβεια της πρόβλεψης αυξάνεται και η πιθανή θέση στην οποία θα βρεθεί ο κυκλώνας προσεγγίζει την πραγματική. Όπως φαίνεται οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές και η ακρίβεια αρκετά καλή κυρίως για τις προβλέψεις πάνω από τη θάλασσα.



Σχήμα 1.8 Η πορεία του κυκλώνα Bill. Με * καταγράφεται η πραγματική τοποθεσία του σε διάφορες χρονικές στιγμές ενώ με βούλα σημειώνεται η τοποθεσία έτσι όπως αποδόθηκε από τα μοντέλα. Με μαύρο χρώμα καταγράφεται η μέρα 0 και ώρα 00 UTC, με πορτοκαλί +1 μέρα, με μπλε +2, με κόκκινο +3, με πράσινο +4 και με μπλε +5. Οι ελλείψεις περικλείουν το 90% των προγνωστικών θέσεων που έδωσε το ensemble (Hamill et al., 2011)

1.7 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να μελετηθεί και να εξεταστεί η δομή του κυκλώνα IRMA και η κίνηση του συστήματος για την χρονική περίοδο που έδρασε. Γενικά ο κυκλώνας αυτός είναι ο τέταρτος πιο επιζήμιος καταγεγραμμένος κυκλώνας στην ιστορία των ΗΠΑ προκαλώντας ζημιές που ανέρχονται στα 50 δισεκατομμύρια δολάρια και στερώντας τη ζωή 134 συνανθρώπων μας. Το έτος εμφάνισης του ήταν το 2017 και η περιοχή στην οποία αναπτύχθηκε ήταν η λεκάνη του τροπικού Βόρειου Ατλαντικού, που αυτή την χρονιά αποτέλεσε μια περιοχή έντονης κυκλωνικής δραστηριότητας. Είχε μια μεγάλη περίοδο δράσης από τα τέλη Αυγούστου μέχρι τις 17 Σεπτεμβρίου αποκτώντας τη μικρότερη πίεση του στις 6 Σεπτεμβρίου (914 hPa). Παρατηρώντας την σπουδαιότητα αυτού του φαινομένου κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη του.

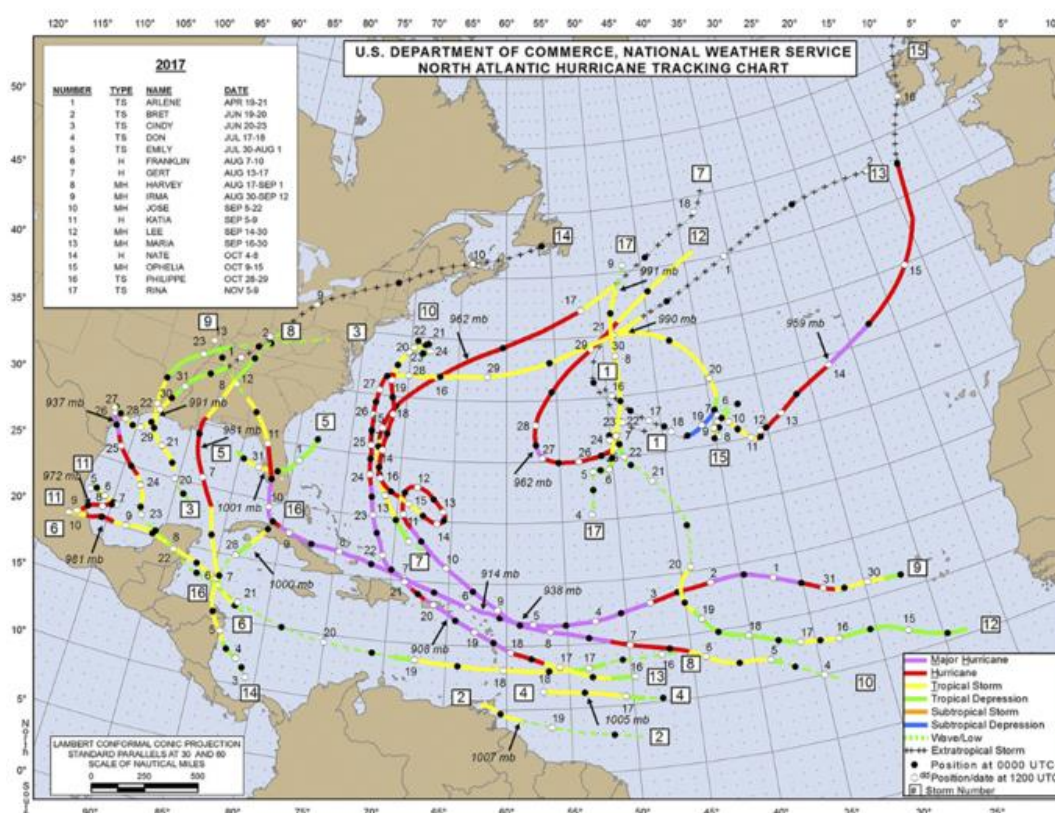
Κεφάλαιο 2. Εξέλιξη του κυκλώνα Irma (2017)

2.1 Περίοδος Τροπικών Κυκλώνων 2017 στον Τροπικό Βόρειο Ατλαντικό

Η περίοδος τροπικών κυκλώνων του 2017 στον Βόρειο Ατλαντικό ήταν μια από τις πιο δραστήριες στην πρόσφατη ιστορία. Η σεζόν κατέγραψε συνολικά 17 ονομασμένες καταιγίδες (Σχήμα 2.1), εκ των οποίων οι 10 έγιναν κυκλώνες και οι 6 έγιναν ισχυροί κυκλώνες και ένα δείκτη συσσωρευμένης ενέργειας κυκλώνα (Accumulated Cyclone Energy, ACE) 226 (Camp et al., 2018).). Σύμφωνα με την εργασία των Klotzbach et al., (2018) ολοκληρωμένες μετρήσεις όπως ημέρες ισχυρού κυκλώνα και συσσωρευμένη ενέργεια κυκλώνων κατατάσσονται επίσης στις 10 κορυφαίες περιόδους, όταν συγκρίθηκαν με το ιστορικό αρχείο από το 1851, με τον Ατλαντικό να βιώνει τις τρίτες σε σειρά περισσότερες ημέρες ισχυρού κυκλώνα από το 1950. Η συσσωρευμένη ενέργεια κυκλώνων του Σεπτεμβρίου 2017 ήταν κατά 3,5 τυπικές αποκλίσεις μεγαλύτερη από τον μέσο όρο του 1981-2010 ($105,6 \times 10^4 \text{ kt}^2$). Τρεις κυκλώνες (Irma, Jose, Maria) απέκτησαν μεμονωμένες τιμές συσσωρευμένης ενέργειας μεγαλύτερες από 40 τον Σεπτέμβριο. Με βάση τα δεδομένα από το 1966 έως το 2016, μόνο το 2% του συνόλου των τροπικών κυκλώνων του Ατλαντικού είχε ACE 40 ή μεγαλύτερη, και μόνο σε 4 χρονιές από το 1851 αυτοί ήταν περισσότεροι από ένας. Η περίοδος τροπικών κυκλώνων του 2017 στον Ατλαντικό ήταν η πρώτη που είχε τρεις. Στην πραγματικότητα, ήταν η πρώτη χρονιά που καταγράφηκε ότι το ηπειρωτικό τμήμα των ΗΠΑ χτυπήθηκε από δύο κυκλώνες κατηγορίας 4 (Harvey και Irma). Αυτό που ξεχώρισε το 2017 από τις περισσότερες ενεργές περιόδους ήταν ο εξαιρετικά ενεργός Σεπτέμβριος. Μέχρι τα τέλη Αυγούστου, ωστόσο, η δραστηριότητα πλησίαζε τον μακροπρόθεσμο μέσο όρο συσσωρευμένης ενέργειας, παρά τον κυκλώνα Harvey. Ο Harvey ήταν ένας έντονος κυκλώνας, αλλά επειδή ο χρόνος του ως ένας ισχυρός κυκλώνας ήταν μικρός, ο κυκλώνας παρήγαγε μόνο μικρή συσσωρευμένη ενέργεια. Ο Σεπτέμβριος 2017, από την άλλη πλευρά, ήταν ο πιο ενεργός ημερολογιακός μήνας για τον Ατλαντικό για αρκετές μετρήσεις έντασης και διάρκειας, όπως ονομασμένες ημέρες καταιγίδας, ημέρες κυκλώνα, ημέρες ισχυρού κυκλώνα και ACE. Η περίοδος τροπικών κυκλώνων 2017 του Ατλαντικού δημιούργησε επίσης συνολική οικονομική ζημία άνω των 260 δισεκατομμυρίων (δολάρια ΗΠΑ) σύμφωνα με τα Εθνικά Κέντρα

Περιβαλλοντικών Προγνώσεων, ανταγωνιζόμενο με το 2005 ως μία από τις πιο καταστροφικές καταγεγραμμένες εποχές (Klotzbach et al., 2018).

Η εξαιρετικά ενεργή περίοδος κυκλώνων 2017 του Ατλαντικού δεν προβλέφθηκε καλά από τα περισσότερα εποχιακά μοντέλα σύμφωνα με τους Klotzbach et al., 2018. Παρόλο που οι προβλέψεις που εκδόθηκαν στις αρχές Αυγούστου προέβλεπαν μια εντονότερη από τον μέσο όρο περίοδο κυκλώνων στο τροπικό Ατλαντικό, προειδοποίησαν για πολύ λιγότερη δραστηριότητα από αυτή που παρατηρήθηκε. Αν και οι δείκτες ENSO (El Niño Southern Oscillation) SST (Sea-Surface Temperature) έδειξαν μια ουδέτερη κατάσταση ως προς το El Niño τον Ιούνιο / Ιούλιο, ο δείκτης κυκλοφορίας Pacific Walker ήταν στα υψηλότερα επίπεδα που είχε καταγραφεί (από το 1982). Ο δείκτης Niño-3,4 αυτό τον μήνα ήταν $+0,8^{\circ}\text{C}$, δείχνοντας ένα αδύναμο El Niño. Κατά τη διάρκεια του ίδιου μήνα, ωστόσο, ο δείκτης κυκλοφορίας Pacific Walker ήταν $+1$ τυπικές αποκλίσεις, υποδηλώνοντας ένα πολύ ευνοϊκό περιβάλλον ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας για τους τροπικούς κυκλώνες του Ατλαντικού (Klotzbach et al., 2018).



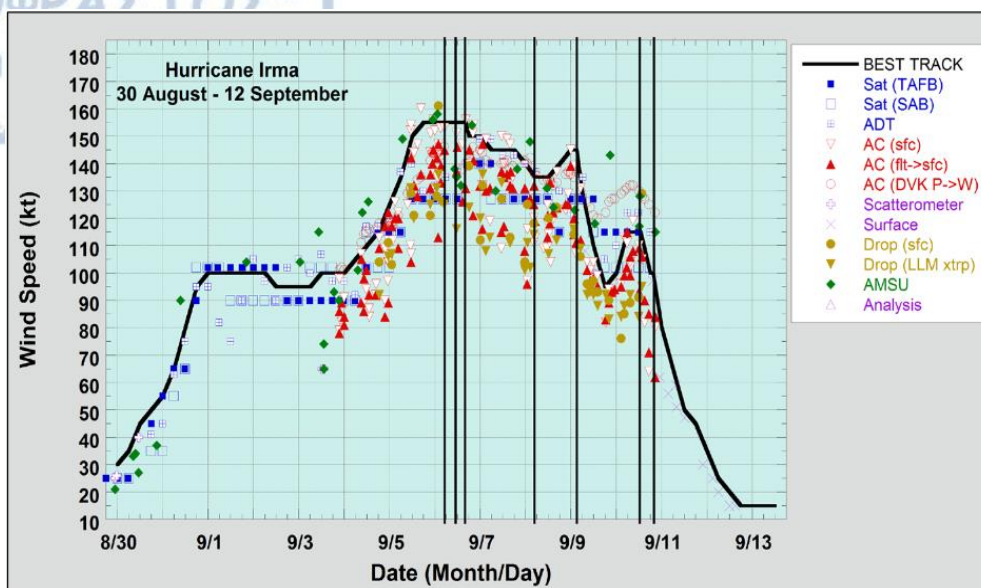
Σχήμα 2.1 Τχη όλων των επώνυμων τροπικών καταιγίδων στον Ατλαντικό το 2017. National Hurricane Center (Klotzbach et al., 2018)

2.2 Τροπικός Κυκλώνας Irma – Θάνατοι, Καταστροφές

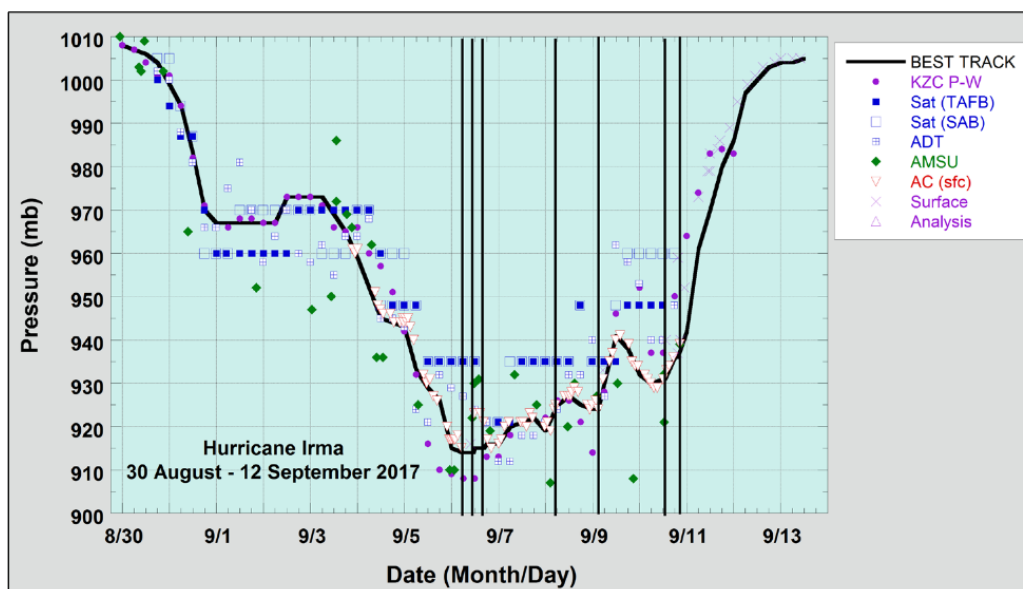
Η Irma ήταν ένας από τους τροπικούς κυκλώνες που συνέβησαν την περίοδο του 2017. Προκάλεσε 44 άμεσους θανάτους ως αποτέλεσμα των ισχυρών ανέμων, των ισχυρών βροχοπτώσεων και των υψηλών κυμάτων στα νησιά της Καραϊβικής και τις νοτιοανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες. Η πλειοψηφία των συνεπειών ήταν στα νησιά της Καραϊβικής, όπου οι άνεμοι της Irma ήταν οι ισχυρότεροι. Έντεκα άμεσοι θάνατοι αναφέρθηκαν σε 2 νησιά της Καραϊβικής, εννέα στην Κούβα, τέσσερις στο Άγιο Μαρτίνο, τέσσερις στις Βρετανικές Παρθένες Νήσους, τρεις στις Παρθένες Νήσους των ΗΠΑ, τρεις στη Μπαρμπούντα, ένας στα Μπαρμπάντος, ένας στην Αϊτή και ένας στην Ανγκουίλα. Στις ηπειρωτικές Ηνωμένες Πολιτείες, αναφέρθηκαν επτά άμεσοι θάνατοι και σημειώθηκαν επιπλέον 85 έμμεσοι θάνατοι, εκ των οποίων οι 80 στην πολιτεία της Φλόριντα. Εκατοντάδες άλλοι τραυματίστηκαν πριν, κατά τη διάρκεια ή μετά τον τυφώνα. Περίπου 6 εκατομμύρια κατοικίες στη Φλόριντα εκκενώθηκαν από τις παράκτιες περιοχές (Blake, 2018).

2.2.1 Πορεία της πίεσης και της ταχύτητας του ανέμου

Στα Σχήματα 2.2 και 2.3 φαίνεται η χρονοσειρά της ελάχιστης πίεσης και του μέγιστου ανέμου από διάφορες παρατηρήσεις και καταγραφές από την τεχνική έκθεση του Εθνικού Κέντρου Κυκλώνων για τον κυκλώνα Irma. Μελετώντας τα δύο σχήματα συνδυαστικά όσο μειώνεται η πίεση τόσο αυξάνεται η σφοδρότητα του ανέμου λόγω ενίσχυσης της οριζόντιας βαροβαθμίδας. Διακρίνεται ότι μετά το πρώτο χτύπημα του κυκλώνα στις 06Z, 6 Σεπτεμβρίου η ταχύτητα του ανέμου συνεχώς μειώνεται. Επίσης η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου φτάνει κοντά στα 160 kt την στιγμή που η ελάχιστη πίεση είναι 914 hPa.



Σχήμα 2.2 Μετρήσεις/εκτιμήσεις ταχύτητας ανέμου και καμπύλη επιφανειακής ταχύτητας ανέμου για τον κυκλώνα Irma, 30 Αυγούστου - 12 Σεπτεμβρίου 2017. Τα σημεία προέρχονται από διάφορες παρατηρήσεις και τεχνικές μελέτες. Οι διακεκομμένες κάθετες γραμμές αντιστοιχούν σε 0000 UTC, και οι συμπαγείς κάθετες γραμμές αντιστοιχούν στη μετάβαση του κυκλώνα σε χερσαίες περιοχές (landfall) (Cangialosi et al., 2018).

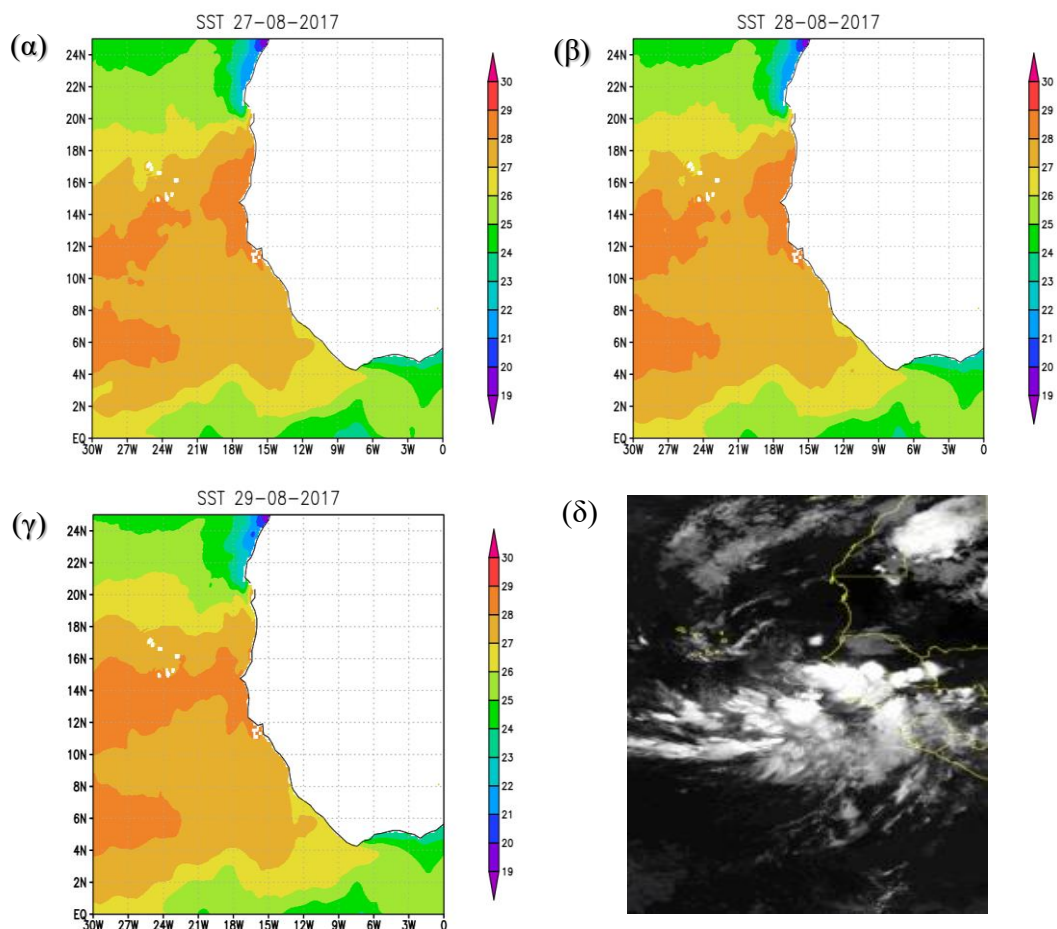


Σχήμα 2.3 Παρατηρήσεις/εκτιμήσεις πίεσης και καμπύλη ελάχιστης πίεσης για τον κυκλώνα Irma, 30 Αυγούστου - 12 Σεπτεμβρίου 2017. Τα σημεία προέρχονται από διάφορες παρατηρήσεις και τεχνικές μελέτες. Οι διακεκομμένες κάθετες γραμμές αντιστοιχούν σε 0000 UTC και οι συμπαγείς κάθετες γραμμές αντιστοιχούν στη μετάβαση του κυκλώνα σε χερσαίες περιοχές (Cangialosi et al., 2018).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την πτυχιακή προέρχονται κυρίως από επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Center for Medium range Weather Forecasts – ECMWF <https://www.ecmwf.int/>) και η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό Grads (<http://cola.gmu.edu/grads/>). Η χωρική τους ανάλυση είναι $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (γεωγραφικό πλάτος και μήκος) και είναι δεδομένα μορφής πλέγματος (gridded data). Η επεξεργασία τους μέσω του grads περιλάμβανε τη δημιουργία χαρτών με την προβολή των παραμέτρων τόσο σε οριζόντιο επίπεδο όσο και σε κατακόρυφες τομές. Η οριζόντια και κατακόρυφη προβολή θα μελετηθούν σε ξεχωριστά κεφάλαια γιατί κάθε τύπος διαγράμματος/χάρτη καιρού υπογραμμίζει και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Επίσης για την εξακρίβωση του κέντρου του συστήματος σε κάθε στάδιο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του Εθνικού Κέντρου Κυκλώνων (National Hurricane Center) των Η.Π.Α., τα οποία θα σημειώνονται στους χάρτες καιρού σημειακά.

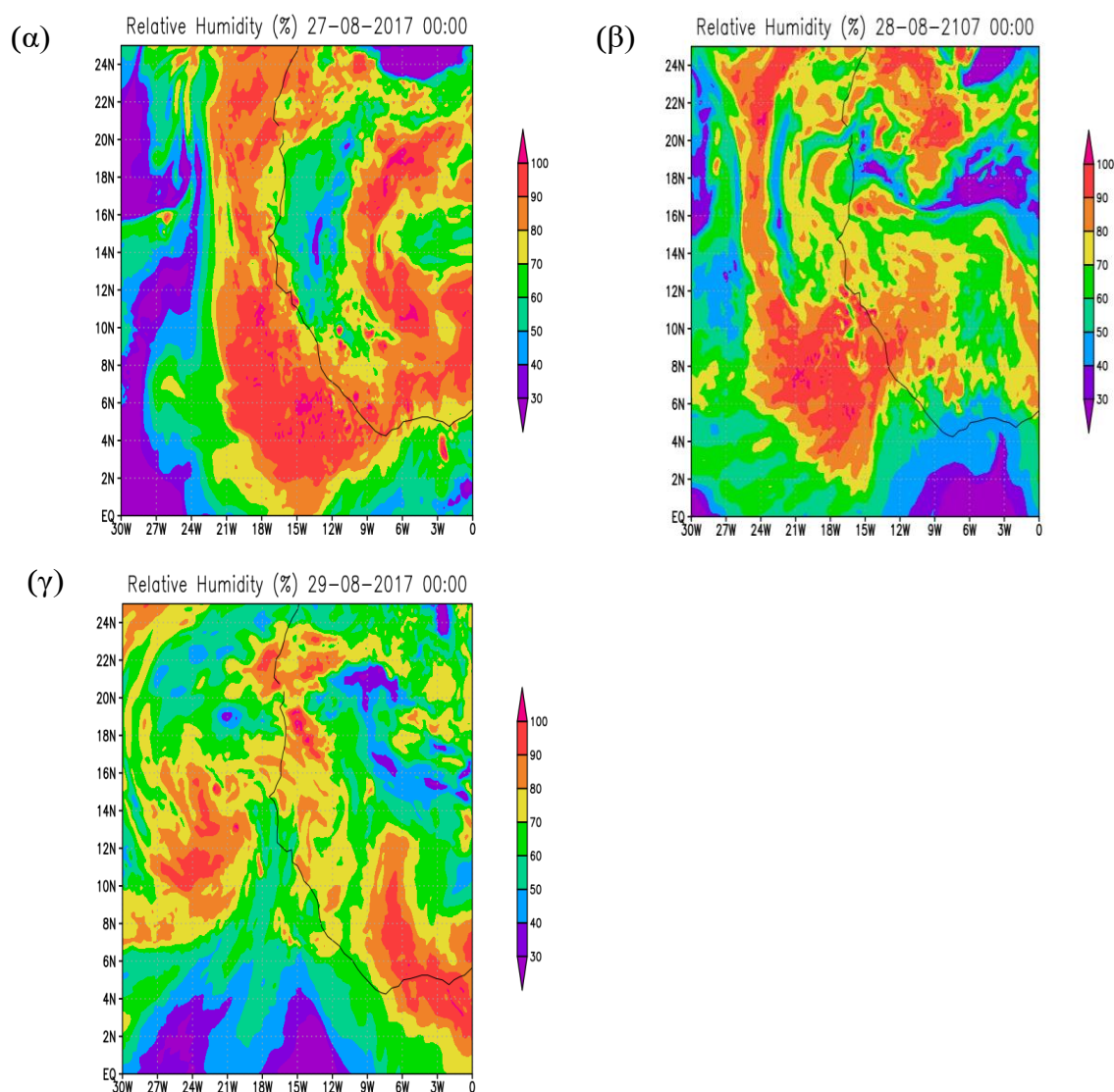
2.4 Συνθήκες πριν την γέννηση του τροπικού κυκλώνα Irma

Πριν η Irma μετατραπεί σε τροπική ύφεση όταν ακόμα είχε την μορφή αφρικανικού κύματος, οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας είχαν αυτή την κατανομή που φαίνεται στα Σχήματα 2.4 (α,β,γ). Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες είναι πάνω από 26 °C στην περιοχή που ξεκίνησε το Αφρικανικό κύμα. Γενικά τα Αφρικανικά Ανατολικά κύματα σύμφωνα με τον Pytharoulis (1999) εμφανίζονται σε ένα γεωγραφικό πλάτος περίπου 15° N όπου υπάρχει ο Αφρικανικός Ανατολικός Αεροχείμαρρος. Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση βλέπουμε ότι οι επιφανειακές θαλάσσιες θερμοκρασίες σε αυτή την περιοχή έξω από την Δυτική ακτή της Βόρειας τροπικής Αφρικής είναι 27-28 °C και τοπικά 28-29 °C. Στο Σχήμα 2.4 (δ) διακρίνεται η δορυφορική εικόνα του ανατολικού κύματος στις 28 Αυγούστου 2017, 00Z.



Σχήμα 2.4: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (°C) όταν ξεκίνησε το αφρικανικό κύμα από την Αφρική στις: (α) 27 Αυγούστου 2017, 00Z (β) 28 Αυγούστου 2017, 00Z (γ) 29 Αυγούστου 2017, 00Z (δ) Υπερύθρινη δορυφορική εικόνα στις 28 Αυγούστου 2017, 00Z (<https://en.sat24.com/en>).

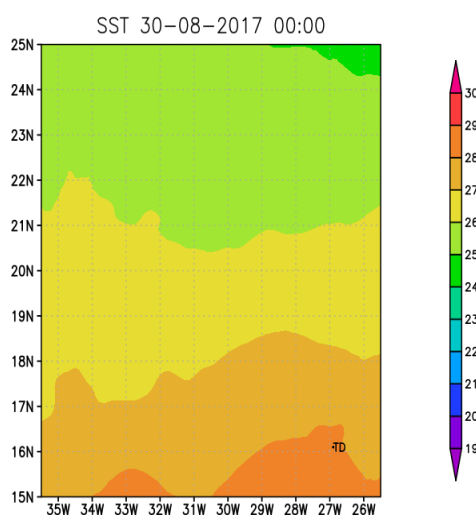
Εκτός από τις θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας θα μελετηθούν και οι συνθήκες υγρασίας στα 600 hPa καθώς παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό ενός τροπικού κυκλώνα. Τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.5 α,β,γ) δείχνουν την κατανομή της σχετικής υγρασίας στην περιοχή που κινήθηκε το τροπικό κύμα από το οποίο προήλθε η Irma. Βλέπουμε ότι καθώς πλησιάζουμε στη μέρα σχηματισμού της ύφεσης οι υψηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας συγκεντρώνονται στην περιοχή μεταξύ 10° N και 18° N δηλαδή στην περιοχή σχηματισμού της.



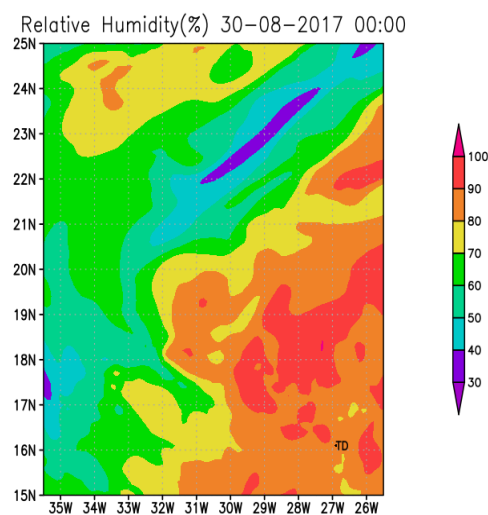
Σχήμα 2.5: Σχετική υγρασία (%) όταν ξεκίνησε το αφρικανικό κύμα από την Αφρική στις (α) 27 Αυγούστου 2017, 00Z (β) 28 Αυγούστου 2017, 00Z (γ) 29 Αυγούστου 2017, 00Z.

2.5 Συνθήκες γέννησης του τροπικού κυκλώνα Irma

Στις 30 Αυγούστου 2017 και ώρα 00Z το τροπικό κύμα που αναχώρησε από τη δυτική ακτή της Αφρικής, σε γεωγραφικό πλάτος 16.1°N και γεωγραφικό μήκος 26.9°W όπου οι συνθήκες ήταν ευνοϊκές, μετατράπηκε σε Τροπική ύφεση (Tropical Depression). Κατά την γένεση της τροπικής ύφεσης η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας κυμαινόταν μεταξύ $28-29^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 2.6). Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες συνεπάγονται και μεγάλη αστάθεια στην ατμόσφαιρα κάτι που ενισχύει ακόμα περισσότερο την κυκλογένεση. Η σχετική υγρασία μελετάται μεταξύ 500-700 hPa, έτσι σε αυτή την πτυχιακή επιλέχθηκε η μελέτη για το συγκεκριμένο μέγεθος να γίνει σε ένα μέσο επίπεδο μεταξύ αυτών των δύο δηλαδή στα 600 hPa. Μαζί με αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες οι συνθήκες υγρασίας στα 600 hPa ήταν ευνοϊκές και λειτούργησαν σαν καύσιμο για τον σχηματισμό του τροπικού κυκλώνα. Η υψηλή υγρασία στη μέση τροπόσφαιρα εμποδίζει τα καθοδικά ρεύματα (downdrafts) των αρχικών καταιγίδων να μεταφέρουν χαμηλές τιμές ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας στο οριακό στρώμα και να εμποδίσουν την περαιτέρω ανάπτυξή τους. Πιο συγκεκριμένα, η σχετική υγρασία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7 ήταν αρκετά υψηλή με τιμές που άγγιζαν το 90%. Στα σχήματα επίσης σημειώνεται το σημείο που εμφανίστηκε η ύφεση (TD: Tropical depression). Αρκετά βορειότερα από την περιοχή σχηματισμού της ύφεσης η σχετική υγρασία έχει μικρότερες τιμές ($\sim 40-70\%$).



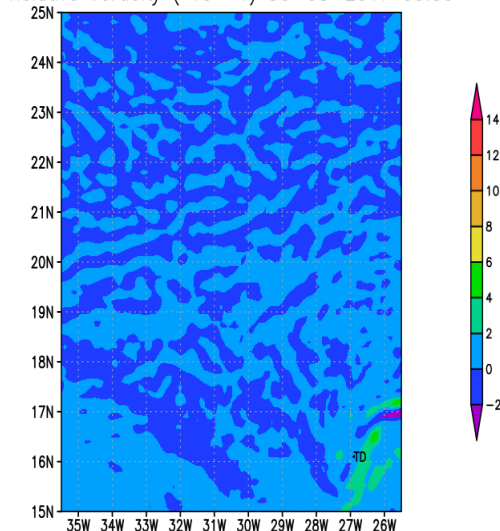
Σχήμα 2.6: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας ($^{\circ}\text{C}$) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma πήρε την μορφή ύφεσης.



Σχήμα 2.7: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma πήρε την μορφή ύφεσης.

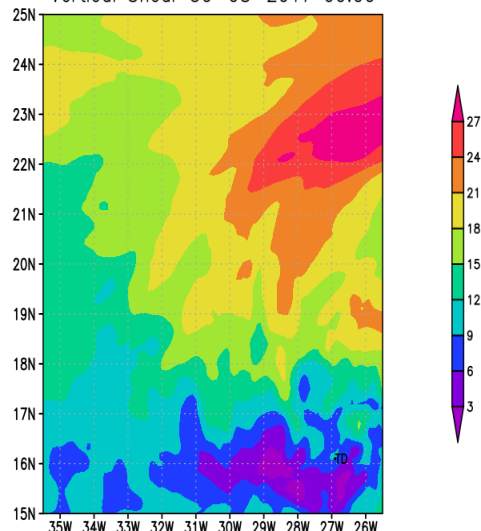
Η μελέτη των συνθηκών στα χαμηλότερα επίπεδα (950 hPa) για τις 30 Αυγούστου, 00Z έδειξε ότι ο στροβιλισμός ήταν κυκλωνικός στο σημείο που αναπτύχθηκε η ύφεση (Σχήμα 2.8). Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ $2 \cdot 10^{-4}$ και $4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ φανερώνοντας ότι είχαμε κυκλωνική κυκλοφορία δηλαδή στροβιλισμό αντίθετα με την φορά των δεικτών του ρολογιού. Ένα ακόμα μέγεθος που θα μελετηθεί είναι η κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου και για αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν τα ισοβαρικά επίπεδα 200 hPa και 850 hPa (Landsea et al., 1998). Στα αρχικά στάδια σχηματισμού λοιπόν η διάτμηση του ανέμου στο σημείο που σχηματίστηκε η ύφεση πήρε τιμές (3-6 m/s) που είναι μικρότερες του κατωφλίου των 7.5-10 m/s (Landsea et al., 1998) για τροπική κυκλογένεση στον Ατλαντικό. Η αντίθεση μεταξύ του σημείου και της περιοχής βόρεια αυτού είναι πολύ μεγάλη (27 m/s 6° βόρεια ενώ στο σημείο μελέτης ~3-6 m/s) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Βέβαια η διάτμηση συνηθίζεται να μελετάται μεσοποιημένη σε μεγαλύτερα διαστήματα (π.χ. 5 μέρες) και όχι στιγμιαία, παρόλα αυτά και η στιγμιαία τιμή είναι αντιπροσωπευτική της κατάστασης που επικρατούσε. Όλα αυτά συνέβαλαν στην αρχή ενός από τα πιο καταστροφικά φαινόμενα που έπληξαν τις νοτιοανατολικές ακτές της Αμερικής και πολλά νησιά του Βόρειου Ατλαντικού. Πέρα από όλα αυτά, το γεγονός ότι μιλάμε για μια περιοχή που βρίσκεται σχετικά μακριά από τον Ισημερινό και επηρεάζεται από την δύναμη Coriolis (αυξάνοντας τον απόλυτο στροβιλισμό) ευνόησε ακόμα περισσότερο την κυκλογένεση.

Relative Vorticity ($\cdot 10^{-4}$) 30-08-2017 00:00



Σχήμα 2.8: Σχετικός στροβιλισμός (s^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma πήρε την μορφή ύφεσης.

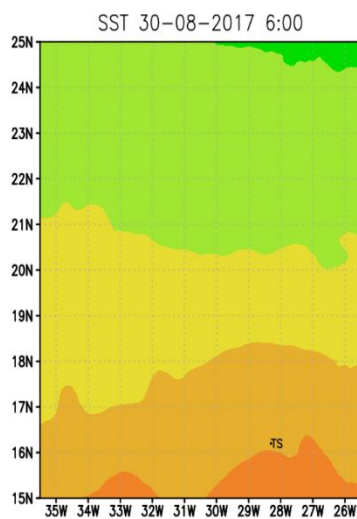
Vertical Shear 30-08-2017 00:00



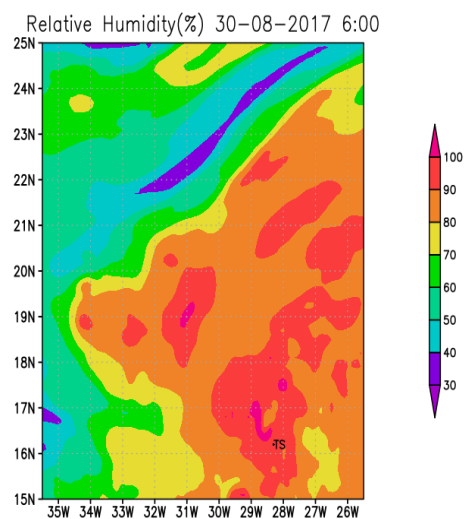
Σχήμα 2.9: Κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου (m/s) μεταξύ 200 και 850 hPa στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma πήρε την μορφή ύφεσης..

2.6 Εξέλιξη του τροπικού κυκλώνα Irma

Η ύφεση αυτή δεν άργησε να γίνει τροπική καταιγίδα καθώς την ίδια μέρα (30 Αυγούστου) στις 06Z μετατράπηκε σε καταιγίδα και μαζί άλλαξαν και οι συνθήκες. Η θερμοκρασία της θάλασσας σε εκείνο το σημείο (γεωγραφικό μήκος 28.3°W και πλάτος 16.2° N) παραμένει στα ίδια επίπεδα με το σημείο που εμφανίστηκε η ύφεση (Σχήμα 2.10). Από την άλλη η σχετική υγρασία στο επίπεδο των 600 hPa εμφανίζει μια αύξηση περίπου 10 % και οι συνθήκες τείνουν να γίνουν κορεσμένες (90%-100%). Αυτό που είναι αξιοσημείωτο και σε αυτό το στάδιο εξέλιξης της Irma, είναι αυτή η μεγάλη διαφορά στο ποσοστό σχετικής υγρασίας της γύρω περιοχής με την περιοχή που βρίσκεται 10° μακριά της (Σχήμα 2.11). Η παρουσία υψηλής σχετικής υγρασίας όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο είναι ένας παράγοντας που ευνοεί τον σχηματισμό ενός τροπικού κυκλώνα. Στα Σχήματα 2.10 και 2.11 φαίνεται η στιγμή που η ύφεση μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα (TS: Tropical Storm) και πήρε το όνομα Irma.



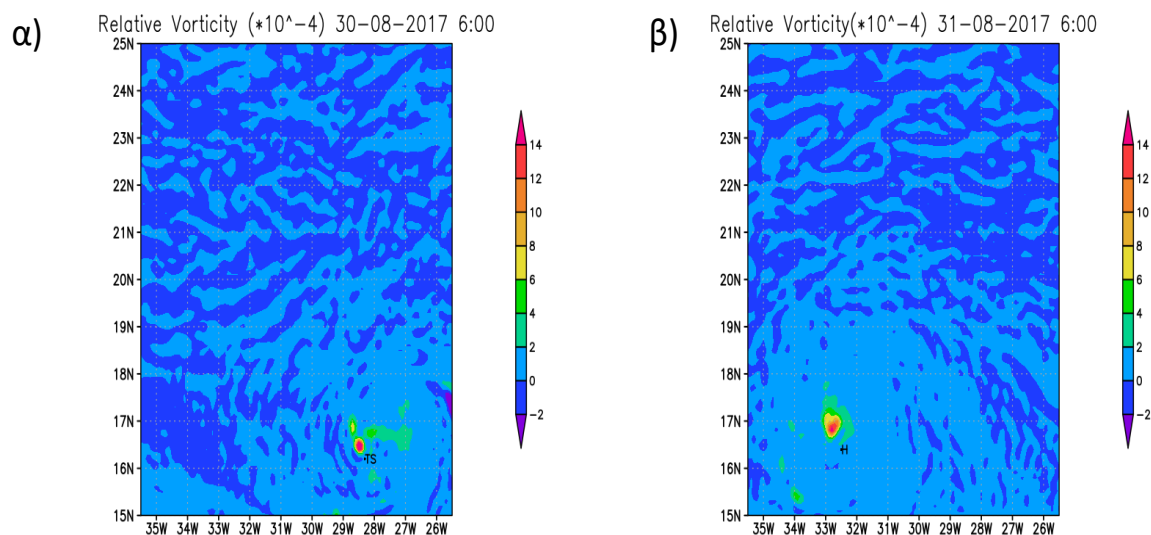
Σχήμα 2.10: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (°C) στις 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα.



Σχήμα 2.11: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στις 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα.

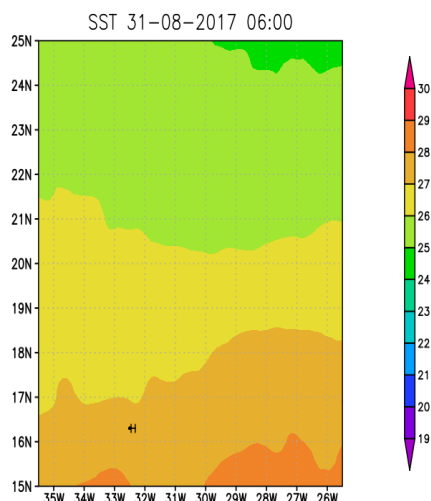
Ο σχετικός στροβιλισμός στο επίπεδο των 950 hPa παραμένει κυκλωνικός αλλά οι τιμές γίνονται μεγαλύτερες και αγγίζουν το $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Σχήμα 2.12α). Η αύξηση αυτού του χαμηλού στροβιλισμού φανερώνει ότι υπάρχουν όλα τα απαραίτητα συστατικά που θα εξελιχθούν σε κυκλώνα. Όλες οι συνθήκες πλέον δείχνουν την

ύπαρξη ενός συστήματος αρκετά ισχυρού. Ακριβώς μια μέρα μετά (31 Αυγούστου, 06Z) μετατράπηκε σε κυκλώνα (H: Hurricane) και είχαμε μεγάλη αύξηση στον στροβιλισμό χαμηλού επιπέδου (με τιμές μεγαλύτερες από $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12β. Πλέον ο στροβιλισμός αρχίζει να γίνεται πιο οργανωμένος ενώ βορειότερα είναι αντικυκλωνικός, καθώς παίρνει αρνητικές τιμές.

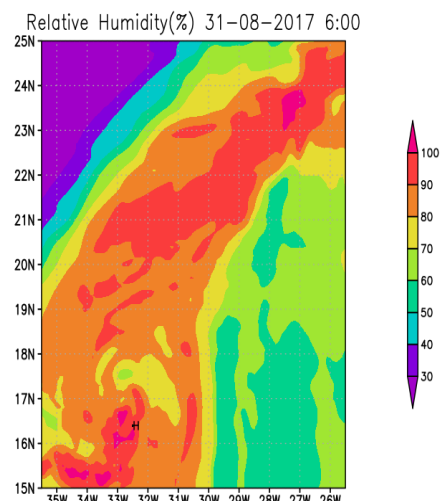


Σχήμα 2.12: Σχετικός στροβιλισμός (s^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στις: α) 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα β) 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα.

Η αστάθεια της ατμόσφαιρας αναμένεται να είναι μεγάλη αφού η θερμοκρασία της θάλασσας παρέμενε στα ίδια επίπεδα, δηλαδή γύρω στους 28 - 29 °C (Σχήμα 2.13). Οι συνθήκες εξακολουθούσαν να είναι κορεσμένες ενισχύοντας τον κυκλώνα μέχρι αυτός να φτάσει στην κατηγορία 5. Η σχετική υγρασία έχει πάρει και αυτή με την σειρά της μια πιο οργανωμένη μορφή, με τις υψηλότερες τιμές να συγκεντρώνονται πλέον σε μια σχεδόν επιμήκη περιοχή και γύρω από αυτήν να κατανέμονται οι χαμηλές τιμές της (Σχήμα 2.14).



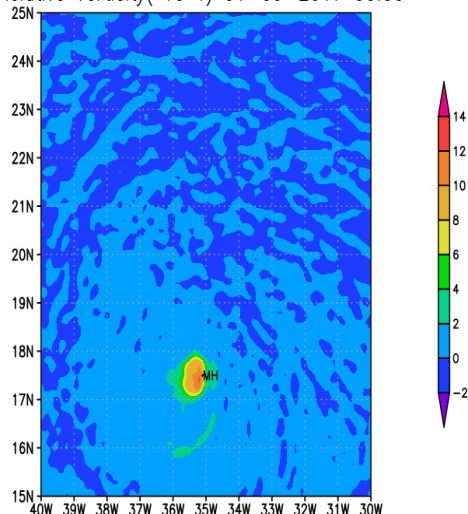
Σχήμα 2.13: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (°C) στις 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα.



Σχήμα 2.14: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στις 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα.

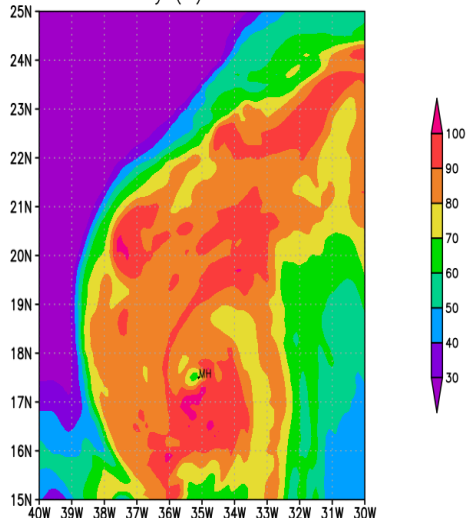
Στη 1 Σεπτεμβρίου, και ώρα 00Z έχοντας πλέον πάρει την μορφή κυκλώνα, ο άνεμος ενισχύθηκε ακόμα περισσότερο και πλέον μιλάμε για έναν ισχυρό κυκλώνα με έντονο στροβιλισμό όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 2.15, επιφανειακούς ανέμους έντασης 100 κόμβων και ελάχιστη πίεση 967 hPa. Αναγράφεται το σημείο που μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα (MH: Major Hurricane). Βλέπουμε ότι ο στροβιλισμός στο σημείο του κυκλώνα είναι πολύ ισχυρός με τιμές από 10^{-3} έως $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Το σύστημα συνεχίζει να κινείται δυτικά ακολουθώντας μια διαδρομή που καθορίζεται από τις επικρατούσα συνοπτική κυκλοφορία. Η σχετική υγρασία (Σχήμα 2.16) στο μάτι έχει μειωθεί και έχει φτάσει στο 60-70% εν αντιθέσει με την γύρω περιοχή που η υγρασία παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 80% με 90%. Γενικότερα όμως ακολουθεί την ίδια κατανομή που είχε και την προηγούμενη μέρα, με τις υψηλότερες τιμές να έχουν διαταχθεί σε μια επιμήκη περιοχή που τείνει να αποκτήσει μια κυκλική κατανομή και γύρω από αυτή την περιοχή επικρατεί χαμηλότερη υγρασία.

Relative Vorticity(*10⁴) 01-09-2017 00:00



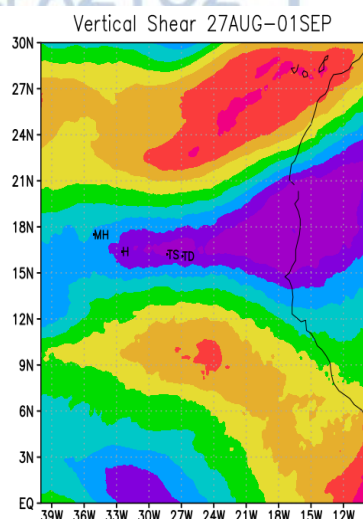
Σχήμα 2.15: Σχετικός στροβιλισμός (S^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irga μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα.

Relative Humidity (%) 01-09-2017 00:00

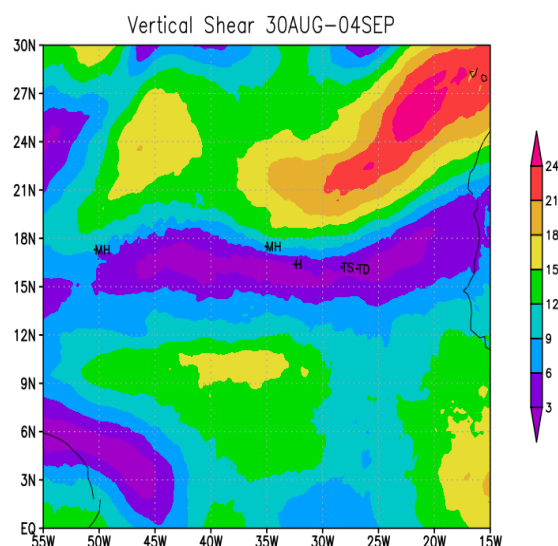


Σχήμα 2.16: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irga μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα.

Έγινε αναφορά σε προηγούμενο στάδιο ότι η διάτμηση μελετάται κυρίως μεσοποιημένη ανά 5 μέρες. Επομένως θα δούμε τη μέση διάτμηση από την στιγμή που εμφανίστηκε το αφρικανικό ανατολικό κύμα στη Δυτική ακτή της Βόρειας Αφρικής (27 Αυγούστου) μέχρι τη 1 Σεπτεμβρίου (Σχήμα 2.17) και τη μέση διάτμηση από τις 30 Αυγούστου μέχρι τις 4 Σεπτεμβρίου (Σχήμα 2.18). Ο υπολογισμός της μέσης διάτμησης ξεκίνησε με τον υπολογισμό του μέσου ανέμου (u, v συνιστώσες) στα επιμέρους επίπεδα (200hPa και 850hPa) και στη συνέχεια της κατακόρυφης διάτμησης. Παρατηρείται ότι η διάτμηση τόσο τις αρχικές μέρες όσο και λίγο αργότερα παίρνει σχετικά μικρές τιμές 3-6 m/s. Η χαμηλή διάτμηση είναι προϋπόθεση για τη γένεση και την ανάπτυξη ενός τροπικού κυκλώνα, όπως έχει τονιστεί στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, σε αντίθεση με τα βαρομετρικά χαμηλά των μέσων γεωγραφικών πλατών.



Σχήμα 2.17: Μέση κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου (m/s) (27 Αυγούστου, 00Z-1 Σεπτεμβρίου, 00Z).

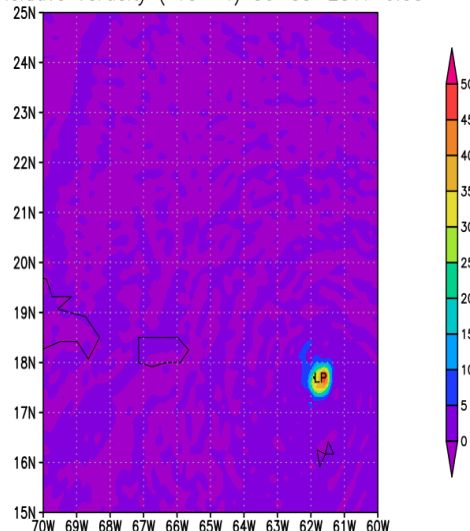


Σχήμα 2.18: Μέση κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου (m/s) (30 Αυγούστου, 00Z-4 Σεπτεμβρίου, 00Z).

Στη συνέχεια η Irma παρέμεινε ισχυρός κυκλώνας για το μεγαλύτερο διάστημα μέχρι τις 6 Σεπτεμβρίου οπότε και σημειώθηκε η μικρότερη τιμή πίεσης (914 hPa). Πλέον η περιοχή χαρακτηρίζεται από πολύ έντονο στροβιλισμό χαμηλού επιπέδου (950hPa) με τιμές που αγγίζουν τα $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Σχήμα 2.19). Επειδή στο μάτι του πραγματικού κυκλώνα η πίεση είναι χαμηλότερη από το ισοβαρικό επίπεδο που μελετάμε θα ελέγξουμε την ελάχιστη πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας στο πλέγμα μελέτης (δεδομένα ECMWF) για να δούμε αν έχει φτάσει κάτω από την πίεση της ισοβαρικής επιφάνειας των 950hPa. Έτσι θα δούμε αν αξίζει η μελέτη στο ισοβαρικό επίπεδο των 900hPa. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι η ελάχιστη πίεση είναι περίπου 950 hPa σε αυτό το πλέγμα επομένως δεν χρειάζεται η μελέτη σε άλλη ισοβαρική επιφάνεια γιατί οι διαφορές θα είναι ελάχιστες. Αυτή η διαφορά της ελάχιστης πίεσης του πραγματικού συστήματος με την τιμή στις πλεγματικές αναλύσεις του ECMWF οφείλεται στη χωρική διακριτοποίηση των αναλύσεων και στα σφάλματα του μοντέλου που εισέρχονται στις αναλύσεις. Παρόμοια σφάλματα εντοπίστηκαν και από τον Πλατανιώτη (2021) στις αναδρομικές αναλύσεις (re-analyses) ERA5 στη μελέτη του κυκλώνα Dorian του 2019 στον Βόρειο Ατλαντικό. Στο Σχήμα 2.19 σημειώνεται με LP (Low pressure) η περιοχή που αναπτυσσόταν αυτό το σύστημα με την πολύ χαμηλή πίεση. Στο Σχήμα 2.19 διακρίνεται επίσης στο δυτικό τμήμα ένα μέρος της Δομινικανής Δημοκρατίας και το Πουέρτο Ρίκο, δυο νησιά τα οποία δεν είχαν άμεσες συνέπειες από το πέρασμα του κυκλώνα καθώς αυτός κινήθηκε βορειότερα, όμως επηρεάστηκαν από

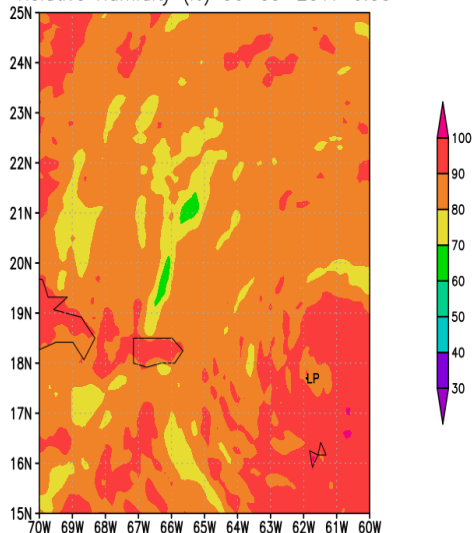
ισχυρούς ανέμους. Πλέον μόνο η γύρω περιοχή χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή σχετική υγρασία (Σχήμα 2.20) και η θερμοκρασία των επιφανειακών υδάτων είναι αρκετά υψηλή αγγίζοντας τους 30°C (Σχήμα 2.21), μεγαλύτερη σε σχέση με την θερμοκρασία που επικρατούσε όταν ο κυκλώνας δημιουργήθηκε.

Relative Vorticity ($\times 10^{-4}$) 06-09-2017 6:00



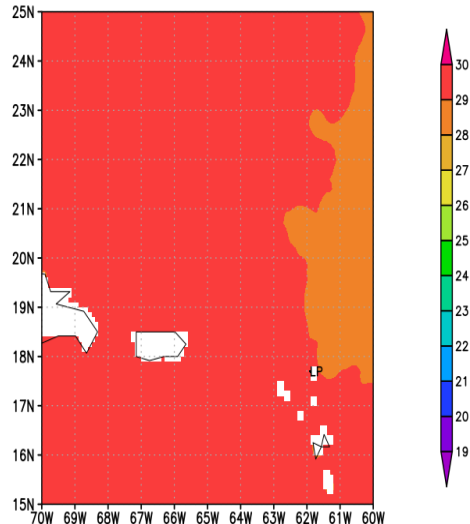
Σχήμα 2.19: Σχετικός στροβιλισμός (S^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma εμφάνισε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης.

Relative Humidity (%) 06-09-2017 6:00



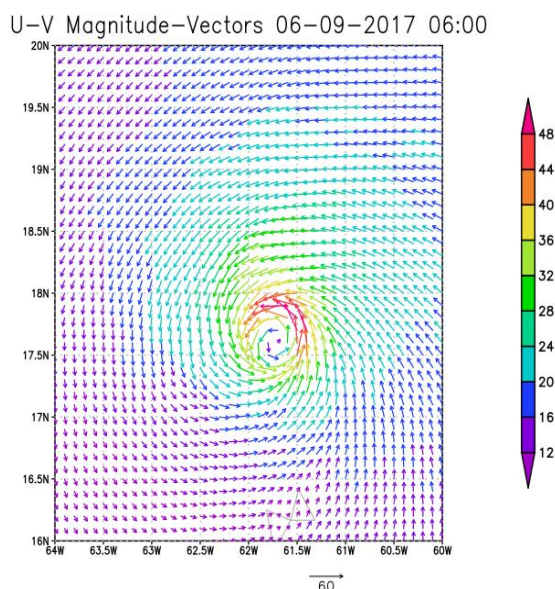
Σχήμα 2.20: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma εμφάνισε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης.

SST 06-09-2017 6:00



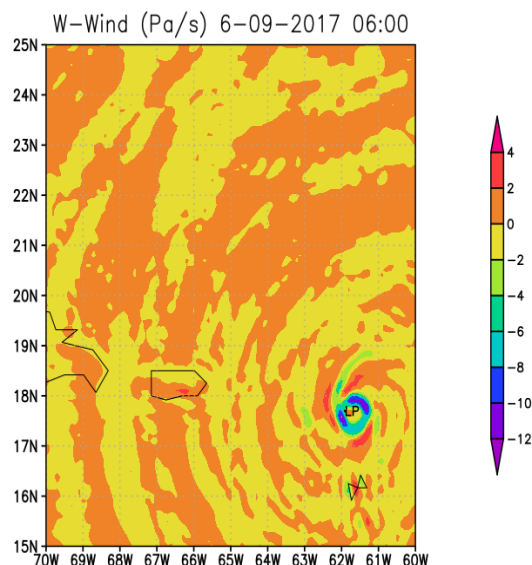
Σχήμα 2.21: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (°C) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma εμφάνισε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης.

Μελετώντας τον άνεμο στο ύψος των 10 μέτρων, βλέπουμε ότι στις πλεγματικές αναλύσεις παίρνει μεγάλες τιμές που προσεγγίζουν τα 48 m/s, ενώ στην πραγματικότητα εκτιμήθηκε στους 155 κόμβους (79.7 m/s). Από την άλλη φαίνεται ξεκάθαρα η κυκλωνική κυκλοφορία κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (Σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.22: Μέτρο και διεύθυνση του ανέμου (m/s) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma εμφάνισε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης στο ύψος των 10 μέτρων.

Η κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 2.23) αποτυπώνει ακριβώς την κίνηση που παρατηρείται στα επιμέρους τμήματα του κυκλώνα. Πιο συγκεκριμένα στο μάτι έχουμε καθοδικές κινήσεις με ταχύτητα από 0-2 Pa/s ενώ στις γύρω περιοχές δηλαδή στο τοίχωμα του ματιού και στις ζώνες βροχόπτωσης έχουμε ανοδικές κινήσεις με ταχύτητες περίπου -10 Pa/s, οι οποίες σχετίζονται με νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης που δίνουν ισχυρό υετό και έντονα καιρικά φαινόμενα.



Σχήμα 2.23: Κατακόρυφη συνιστώσα του ανέμου στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma εμφάνισε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης (Pa/s).

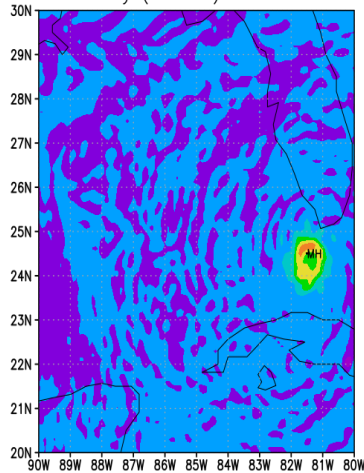
Το σύστημα συνέχισε να κινείται δυτικά χτύπησε αρκετά μικρά νησιά και στο τέλος έφτασε στις ανατολικές ακτές της Βόρειας Αμερικής. Όταν ένας κυκλώνας βρεθεί πάνω από την ξηρά τότε μετά από λίγες ώρες διαλύεται. Επομένως έχει ενδιαφέρον η μελέτη της άφιξης του κυκλώνα στην Αμερική έτσι ώστε να μπορέσουμε να δούμε την πορεία που ακολούθησε η Irma στην ξηρά. Αντιθέτως, η άφιξη της στα μικρά νησιά δεν επηρεάζει την πορεία της καθώς η έκταση της ξηράς είναι περιορισμένη και στη συνέχεια ο κυκλώνας ξανά καταλήγει στη θάλασσα, οπότε δεν προλαβαίνει να επηρεαστεί και να εξασθενήσει.

2.7 Εμφάνιση του κυκλώνα Irma πάνω από τις Η.Π.Α.

Πριν η Irma χτυπήσει την Αμερική στις 10 Σεπτεμβρίου, 12Z παρέμενε ένας ισχυρός κυκλώνας με πολύ ισχυρούς ανέμους και πολύ οργανωμένη δομή. Στο Σχήμα 2.24 βλέπουμε τον κυκλώνα λίγη ώρα πριν χτυπήσει την Αμερική. Παραμένει ένα ισχυρό σύστημα με πολύ μεγάλο στροβιλισμό στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Συγκεκριμένα ο σχετικός στροβιλισμός σε πολλά σημεία έφτασε και $2.5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ πολύ μικρότερος σε σχέση με τις 6 Σεπτεμβρίου που είχαμε την ελάχιστη πίεση, αλλά παρόλα αυτά είναι αρκετά ισχυρός. Είναι αξιοσημείωτο ότι ο σχετικός στροβιλισμός παίρνει μικρότερες

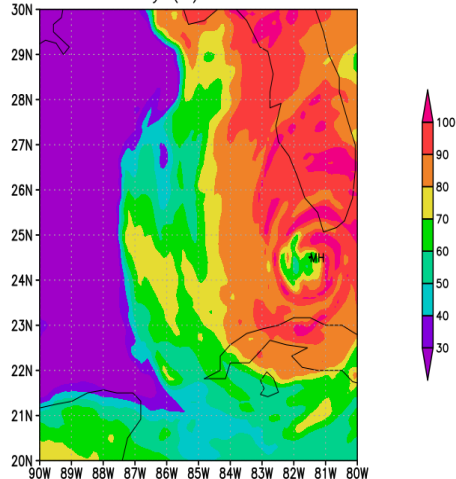
τιμές στο κέντρο του κυκλώνα δηλαδή στο μάτι και μεγαλύτερες τιμές στο εξωτερικό τμήμα δηλαδή στο τοίχωμα του ματιού και στις ζώνες βροχόπτωσης. Η σχετική υγρασία στο επίπεδο των 600 hPa (Σχήμα 2.25) την ίδια στιγμή έχει περίπου τη κατανομή που έχει ο στροβιλισμός, δηλαδή σχεδόν κυκλική με το μάτι να παίρνει μικρότερες τιμές σε σχέση με την γύρω περιοχή. Επιπλέον παρατηρείται ότι στο ηπειρωτικό τμήμα οι τιμές της είναι αρκετά υψηλές, πάνω από 80%. Διακρίνεται βορειότερα και η Αμερική στην οποία τελικά θα καταλήξει η Irma προκαλώντας μεγάλες ζημιές και πολλούς θανάτους.

Relative Vorticity ($\times 10^{-4}$) 10-09-2017 12:00



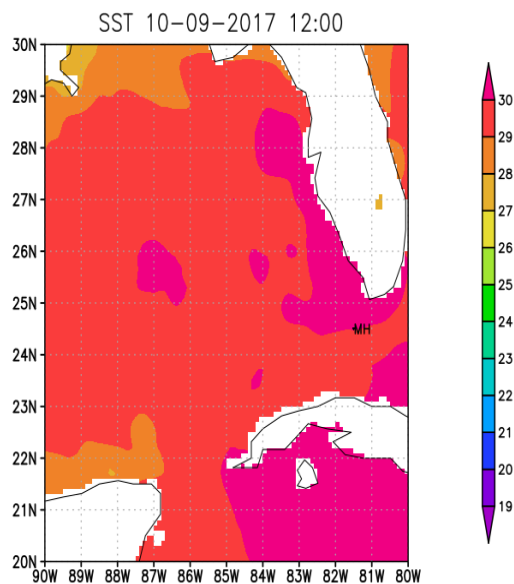
Σχήμα 2.24: Σχετικός στροβιλισμός (S^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στις 10 Σεπτεμβρίου, 12Z.

Relative Humidity (%) 10-09-2017 12:00



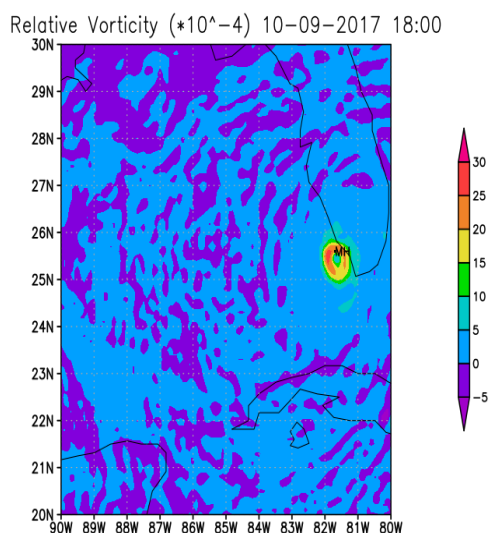
Σχήμα 2.25: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στις 10 Σεπτεμβρίου, 12Z

Οι θερμοκρασίες της θάλασσας είναι αρκετά υψηλές (Σχήμα 2.26), ειδικά αν τις συγκρίνουμε με τις αρχικές θερμοκρασίες της περιοχής που σχηματίστηκε η τροπική ύφεση. Στο τμήμα γύρω από την ξηρά οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες και αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι τα νερά είναι πιο ρηχά σε αυτές τις περιοχές.

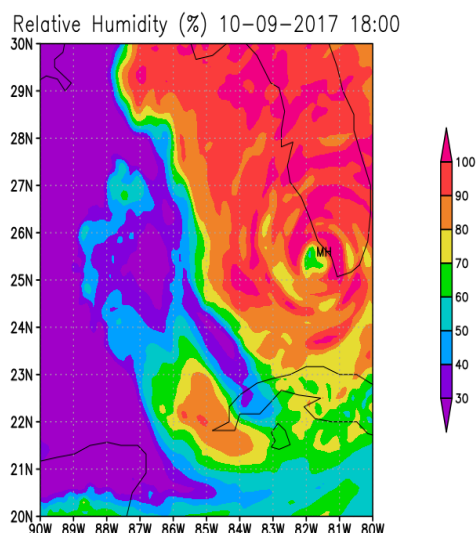


Σχήμα 2.26: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας ($^{\circ}\text{C}$) στις 10 Σεπτεμβρίου, 12Z.

Έξι ώρες μετά την ίδια μέρα δηλαδή στις 10 Σεπτεμβρίου 18Z, ο κυκλώνας έχει πλησιάσει και άλλο την Αμερική (Σχήμα 2.27 και Σχήμα 2.28) όμως η κατανομή της υγρασίας και του στροβιλισμού παραμένει σχεδόν ίδια καθώς το κεντρικό τμήμα καταλαμβάνεται από χαμηλότερες τιμές και το περιφερειακό τμήμα από μεγαλύτερες τόσο στην υγρασία όσο και στον σχετικό στροβιλισμό.

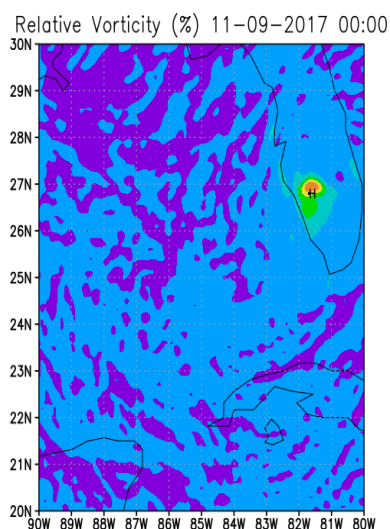


Σχήμα 2.27: Σχετικός στροβιλισμός (s^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στις 10 Σεπτεμβρίου, 18Z.

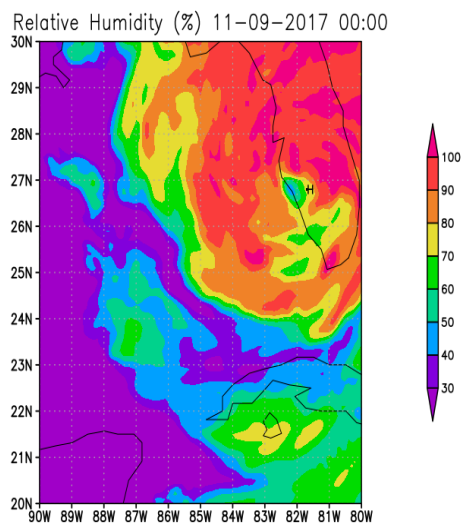


Σχήμα 2.28: Η σχετική υγρασία στο επίπεδο των 600 hPa στις 10 Σεπτεμβρίου, 18Z.

Στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z η Irma έχει φτάσει πλέον στις Ηνωμένες Πολιτείες. Όπως είναι λογικό, εφόσον δεν βρίσκεται πλέον πάνω από την θάλασσα δεν υπάρχουν ισχυρές επιφανειακές ροές αισθητής και κυρίως λανθάνουσας θερμότητας για να τροφοδοτήσουν το σύστημα. Οπότε σιγά σιγά θα αρχίσει να διαλύεται και όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.29 ο στροβιλισμός έχει αρχίσει να μειώνεται, με την υψηλότερη τιμή να μην ξεπερνά τα $2.0 - 2.5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ σε αντίθεση με λίγες ώρες πριν που ο στροβιλισμός ήταν μεγαλύτερος από $3 \cdot 10^{-3} s^{-1}$. Πλέον έπεσε η ισχύς του και τώρα αντιστοιχεί σε κυκλώνα (hurricane). Ας δούμε όμως αναλυτικά την σχετική υγρασία (Σχήμα 2.30) και την αξονική ασυμμετρία που παρατηρείται. Στο σημείο που δρα ο κυκλώνας παίρνει σχετικά μικρές τιμές (από 60%-80%), ενώ βορειότερα οι τιμές είναι μεγαλύτερες και σε ορισμένα σημεία αγγίζει το 100% εν αντιθέσει με την περιοχή νοτιότερα όπου οι τιμές είναι εξαιρετικά χαμηλές (~30-50%).



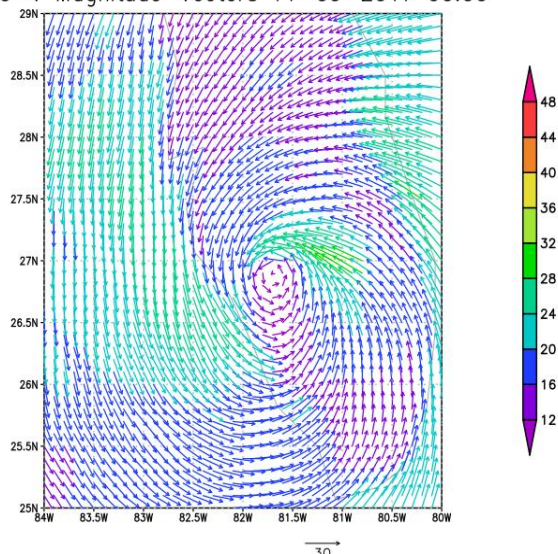
Σχήμα 2.29: Σχετικός στροβιλισμός (s^{-1}) στο επίπεδο των 950hPa στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma είχε φτάσει πλέον στην Αμερική.



Σχήμα 2.30: Η σχετική υγρασία (%) στο επίπεδο των 600 hPa στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma είχε φτάσει πλέον στην Αμερική.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς ο κυκλώνας χτυπάει την Αμερική είναι αρκετά εξασθενημένος σε σχέση με όταν βρισκόταν πάνω από την θάλασσα και είχε την χαμηλότερη του πίεση. Η ταχύτητα των ανέμων (Σχήμα 2.31) μειώθηκε πιθανόν λόγω της τριβής του ανέμου με την ξηρά, και της βαθμιαίας αποδυνάμωσης του τροπικού κυκλώνα. Η ταχύτητα παίρνει ακραίες τιμές από 24-28 m/s στην περιοχή γύρω από μάτι ενώ σε πιο μακρινά σημεία η ταχύτητα δεν ξεπερνά τα 20 m/s.

U-V Magnitude-Vectors 11-09-2017 00:00

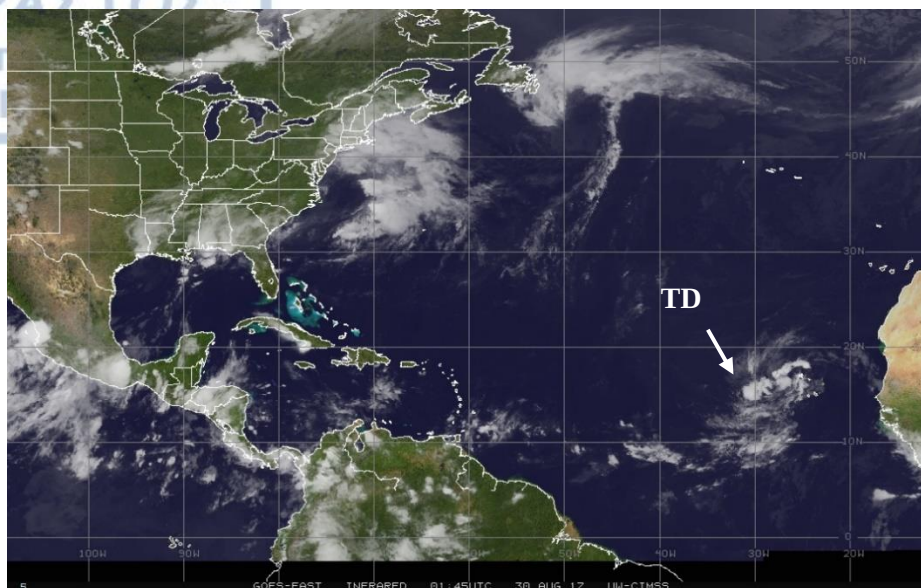


Σχήμα 2.31: Μέτρο και διεύθυνση του ανέμου (m/s) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z στο ύψος των 10 μέτρων.

2.8 Δορυφορική Ανάλυση του τροπικού κυκλώνα Irma

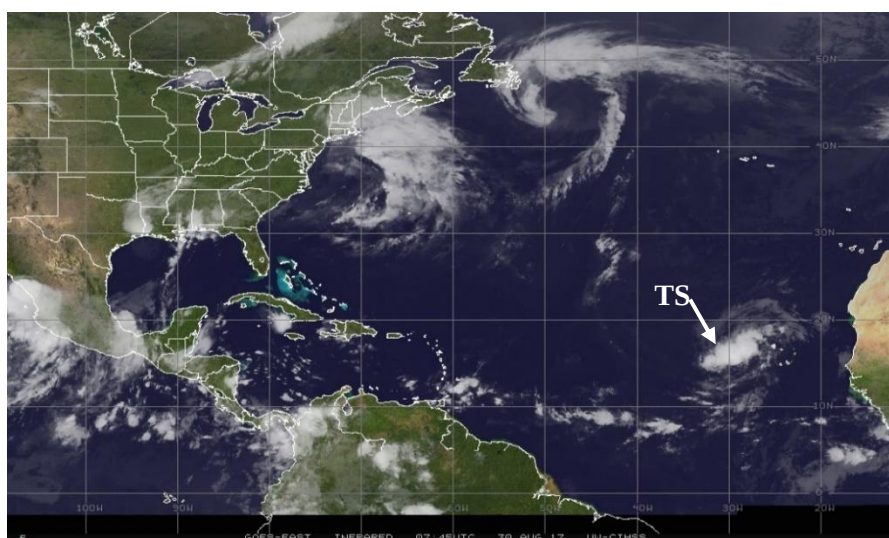
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια ανασκόπηση στις εικόνες που έχει ο τροπικός κυκλώνας από τον δορυφόρο GOES -EAST. Θα δούμε αναλυτικά την εικόνα του στα διάφορα στάδια εξέλιξής του μέχρι τελικά να πάρει την πιο οργανωμένη του μορφή και εν συνεχεία να διαλυθεί.

Ξεκινώντας από την πρώτη μέρα (00Z, 30 Αυγούστου 2017) που ο κυκλώνας έγινε τροπική ύφεση διακρίνεται μια μικρή διαταραχή στις 30° W και 10-20° N. Η εικόνα έχει ληφθεί από τον GOES -EAST στις 00Z, 30 Αυγούστου 2017 (Σχήμα 2.32).



Σχήμα 2.32: Υπέρυθρη (infrared) δορυφορική εικόνα του GOES-EAST στις 30 Αυγούστου 2017, 00Z (University of Wisconsin – CIMSS). TD = Τροπική Ύφεση

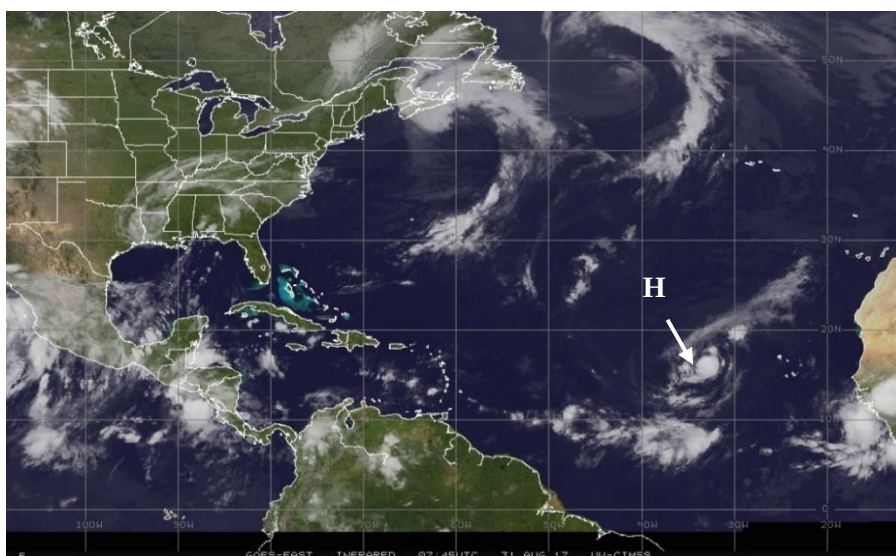
Η εικόνα του 6 ώρες μετά που μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα είναι αυτή που φαίνεται στην Σχήμα 2.33, όπου διακρίνεται αυτή η διαταραχή λίγο πιο ισχυρή και βορειοδυτικότερα από την εικόνα που είχε 6 ώρες πριν. Σε αυτό το στάδιο δεν διακρίνεται ακόμα το μάτι και το τοίχωμά του.



Σχήμα 2.33: Υπέρυθρη (infrared) δορυφορική εικόνα του GOES-EAST στις 30 Αυγούστου 2017, 06Z (University of Wisconsin – CIMSS). TS= Τροπική καταιγίδα

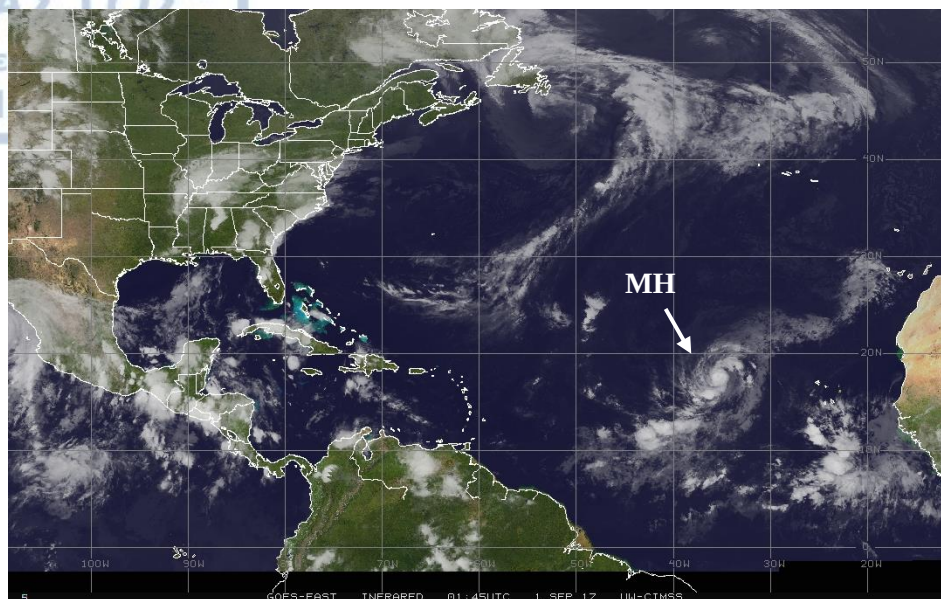
Όπως έχει αναφερθεί ήδη, μια μέρα μετά δηλαδή στις 31 Αυγούστου 06Z η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα. Στο Σχήμα 2.34 φαίνεται η μορφή του κινούμενου

συστήματος που ακόμα δεν έχει οργανωθεί πλήρως αλλά έχει μια πιο ολοκληρωμένη δομή από αυτήν που είχε την προηγούμενη μέρα. Αυτό δεν είναι φανερό μόνο από την δορυφορική εικόνα αλλά και από την μελέτη που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη δομή του άρχισε να διακρίνεται σιγά σιγά ο κυκλωνικός σχετικός στροβιλισμός του, χωρίς όμως να μπορεί να διακριθεί το κέντρο του. Από την στιγμή όμως που μετατράπηκε σε κυκλώνα και γνωρίζοντας την πορεία που ακολούθησε, αναμένεται τις επόμενες ημέρες να αρχίσουν να διακρίνονται τα επιμέρους χαρακτηριστικά του.



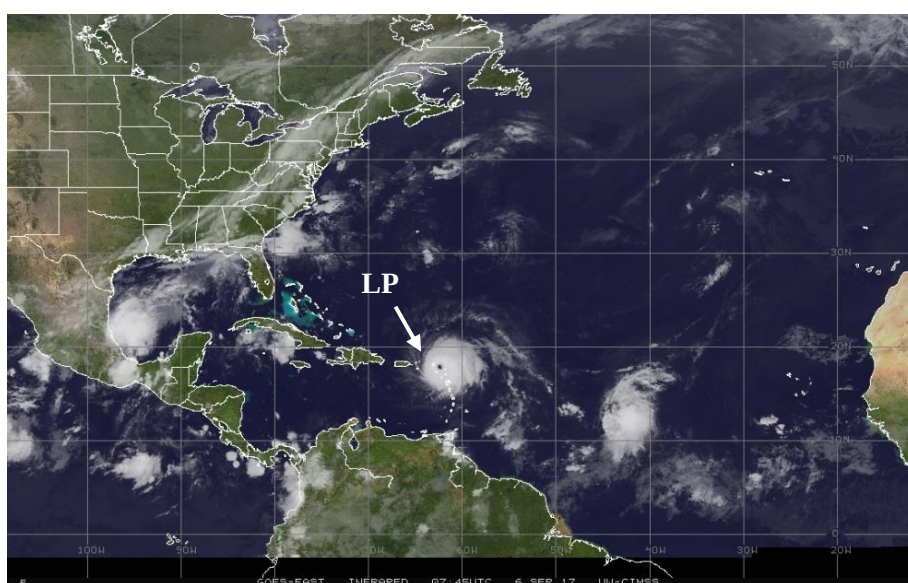
Σχήμα 2.34: Υπέρυθρη (infrared) δορυφορική εικόνα του GOES-EAST στις 31 Αυγούστου 2017, 06Z (University of Wisconsin – CIMSS). H= Κυκλώνας

Την 1η Σεπτεμβρίου μιλάμε πλέον για έναν ισχυρό κυκλώνα, ο οποίος βέβαια δεν έχει μια τόσο ξεκάθαρη δομή. Το Σχήμα 2.35 θυμίζει το Σχήμα 2.34, βέβαια έχει αρχίσει να διακρίνεται το μάτι, όμως ακόμα τα πράγματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα. Το σύστημα κινείται βορειοδυτικά και όσο πλησιάζει την Αμερική τόσο καλύτερα θα φαίνεται από τον δορυφόρο καθώς ωριμάζει όλο και περισσότερο.



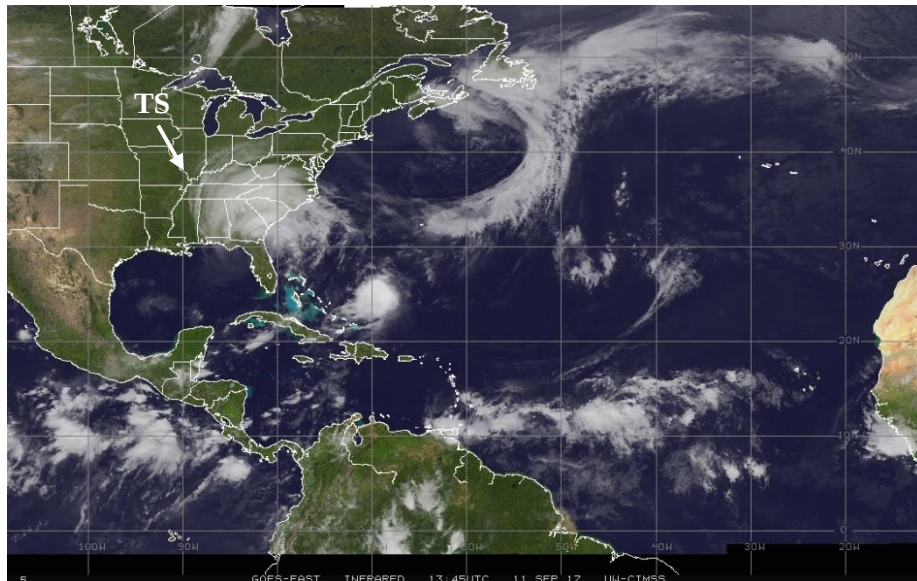
Σχήμα 2.35: Υπέρυθρη (infrared) δορυφορική εικόνα του GOES-EAST στη 1 Σεπτεμβρίου 2017, 00Z (University of Wisconsin – CIMSS). MH: Ισχυρός κυκλώνας

Ο κυκλώνας καθώς κινούταν όλο και δυτικότερα, ενισχύθηκε μέχρι τις 6 Σεπτεμβρίου, οπότε και τελικά πήρε την ελάχιστη πίεση. Το Σχήμα 2.36 αντιπροσωπεύει πλήρως την δομή ενός ώριμου κυκλώνα που φαίνονται όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά του, το μάτι, οι σπειροειδείς ζώνες νεφών, και ο κυκλωνικός στροβιλισμός. Πιο συγκεκριμένα στο μάτι λόγω του ότι επικρατούν έντονες καθοδικές κινήσεις τα νέφη διαλύονται. Επιπλέον η διάμετρος του έχει αυξηθεί κατά πολύ και τα σύννεφα είναι ομοιόμορφα διατεταγμένα γύρω από το μάτι.



Σχήμα 2.36: Υπέρυθρη (infrared) δορυφορική εικόνα του GOES-EAST στις 6 Σεπτεμβρίου 2017, 06Z (University of Wisconsin – CIMSS). LP: Ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης

Στις 11 Σεπτεμβρίου φαίνεται ότι ο κυκλώνας έχει αποδομηθεί καθώς έχει φτάσει πάνω από τις νοτιοανατολικές ΗΠΑ και δεν υπάρχουν τα τυπικά χαρακτηριστικά του (μάτι, ζώνες νεφών) (Σχήμα 2.37). Παρόλα αυτά είναι ακόμα αρκετά ισχυρός και η ταχύτητα του ανέμου του αρκετά μεγάλη προκαλώντας σημαντικές καταστροφές. Από την άλλη, αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η δομή του ως τροπική καταιγίδα στα τελικά στάδια (Σχήμα 2.37) είναι πολύ διαφορετική από αυτήν όταν είναι τροπική καταιγίδα στο αρχικό στάδιο σχηματισμού (Σχήμα 2.33).



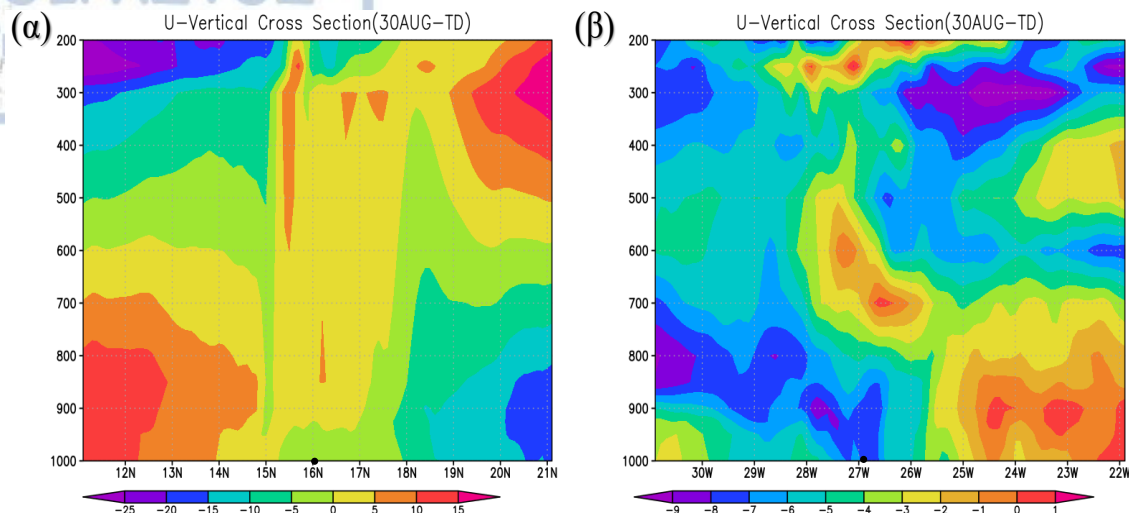
Σχήμα 2.37: Υπέρυθρη (infrared) δορυφορική εικόνα του GOES-EAST στις 11 Σεπτεμβρίου 2017, 12Z (University of Wisconsin – CIMSS). TS = Τροπική καταιγίδα

Κεφάλαιο 3. Δομή του τροπικού κυκλώνα Irma

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί αναλυτικά ο κυκλώνας κάνοντας μια ανασκόπηση στην δομή του. Ουσιαστικά θα μπορούμε μέσα στον κυκλώνα μελετώντας τη θερμοκρασία και δυναμική θερμοκρασία, την υγρασία, τον σχετικό στροβιλισμό, την κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου και τις 2 οριζόντιες συνιστώσες του u , v με την πρώτη (δεύτερη) να δηλώνει κίνηση στη διεύθυνση Ανατολής- Δύσης (Βορρά- Νότου). Στα σχήματα θα απεικονίζεται η κατανομή των μεταβλητών στα διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας και σε ένα εύρος γεωγραφικών πλατών ή γεωγραφικών μηκών, ανάλογα με το είδος της τομής (μεσημβρινή ή ζωνική, αντίστοιχα). Επίσης, σημειώνεται το κέντρο του συστήματος (ελάχιστη πίεση) με βάση το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων των Η.Π.Α.

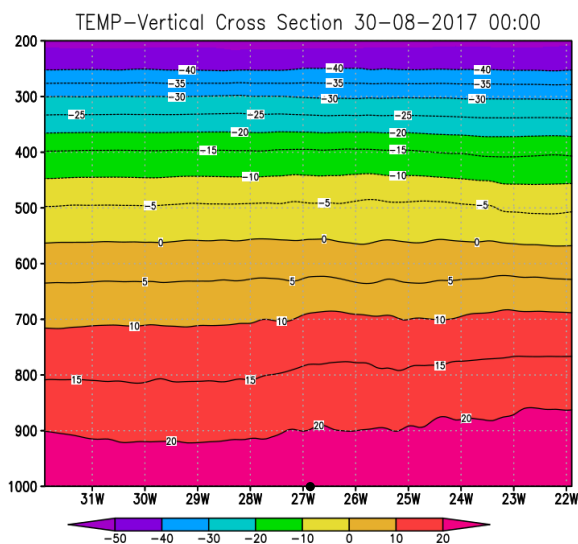
3.1 Δομή τροπικής ύφεσης

Στις 30 Αυγούστου 00Z το τροπικό κύμα μετατράπηκε σε τροπική διαταραχή σηματοδοτώντας την έναρξη της κυκλογένεσης. Στα Σχήματα 3.1α και 3.1β φαίνονται οι τομές της u συνιστώσας. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 3.1α) σε τομή Βορρά-Νότου της u συνιστώσας φαίνεται η περιστροφική κίνηση του ανέμου καθώς η τομή είναι κάθετη στη διεύθυνση αυτής της συνιστώσας. Εν αντιθέσει στην δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 3.1β) αναφερόμαστε πλέον στην σύγκλιση και την απόκλιση του ανέμου καθώς η τομή είναι παράλληλη με την κίνηση αυτής της συνιστώσας. Συνεπώς στο Σχήμα 3.1α διακρίνεται ότι στα κατώτερα επίπεδα ο άνεμος κινείται προς την ανατολή με τιμές έως 15 m/s νότια του κέντρου του χαμηλού και προς την αντίθετη κατεύθυνση με ελάχιστα αυξημένες ταχύτητες βόρεια του κέντρου, επομένως η κίνηση είναι κυκλωνική. Από την άλλη στην ανώτερη τροπόσφαιρα (400-300 hPa) η κίνηση είναι αντίθετη, δηλαδή εκεί που είχαμε κίνηση προς την ανατολή έχουμε κίνηση προς την δύση και αντίστροφα (αντικυκλωνική). Ακόμα η δομή φαίνεται να μην είναι συμπαγής, αλλά είναι πιο απλωμένη. Στο Σχήμα 3.1β φαίνεται ότι στα αρχικά στάδια λαμβάνει χώρα απόκλιση κατά μήκος του άξονα Ανατολής -Δύσης στα χαμηλότερα επίπεδα, ενώ στη μέση προς κατώτερη τροπόσφαιρα παρατηρείται σύγκλιση.



Σχήμα 3.1: Κατακόρυφες τομές της υ συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική ύφεση: (α) Τομή Βορρά-Νότου στις 26.9°W, (β) Τομή Ανατολής-Δύσης στις 16.1°N. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

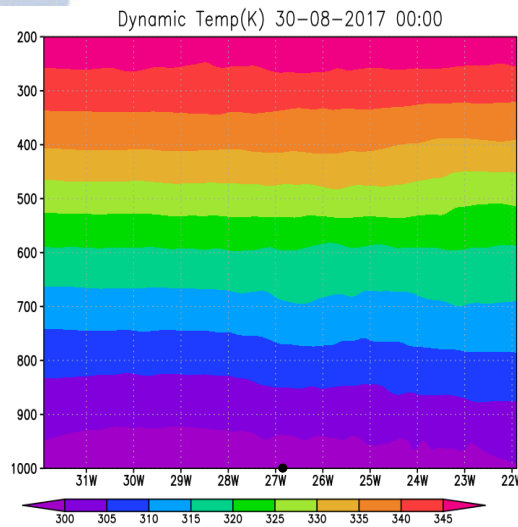
Μελετώντας την κατανομή της θερμοκρασίας στα διάφορα ισοβαρικά επίπεδα της τροπόσφαιρας (Σχήμα 3.2) παρατηρείται ότι στην περιοχή του κέντρου του συστήματος στην κατώτερη τροπόσφαιρα (κάτω από τα 600 hPa) οι ισόθερμες έχουν μια μικρή κλίση προς τα πάνω. Η κλίση αυτή δηλώνει την ύπαρξη θερμότερων αερίων μαζών, δηλαδή αρχίζει να δημιουργείται ο θερμός πυρήνας του συστήματος.



Σχήμα 3.2: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Θερμοκρασίας (°C) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική ύφεση. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

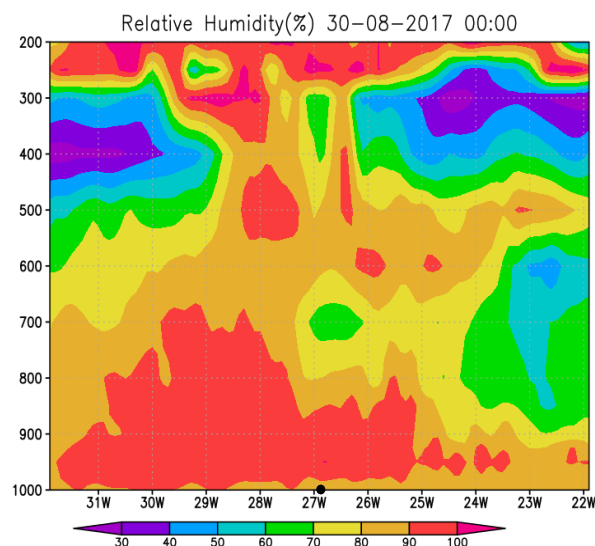
Από την άλλη στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η δυναμική θερμοκρασία σε K όπου στην περιοχή του κέντρου του συστήματος στην κατώτερη τροπόσφαιρα (κάτω από τα 600 hPa) οι ισόθερμες της δυναμικής θερμοκρασίας έχουν μια μικρή κλίση προς τα κάτω

που δηλώνει την ύπαρξη θερμότερων αερίων μαζών, κάτι αντίστοιχο με αυτό που συνέβαινε στην κατανομή της θερμοκρασίας στο Σχήμα 3.2.



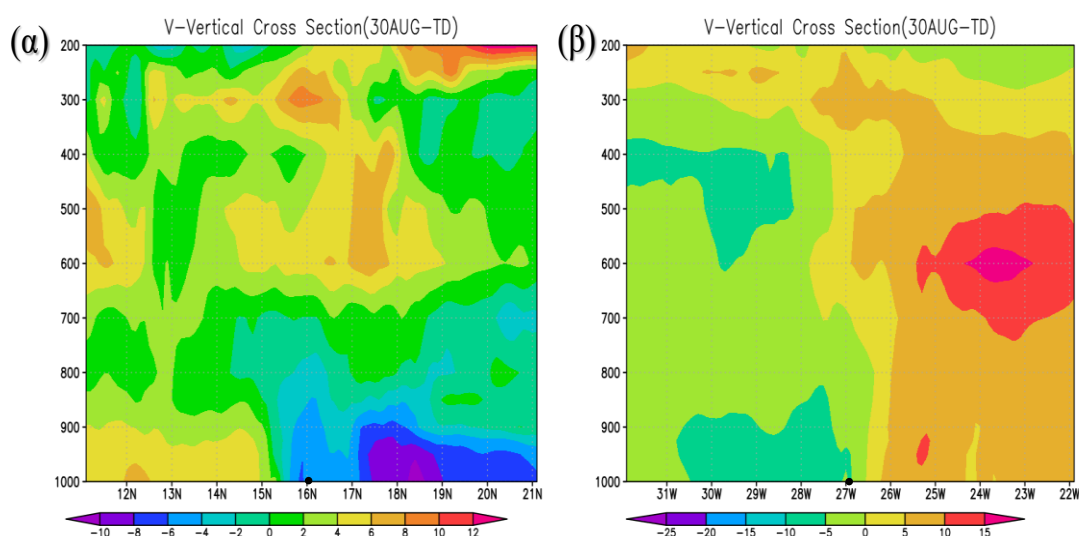
Σχήμα 3.3: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Δυναμικής Θερμοκρασίας (K) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική ύφεση. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Η σχετική υγρασία ακόμα φαίνεται να μην έχει λάβει μια οργανωμένη μορφή, όμως οι υψηλότερες τιμές συναντώνται στα κεντρικά τμήματα και οι χαμηλότερες στην ανώτερη ατμόσφαιρα πλευρικά. Στα μέσα τμήματα (~700 hPa) γύρω στις 27 °W παρατηρείται μια μείωση της υγρασίας (κέντρο του συστήματος) (Σχήμα 3.4).



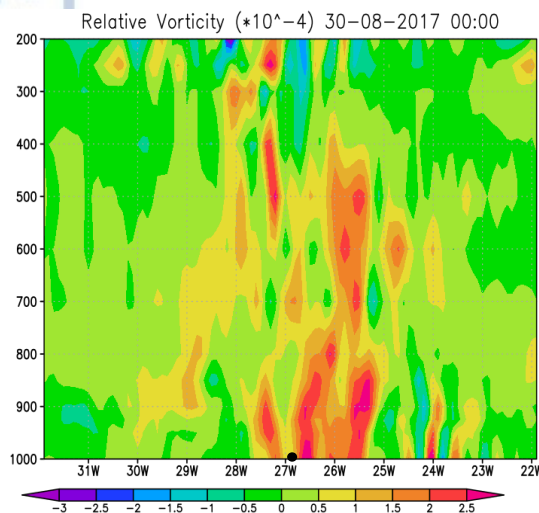
Σχήμα 3.4: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Σχετικής Υγρασίας (%) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική ύφεση. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Από την άλλη στην μελέτη της v συνιστώσας του ανέμου, η τομή Βορρά- Νότου δείχνει τη σύγκλιση και την απόκλιση ενώ η τομή Ανατολής -Δύσης μαρτυρά την περιστροφική κίνηση του ανέμου, το αντίθετο που συνέβαινε στην άλλη συνιστώσα. Παρατηρείται στα χαμηλότερα επίπεδα σύγκλιση του ανέμου στον άξονα Βορρά - Νότου λίγο νοτιότερα από την περιοχή που ορίστηκε σαν κέντρο του από το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων ($\sim 15.7^\circ\text{N}$) (Σχήμα 3.5α). Μετά από έλεγχο των δεδομένων με την προβολή της πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας βρέθηκε ότι το κέντρο του κυκλώνα με βάση τα δεδομένα ανάλυσης του πλέγματος είναι στις 15.7°N και 26.5°W εκεί δηλαδή που παρατηρείται σύγκλιση και όχι εκεί που είχε οριστεί από το Κέντρο Κυκλώνων (16.1°N και 26.9°W). Στο Σχήμα 3.5β από την άλλη φαίνεται η κάθετη κίνηση του ανέμου ως προς τον άξονα, όπου δυτικότερα του κέντρου η κίνηση γίνεται προς τον νότο ενώ ανατολικότερα προς τον βορρά. Άρα διακρίνεται κυκλωνική κυκλοφορία, με κέντρο τις 26.5°W όπως ήδη αναφέρθηκε. Εξακολουθεί να ισχύει αυτό που σχολιάστηκε και πριν ότι η δομή ακόμα δεν είναι συμπαγής.



Σχήμα 3.5: Κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Ιrma μετατράπηκε σε τροπική ύφεση: (α) Τομή Βορρά-Νότου στις 26.9°W , (β) Τομή Ανατολής-Δύσης στις 16.1°N . Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

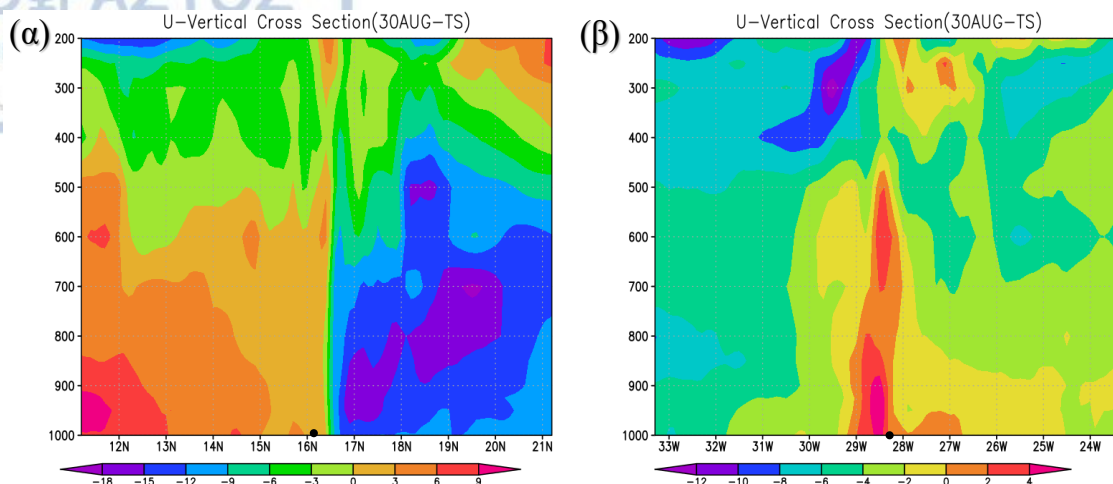
Ο σχετικός στροβιλισμός είναι μια παράμετρος που όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι απαραίτητος για να υφίσταται κυκλογένεση. Στα αρχικά στάδια (Σχήμα 3.6) οι τιμές είναι ακόμα σχετικά μικρές και στο κέντρο του κυκλώνα επικρατούν θετικές τιμές φανερώνοντας κυκλωνική κυκλοφορία.



Σχήμα 3.6: Κατακόρυφη ζωνική τομή του σχετικού στροβιλισμού (S^{-1}) στις 30 Αυγούστου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική ύφεση. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

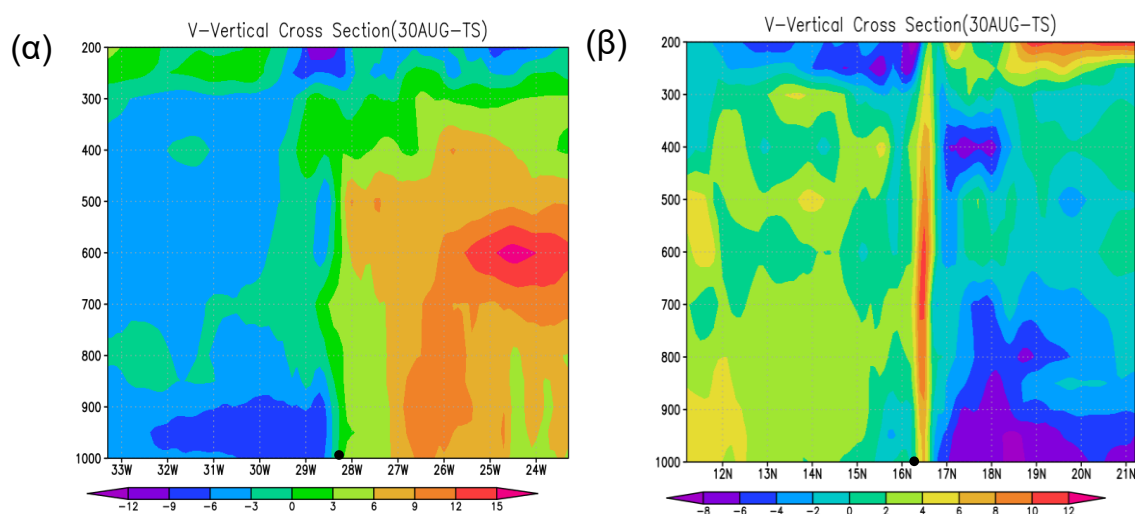
3.2 Δομή Τροπικής Καταιγίδας

Όταν η Irma έγινε τροπική καταιγίδα (tropical storm) και πήρε όνομα, δηλαδή στις 06Z 30 Αυγούστου η δομή της υ συνιστώσας ως προς τους 2 άξονες φαίνεται στα Σχήματα 3.7α και 3.7β. Το Σχήμα 3.7α δείχνει ότι νότια του κέντρου του χαμηλού ο άνεμος κινείται προς την ανατολή με ταχύτητες από 0 μέχρι 9 m/s, ενώ βόρεια του κέντρου οι ταχύτητες κίνησης προς τη δύση είναι σχεδόν διπλάσιες και αγγίζουν τα 18m/s (κυκλωνική κυκλοφορία). Σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων, το κέντρο βρίσκεται στις 16.2°N και 28.3°W. Από την άλλη στο Σχήμα 3.7β φαίνεται ότι στο σημείο που σχηματίστηκε η καταιγίδα στις 28.3°W ο άνεμος κινείται ανατολικά. Ανατολικά του κέντρου υπάρχει σύγκλιση ενώ στο δυτικό τμήμα απόκλιση.



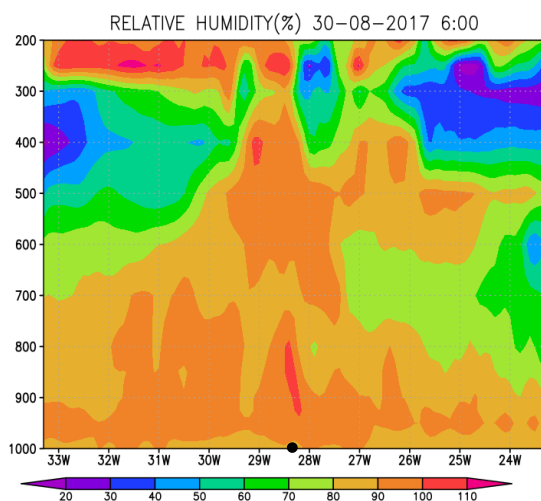
Σχήμα 3.7: Κατακόρυφες τομές της u συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα: (α) Τομή Βορρά-Νότου στις 28.3° W, (β) Τομή Ανατολής -Δύσης στις 16.2° N. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Η v συνιστώσα (Σχήμα 3.8α) φανερώνει με τη σειρά της κυκλωνική κυκλοφορία (ο άνεμος στο ανατολικότερο κομμάτι κινείται βόρεια ενώ δυτικότερα κινείται προς το Νότο). Στην τομή Βορρά -Νότου (Σχήμα 3.8β) υπάρχει σύγκλιση στα κατώτερα επίπεδα ($\sim 16.4^\circ$ N) καθώς το Βόρειο κομμάτι του ανέμου κινείται Νότια και το Νότιο τμήμα Βόρεια προκαλώντας αντίθετη κίνηση εκατέρωθεν ενός άξονα (που είναι και το κέντρο του κυκλώνα). Οι τιμές κίνησης προς τον Βορρά και προς τον Νότο είναι περίπου ίδιες τόσο σε τομή Ανατολής - Δύσης (-12 m/s και 15 m/s) όσο και σε τομή Βορρά - Νότου (-8 m/s και 12 m/s), κυρίως αν τις δούμε συγκριτικά με 6 ώρες πριν που οι διαφορές ήταν πιο μεγάλες.

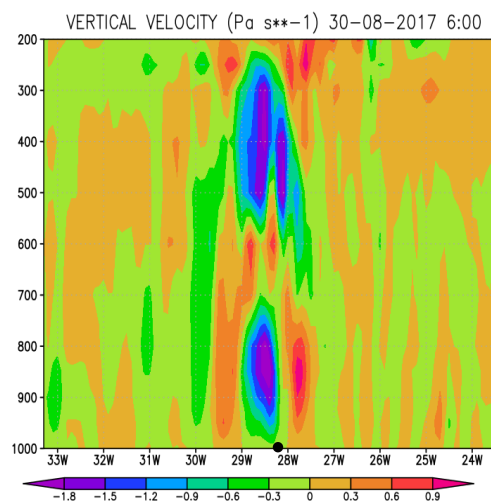


Σχήμα 3.8: Κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις 16.2° N, (β) Τομή Βορρά-Νότου στις 28.3° W. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας συναντώνται γενικά στην κατώτερη και μέση τροπόσφαιρα (Σχήμα 3.9). Επίσης από το σχήμα 3.10 φαίνεται καθοδική κίνηση στο κεντρικό τμήμα του πυρήνα και ανοδικές στη γύρω περιοχή με μικρές ταχύτητες καθώς πρόκειται και για αρχικό στάδιο.



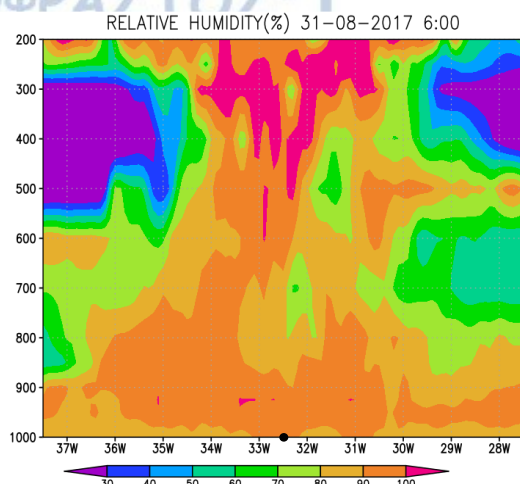
Σχήμα 3.9: Κατακόρυφη ζωνική τομή Σχετικής Υγρασίας (%) στις 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε καταιγίδα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.



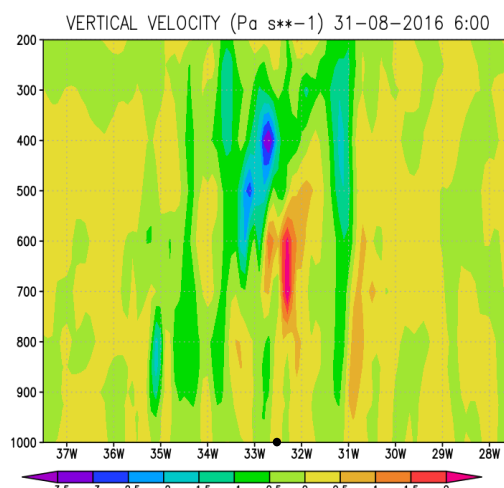
Σχήμα 3.10: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Κατακόρυφης ταχύτητας (Pa/s) στις 30 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε καταιγίδα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

3.3 Δομή Κυκλώνα

Οι αντίστοιχες συνθήκες για μια μέρα μετά φαίνονται στα Σχήματα 3.11 και 3.12 όπου βλέπουμε την υγρασία να παίρνει μεγαλύτερες τιμές στα ανώτερα και κεντρικά τμήματα σε σχέση με την γύρω περιοχή που καταλαμβάνεται από χαμηλότερες υγρασίες. Παρατηρείται καθ' ύψος μια περιοχή στο πυρήνα του κυκλώνα που οι υγρασίες παρουσιάζουν μικρότερες τιμές, βέβαια με μία μικρή κλίση που μπορεί να υποδηλώνει την ύπαρξη διάτμησης του ανέμου στα επίπεδα των 700 με 400 hPa περίπου. Μετά από έλεγχο της διάτμησης για αυτά τα επίπεδα βρέθηκε ότι λαμβάνει τιμές από 8-10 m/s. Από την άλλη οι κινήσεις στο κεντρικό τμήμα παραμένουν καθοδικές, όπως συμβαίνει γενικότερα στο μάτι του κυκλώνα. Στην γύρω περιοχή του τοιχώματος του ματιού (eyewall) υπάρχουν ανοδικές κινήσεις, με ταχύτητες ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με μία ημέρα πριν. Επίσης, εμφανίζεται και τώρα αυτή η μικρή κλίση.

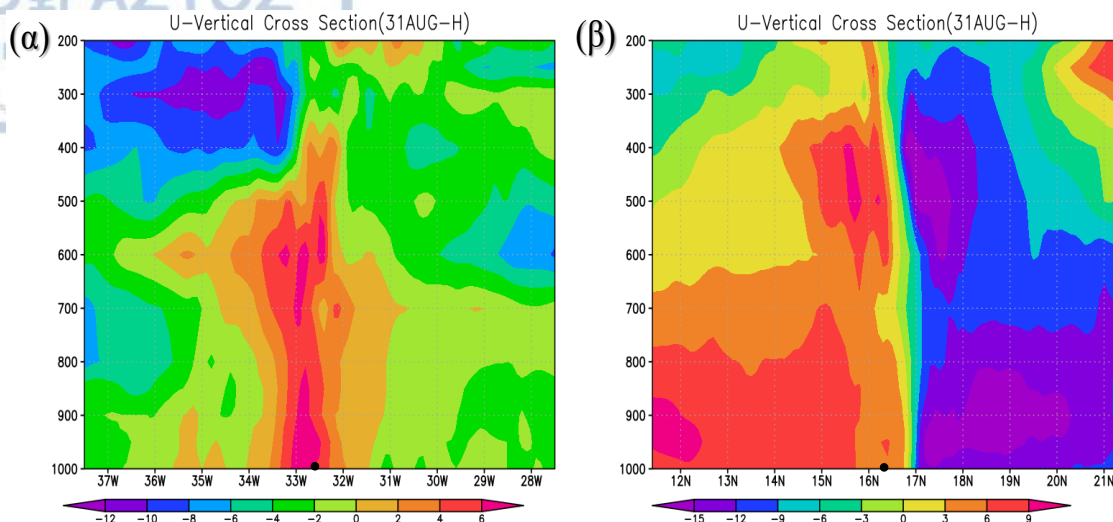


Σχήμα 3.11: Κατακόρυφη ζωνική τομή Σχετικής Υγρασίας (%) στις 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma πήρε την μορφή κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.



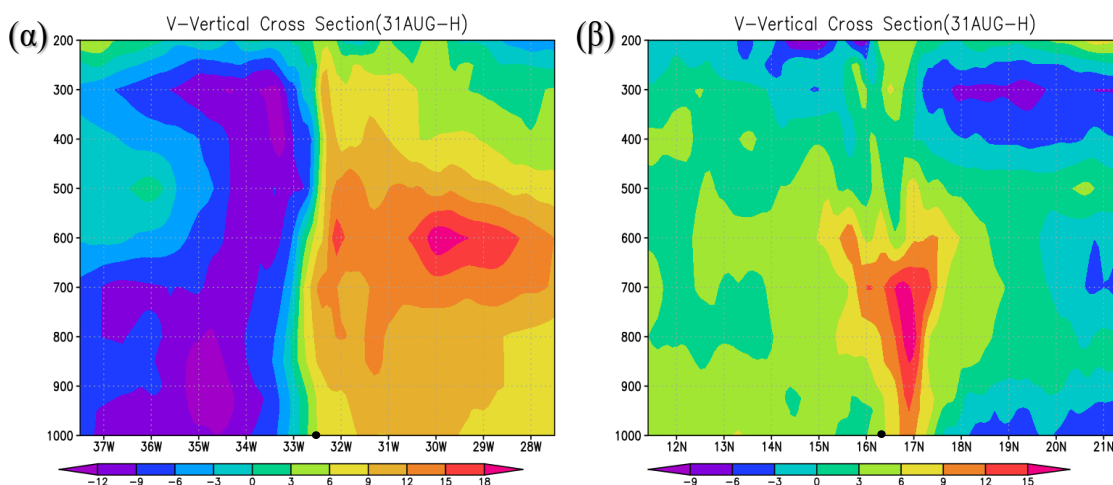
Σχήμα 3.12: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Κατακόρυφης ταχύτητας (Pa/s) στις 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma πήρε την μορφή κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Καθώς εξελισσόταν η κυκλογένεση και η τροπική καταιγίδα αναβαθμίστηκε σε Κυκλώνα, η τομή Ανατολής -Δύσης (Στο Σχήμα 3.13α) δείχνει μια πιο έντονη κίνηση της υ συνιστώσας του ανέμου προς τα δυτικά με ταχύτητες που αγγίζουν τα -12 m/s όμως στα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας. Εκατέρωθεν του κέντρου διακρίνεται σύγκλιση (στις 31.5°W) και απόκλιση (στις 34°W). ενώ στην ανώτερη τροπόσφαιρα (400 hPa) παρατηρείται απόκλιση. Στο Σχήμα 3.13β φαίνεται πλέον μια σχεδόν συμμετρική εικόνα όπου στο δυτικό και στο ανατολικό τμήμα η κατανομή των τιμών μοιάζει να είναι ίδια, δηλαδή οι μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές βρίσκονται σχεδόν αντικριστά (με άξονα συμμετρίας το κέντρο του κυκλώνα που με βάση τα πλεγματικά δεδομένα ανάλυσης είναι 16.7°N, ελάχιστα βορειότερα από τις εκτιμήσεις του Κέντρου Κυκλώνων). Από την άλλη, οι τιμές διαφέρουν παρά τη συμμετρική κατανομή με τις μεγαλύτερες να δείχνουν εντονότερη κίνηση προς τη δύση (15 m/s ενώ η κίνηση προς την ανατολή γίνεται με ταχύτητες μικρότερες από 9 m/s) κατά μήκος αυτού του άξονα. Οι μεγαλύτερες τιμές συναντώνται στη μέση τροπόσφαιρα.



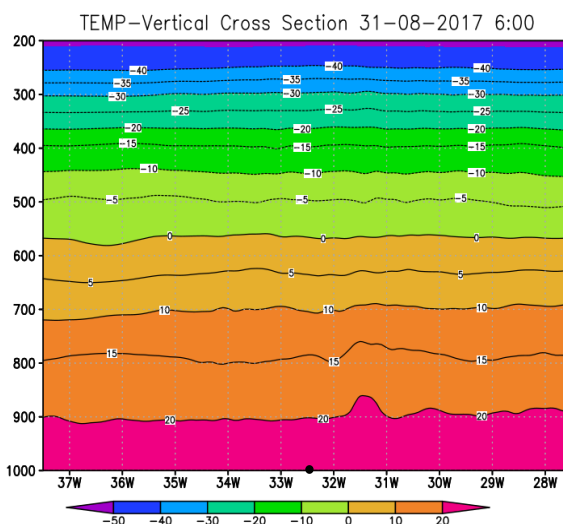
Σχήμα 3.13: Κατακόρυφες τομές της u συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις $16.4^\circ N$, (β) Τομή Βορρά -Νότου στις $32.5^\circ W$. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Στις κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου λείπει η συμμετρία, καθώς η κατανομή εκατέρωθεν του κέντρου είναι διαφορετική. Επίσης οι τιμές κίνησης προς τον Βορρά είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις ταχύτητες κίνησης προς τον Νότο (Σχήμα 3.14 α). Στο Σχήμα 3.14β βλέπουμε ότι κυριαρχεί η κίνηση προς τον Βορρά ενώ στο Βορειότερο κομμάτι παρατηρείται ότι έχουμε σύγκλιση $\sim 18^\circ N$. Οι τιμές τόσο της v όσο και της u συνιστώσας αυξήθηκαν σε σχέση με μια μέρα πριν, που ο κυκλώνας ήταν ακόμα στην ένταση της καταιγίδας.



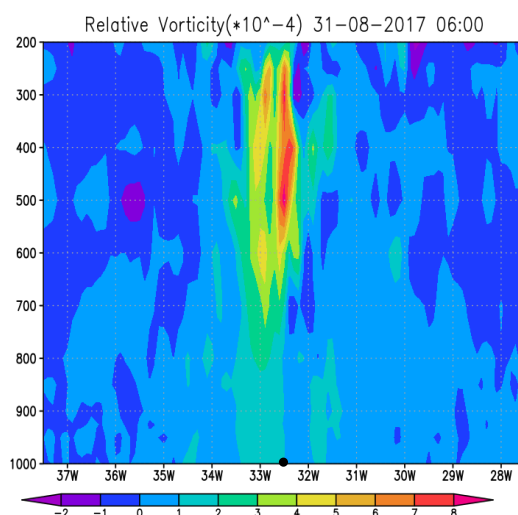
Σχήμα 3.14: Κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 31 Αυγούστου, 06Z όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις $16.4^\circ N$, (β) Τομή Βορρά -Νότου στις $32.5^\circ W$. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Από την άλλη η κατανομή της θερμοκρασίας ακολουθεί το ίδιο μοτίβο που είχε και όταν ο κυκλώνας είχε ακόμα την μορφή τροπικής ύφεσης όμως υπάρχει μια μικρή θερμή ανωμαλία, πιο συγκεκριμένα μια κάμψη, που φανερώνει την ύπαρξη και την δράση του συστήματος (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στις 31 Αυγούστου, 06Z, όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

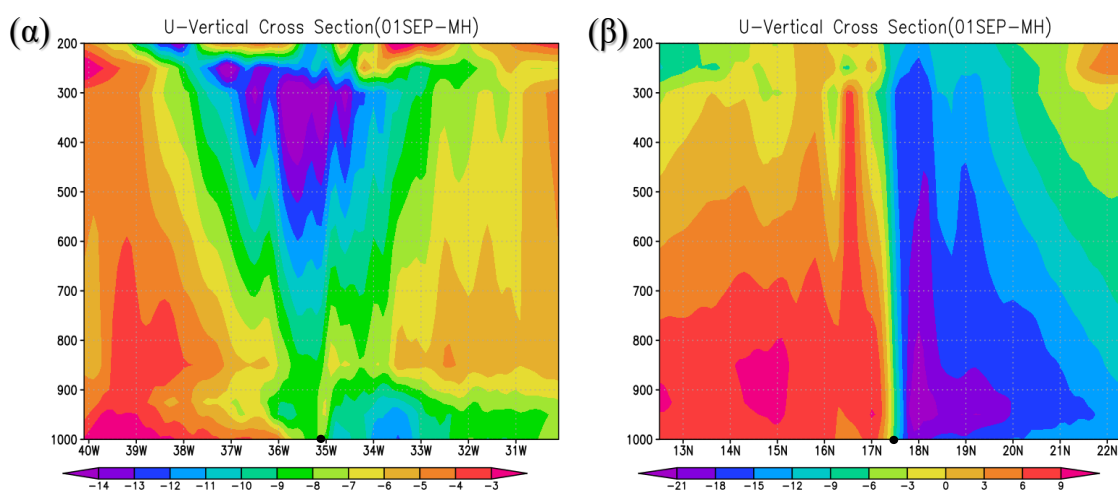
Πλέον ο σχετικός στροβιλισμός έχει λάβει μια πιο ευδιάκριτη μορφή με σαφώς αυξημένες τιμές που κατανέμονται κατά μήκος του κέντρου, αλλά κυρίως στην ανώτερη τροπόσφαιρα (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.16: Κατακόρυφη ζωνική τομή του σχετικού στροβιλισμού (S^{-1}) στις 31 Αυγούστου, 06Z, όταν η Irma μετατράπηκε σε κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

3.4 Δομή ισχυρού κυκλώνα

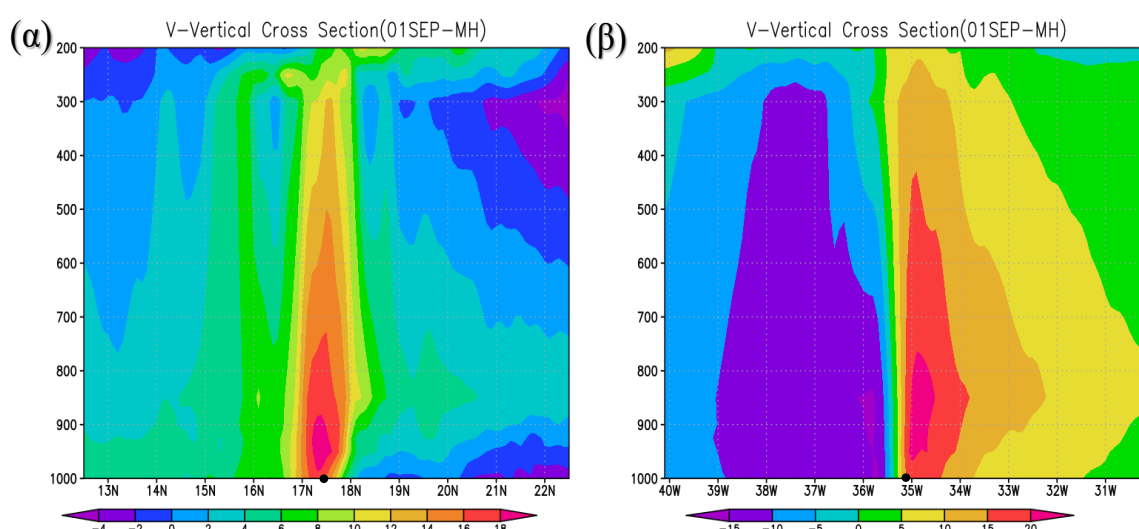
Στη 1 Σεπτεμβρίου 00Z η u συνιστώσα σε τομή Ανατολής-Δύσης (Σχήμα 3.17α) παίρνει μόνο αρνητικές τιμές, πράγμα που σημαίνει ότι ο άνεμος κινείται πλέον μόνο δυτικά σε όλα τα επίπεδα της ατμόσφαιρας. Από την άλλη, στην τομή Βορρά-Νότου (Σχήμα 3.17β) η δομή έχει μια συμμετρική εικόνα, όμως οι τιμές που φανερώνουν κίνηση προς την δύση είναι κατά πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που φανερώνουν κίνηση προς την ανατολή. Αυτό συμβαίνει στο βόρειο τμήμα του κυκλώνα και οφείλεται στο ότι εκεί αναμένεται πιο έντονη οριζόντια βαροβαθμίδα λόγω της ύπαρξης του υποτροπικού (Αζορικού) αντικυκλώνα στα βόρεια. Επιπλέον είναι φανερό ότι οι υψηλότερες ταχύτητες κατέβηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα και αυτό εξηγείται από την εξίσωση του θερμικού ανέμου, σύμφωνα με την οποία τα κυκλωνικά συστήματα θερμού πυρήνα αναμένεται να έχουν τις μεγαλύτερες ταχύτητες στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Στο κέντρο του κυκλώνα υπάρχει ένας νοητός άξονας συμμετρίας (17.5° N) που χωρίζει την κίνηση προς τη δύση από την κίνηση προς την ανατολή, δηλαδή τις αρνητικές από τις θετικές τιμές του u , αντίστοιχα. Πλέον η δομή είναι ενός ισχυρού και ώριμου τροπικού κυκλώνα.



Σχήμα 3.17: Κατακόρυφες τομές της u συνιστώσας του ανέμου (m/s) στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις 17.5° N, (β) Τομή Βορρά-Νότου στις 35.1° W. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

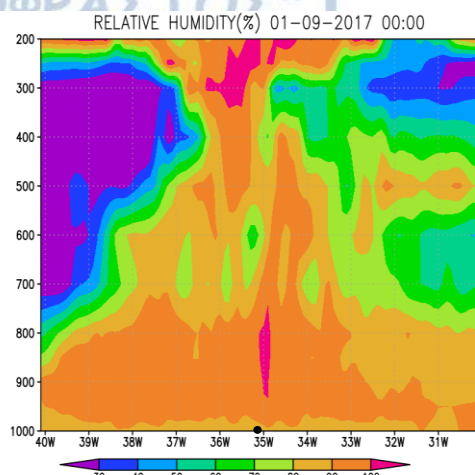
Όπως και σε όλα τα προηγούμενα στάδια έτσι και τώρα δεν θα περιοριστούμε μόνο στη μία συνιστώσα αλλά θα μελετήσουμε και την κίνηση προς τον Βορρά και τον Νότο.

Η τομή Βορρά -Νότου (Σχήμα 3.18α) δείχνει κίνηση προς τον Βορρά με μεγαλύτερες ταχύτητες στο κέντρο του κυκλώνα που αγγίζουν τα 18 m/s. Στο Σχήμα 3.18β φαίνεται η κίνηση ως προς τον κάθετο άξονα και για μια ακόμα φορά αυτή η συμμετρία στη δομή με ταχύτητες που δείχνουν περίπου ίδια κίνηση προς τον Βορρά και προς τον Νότο, με την πρώτη ελαφρώς να υπερτερεί, πάλι όμως αναφερόμαστε σε κυκλωνική κυκλοφορία. Και σε αυτή την περίπτωση ο άξονας συμμετρίας περνάει από το κέντρο του συστήματος (35.1° W).

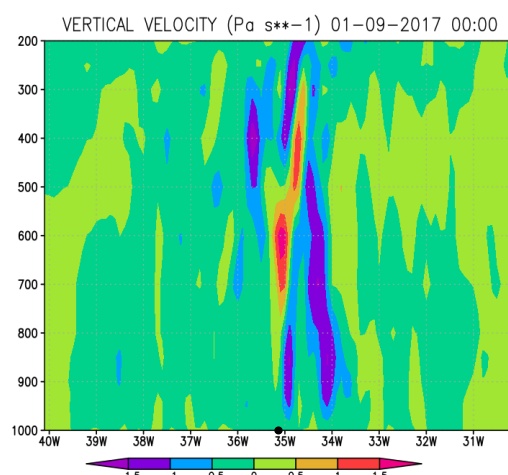


Σχήμα 3.18: Κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου (m/s) στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα: (α) Τομή Βορρά-Νότου στις 35.1° W, (β) Τομή Ανατολής -Δύσης στις 17.5° N. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Με την εξέλιξη του κυκλώνα συνεπάγεται και μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της κατανομής των παραμέτρων. Η κατανομή της υγρασίας ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με πριν όπως και η κατακόρυφη ταχύτητα απλά σε πιο οργανωμένη μορφή γιατί πλέον αρχίζει και διαμορφώνεται καλύτερα η δομή του ματιού και της γύρω περιοχής (Σχήμα 3.19 και 3.20). Στις εικόνες της υγρασίας (Σχήμα 3.19) και της κατακόρυφης ταχύτητας (Σχήμα 3.20) υπάρχει έντονη διάτμηση όπως και πριν με τιμή 8-10 m/s.

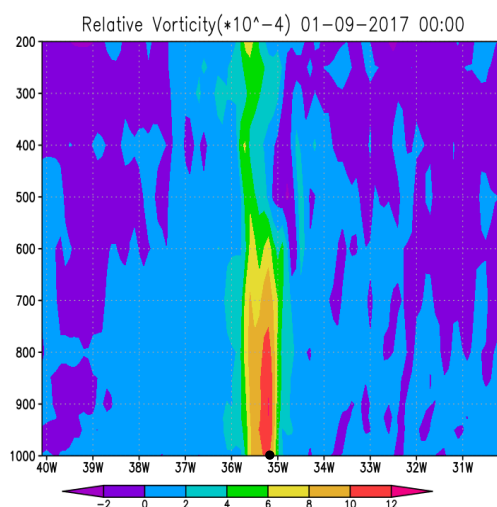


Σχήμα 3.19: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Σχετικής υγρασίας (%) στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.



Σχήμα 3.20: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Κατακόρυφης ταχύτητας (Pa/s) στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

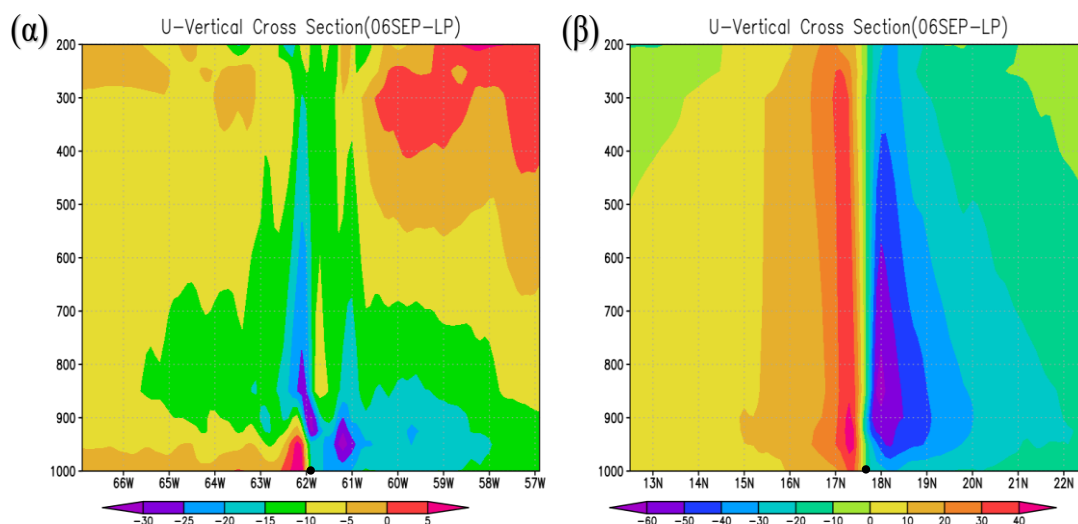
Ο στροβιλισμός όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21 αυξήθηκε και άλλο και οι μεγάλες τιμές πλέον καταλάμβαναν την κατώτερη τροπόσφαιρα κάτι που φαίνεται και στις οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου.



Σχήμα 3.21: Κατακόρυφη ζωνική τομή του Σχετικού Στροβιλισμού (s^{-1}) στη 1 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma μετατράπηκε σε ισχυρό κυκλώνα. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

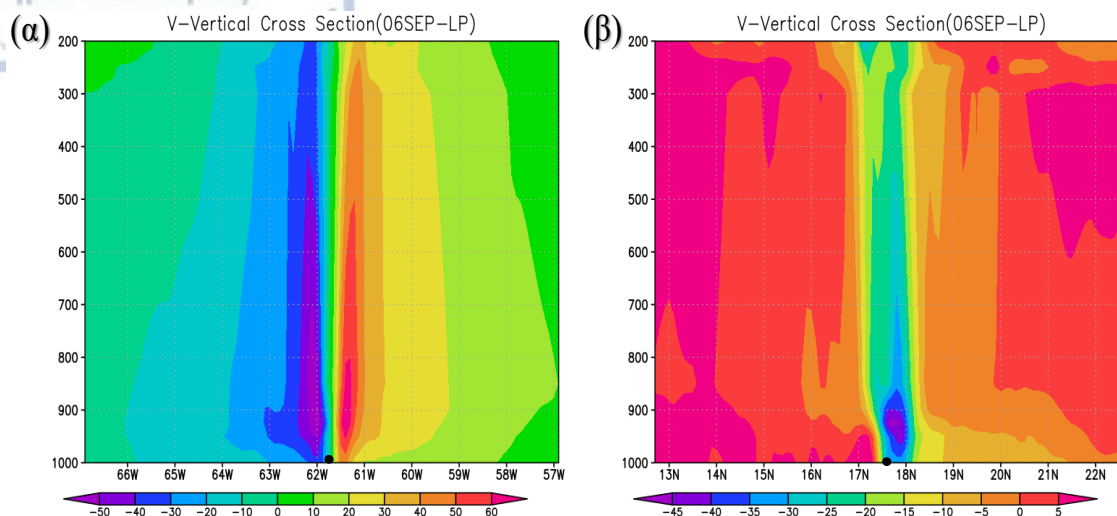
Η πορεία που ακολούθησε ο κυκλώνας είναι ήδη γνωστή και σχεδόν καθ όλη την διάρκεια παρέμενε ισχυρός μέχρι που τελικά στις 6 Σεπτεμβρίου όπως ήδη έχει αναφερθεί απέκτησε την μικρότερη πίεση στο μάτι (914 hPa στην πραγματικότητα και 946 hPa στις πλεγματικές αναλύσεις). Τη στιγμή της μικρότερης πίεσης στις 6 Σεπτεμβρίου 06Z, ο κυκλώνας έχει ωριμάσει αρκετά και πλέον αυτή η συμμετρία που φαινόταν πριν διακρίνεται πολύ έντονα, στους άξονες που είναι κάθετοι στην κίνηση

της κάθε συνιστώσας. Η μορφή έχει γίνει ιδιαίτερα συμπαγής και ο αντικυκλώνας που φαινόταν στα αρχικά στάδια στην ανώτερη ατμόσφαιρα δεν διακρίνεται πια γιατί έχει διασταλεί. Στην τομή Ανατολής -Δύσης της υ συνιστώσας (Σχήμα 3.22α) παρατηρείται ως επί το πλείστον κίνηση προς την δύση και σε ένα σημείο γύρω στις 62° W παρατηρείται σύγκλιση στα κατώτερα επίπεδα. Στα ανώτερα επίπεδα από την άλλη λαμβάνει χώρα απόκλιση. Κατά μήκος του άξονα Βορρά -Νότου, νότια του κέντρου παρατηρείται κίνηση προς την ανατολή με ταχύτητες 40 m/s ενώ η κίνηση προς την δύση (βόρεια του κέντρου) γίνεται με μεγαλύτερες ταχύτητες που προσεγγίζουν τα 60 m/s (Σχήμα 3.22β). Τα δύο μέγιστα εμφανίζονται σε μικρή απόσταση στην κατώτερη τροπόσφαιρα, δείχνοντας ότι η Irma αποτελείται από έναν συμπαγή στρόβιλο.



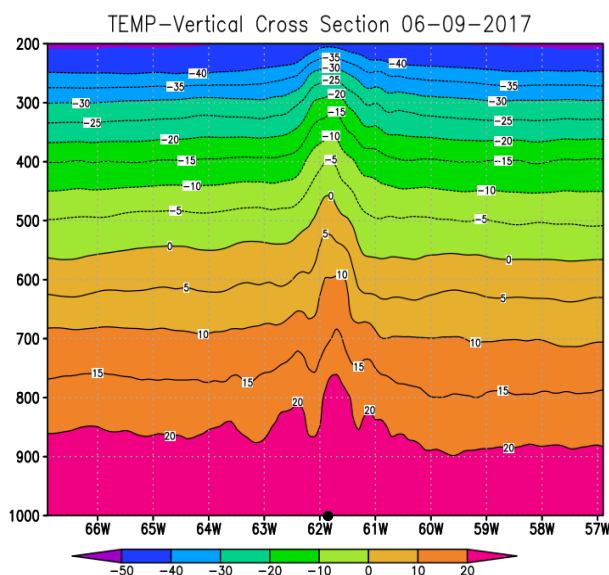
Σχήμα 3.22: Κατακόρυφες τομές της υ συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις 17.7° N, (β) Τομή Βορρά-Νότου στις 61.9° W. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Η υ συνιστώσα κατά μήκος του κάθετου προς αυτήν άξονα (Σχήμα 3.23α) φανερώνει μια σχεδόν συμμετρική μορφή όπως συνέβαινε και με την υ συνιστώσα με ταχύτητες που δηλώνουν κίνηση προς τον Βορρά ~60 m/s ενώ οι μέγιστες ταχύτητες κίνησης προς τον Νότο φτάνουν τα 50 m/s. Οι μέγιστες ταχύτητες έχουν κατέβει στη κατώτερη τροπόσφαιρα, λόγω του θερμού πυρήνα του κυκλώνα, όπως ήδη σχολιάστηκε από προηγούμενο στάδιο. Σε τομή Βορρά- Νότου (Σχήμα 3.23β) οι τιμές που δηλώνουν κίνηση προς τον Βορρά είναι κατά πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές που δηλώνουν κίνηση προς τον Νότο. Στη κατώτερη τροπόσφαιρα στο κέντρο του κυκλώνα (17.7° N) παρατηρείται σύγκλιση των αερίων μαζών.



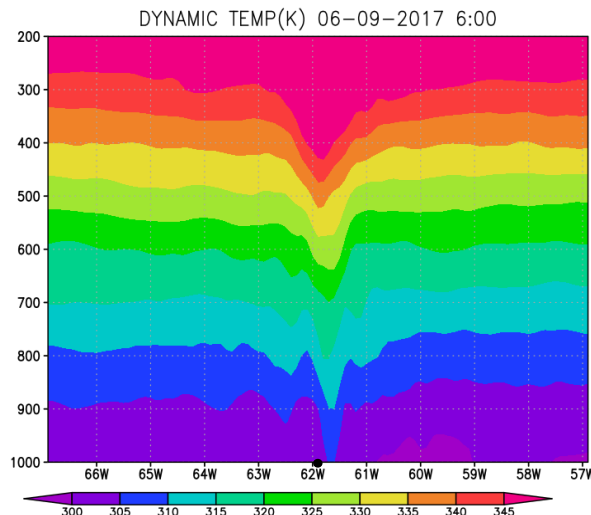
Σχήμα 3.23: Κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης: (α) Τομή Ανατολής-Δύσης στις 17.7° N, (β) Τομή Βορρά-Νότου στις 61.9° W. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.24 φαίνεται ότι αυτή η μικρή ανεπαίσθητη κάμψη που εμφάνισε η κατανομή της θερμοκρασίας την 1η Σεπτεμβρίου μετατράπηκε σε μια απότομη κάμψη στο σημείο που είναι ο κυκλώνας. Εμφανίζεται σε όλα τα επίπεδα όμως είναι πολύ πιο έντονη στα κατώτερα και πιο ομαλή στα ανώτερα. Η θερμή ανωμαλία δείχνει καθαρά τον θερμό πυρήνα του έντονου κυκλώνα.



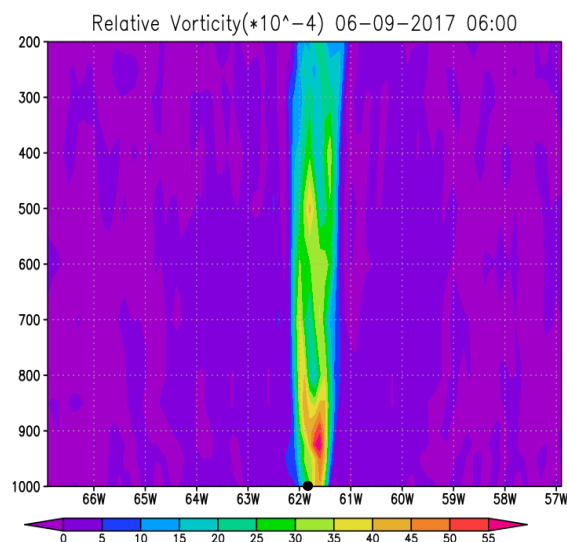
Σχήμα 3.24: Κατακόρυφη ζωνική τομή της θερμοκρασίας (°C) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Από την άλλη η δυναμική θερμοκρασία κάνει μια κάμψη προς τα κάτω δείχνοντας ότι στον πυρήνα του κυκλώνα σε ίδια επίπεδα η δυναμική θερμοκρασία είναι πιο μεγάλη από την γύρω περιοχή, το ίδιο που συμβαίνει δηλαδή στη θερμοκρασία και μαρτυρά θερμό πυρήνα (Σχήμα 3.25).



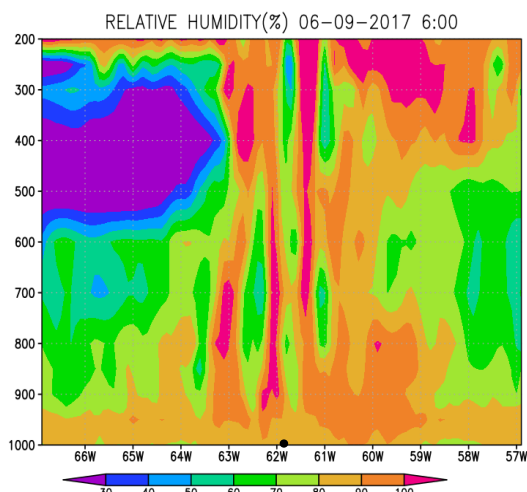
Σχήμα 3.25: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Δυναμικής θερμοκρασίας (K) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων

Ο σχετικός στροβιλισμός έχει αυξηθεί πολύ με τις μεγαλύτερες τιμές να συναντώνται πάλι στη κατώτερη τροπόσφαιρα στο κέντρο του κυκλώνα όμως η μορφή έχει γίνει ακόμα πιο συμπαγής, ό,τι ακριβώς συνέβαινε και στις συνιστώσες του ανέμου και οι τιμές είναι πλέον μόνο θετικές (Σχήμα 3.26).

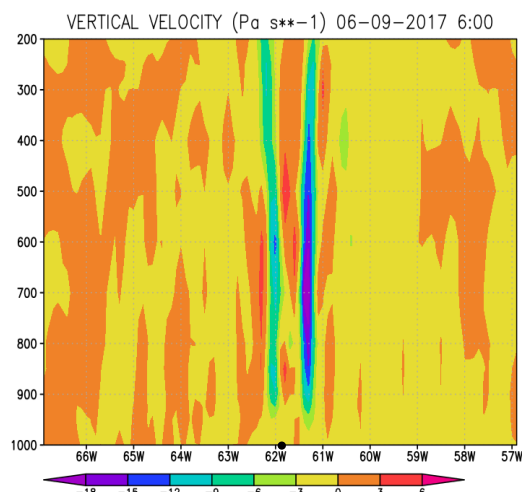


Σχήμα 3.26: Κατακόρυφη ζωνική τομή του Σχετικού Στροβιλισμού (S^{-1}) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Συνεχίζοντας την μελέτη των δεδομένων, στο Σχήμα 3.27 η υγρασία παραμένει σε υψηλά επίπεδα σε πολλά σημεία (τοίχωμα του ματιού) και στο μάτι στη μέση τροπόσφαιρα συναντάμε μικρότερες τιμές. Αυτό που φαίνεται πιο πολύ σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μέρα, είναι η διαφορά μεταξύ της κίνησης στο μάτι και της κίνησης στις ζώνες βροχόπτωσης (Σχήμα 3.28). Οι ταχύτητες που δείχνουν την άνοδο έχουν αυξηθεί κατά πολύ και για αυτό διακρίνεται μεγάλη αντίθεση ανάμεσα στις ανοδικές και στις καθοδικές κινήσεις.



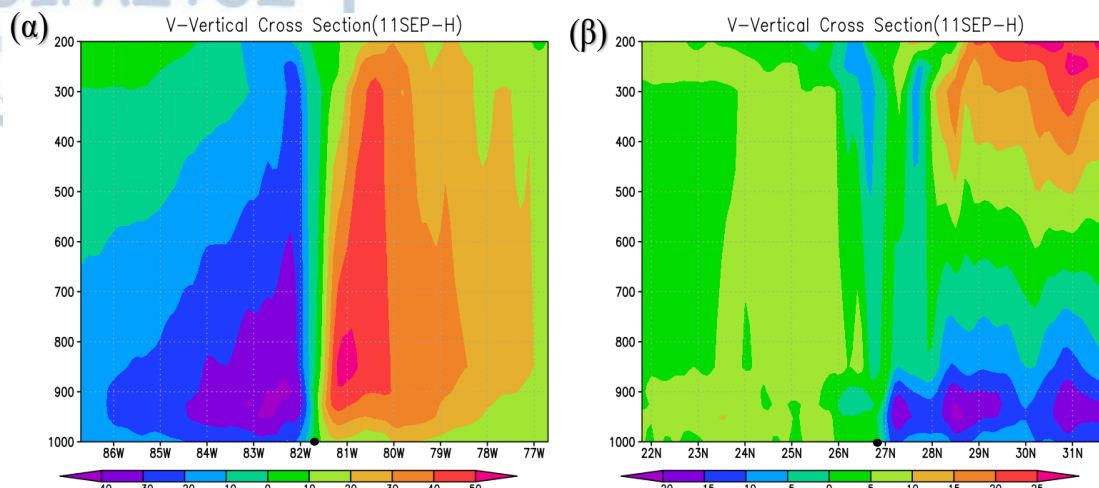
Σχήμα 3.27: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Σχετικής Υγρασίας (%) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.



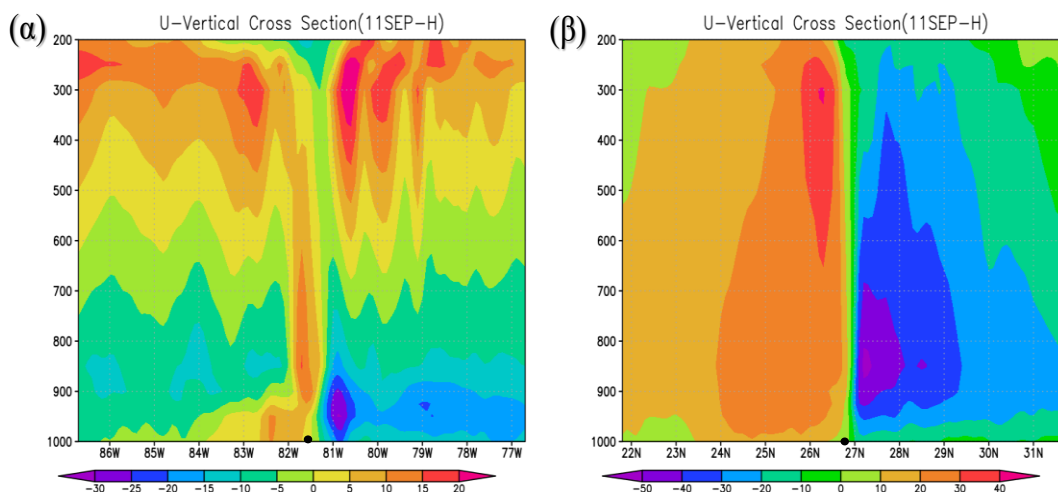
Σχήμα 3.28: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Κατακόρυφης Ταχύτητας (Pa/s) στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z όταν η Irma απέκτησε την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων

3.5 Δομή του τροπικού κυκλώνα κατά τη μετάβαση στην ξηρά

Στις 11 Σεπτεμβρίου και ώρα 00Z ο κυκλώνας έχει χτυπήσει τις ακτές των νοτιοανατολικών ΗΠΑ. Αυτό που αναμένεται είναι ότι βαθμιαία θα αρχίσει να εξασθενεί. Στα Σχήματα 3.29 και 3.30 φαίνεται η δομή των 2 συνιστωσών του ανέμου. Γενικά διακρίνεται ότι οι τιμές μειώνονται και ο στρόβιλος γίνεται όλο και λιγότερο συμπαγής. Οι μεγαλύτερες τιμές καταλαμβάνουν τα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας. Στο Σχήμα 3.30α διακρίνεται σύγκλιση στα κατώτερα επίπεδα που πιθανόν οφείλεται στην πολύ μεγάλη τιμή της τριβής του εδάφους.

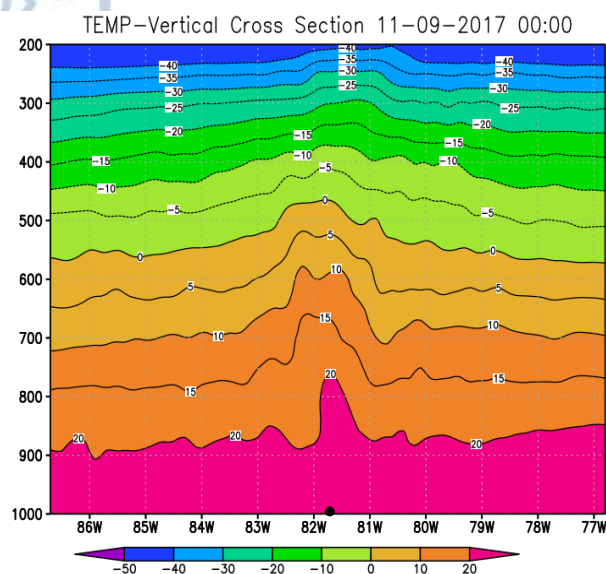


Σχήμα 3.29: Κατακόρυφες τομές της v συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma χτύπησε την Αμερική: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις $26.8^\circ N$, (β) Τομή Βορρά-Νότου στις $81.7^\circ W$. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.



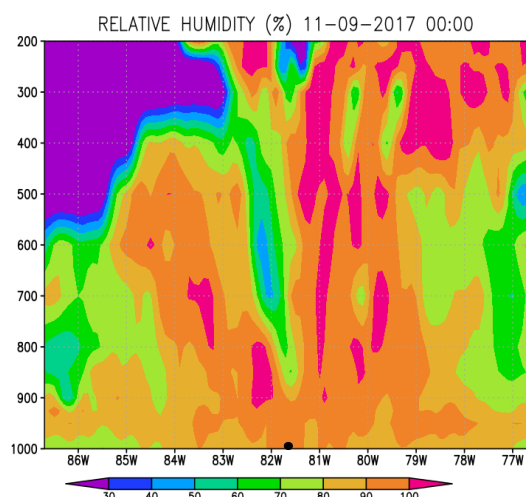
Σχήμα 3.30: Κατακόρυφες τομές της u συνιστώσας του ανέμου (m/s) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma χτύπησε την Αμερική: (α) Τομή Ανατολής -Δύσης στις $26.8^\circ N$, (β) Τομή Βορρά-Νότου στις $81.7^\circ W$. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Εφόσον υπάρχει ακόμα η διαταραχή είναι επόμενο ότι θα συνεχίσει να υπάρχει αυτή η καμπή στην κατανομή της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.31 η κατανομή εξακολουθεί να έχει αυτήν τη μορφή που είχε και πέντε μέρες πριν. Όμως στα κατώτερα επίπεδα αυτή η κάμψη είναι αρκετά πιο έντονη σε σχέση με πριν και στα ανώτερα επίπεδα η κάμψη αυτή είναι πιο μικρή και πιο περιορισμένη. Αυτό συμβαίνει όπως και πριν στο κέντρο του κυκλώνα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι γύρω στις $81.7^\circ W$.

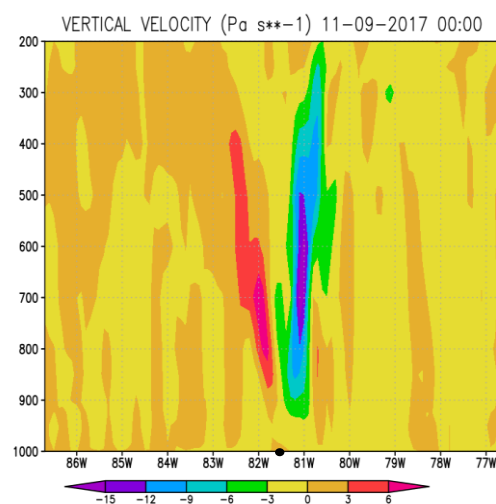


Σχήμα 3.31: Κατακόρυφη ζωνική τομή της θερμοκρασίας (°C) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma χτύπησε την Αμερική. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Οι άλλες 2 παράμετροι έχουν την ίδια δομή με πριν, δηλαδή στην υγρασία (Σχήμα 3.32) στη μέση τροπόσφαιρα συναντάται μια περιοχή μικρότερης υγρασίας και γύρω οι τιμές παραμένουν υψηλές, ενώ η κατακόρυφη ταχύτητα (Σχήμα 3.33) δείχνει αυτές τις ανοδικές και καθοδικές κινήσεις που επικρατούν στην ατμόσφαιρα λόγω του κυκλώνα.

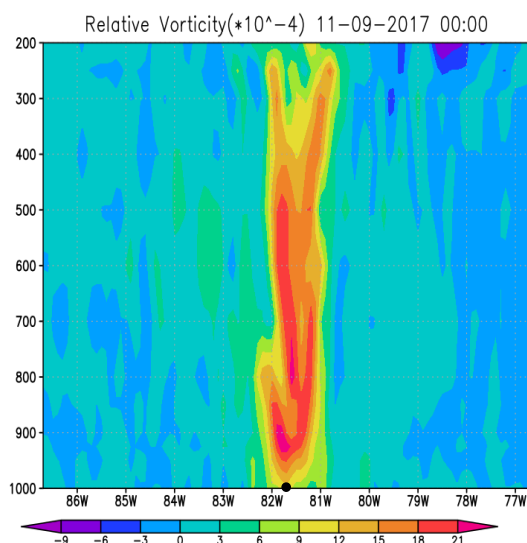


Σχήμα 3.32: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Σχετικής υγρασίας (%) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma χτύπησε την Αμερική. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.



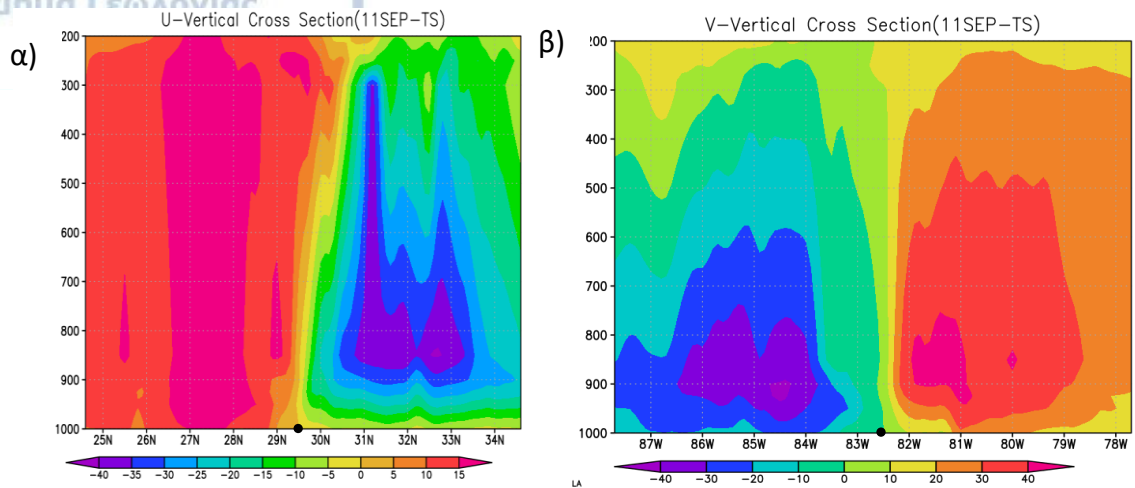
Σχήμα 3.33: Κατακόρυφη ζωνική τομή της Κατακόρυφης Ταχύτητας (Pa/s) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma χτύπησε την Αμερική. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Σε αυτά τα τελικά στάδια ο σχετικός στροβιλισμός αρχίζει παίρνει μικρότερες τιμές και η δομή παύει να είναι τόσο συμπαγής όσο ήταν πριν (Σχήμα 3.34). Αρχίζει να εμφανίζεται ξανά αντικυκλωνική κυκλοφορία στην γύρω περιοχή.



Σχήμα 3.34: Κατακόρυφη ζωνική τομή του Σχετικού Στροβιλισμού (S^{-1}) στις 11 Σεπτεμβρίου, 00Z όταν η Irma χτύπησε την Αμερική. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Αφού έχει φτάσει πάνω από την ξηρά είναι λογικό και επόμενο ότι θα αρχίσει να φθίνει σιγά σιγά και να αποδομείται, λόγω της τριβής και της δραματικής μείωσης των επιφανειακών ροών λανθάνουσας θερμότητας από τον θερμό ωκεανό. Ακολουθεί έτσι μια αντίστροφη πορεία από αυτήν που ακολουθούσε όταν σχηματίστηκε και από κυκλώνας μετατρέπεται σε τροπική καταιγίδα και από καταιγίδα σταδιακά διαλύεται. Στο Σχήμα 3.35 απεικονίζεται η δομή του ανέμου στις 11 Σεπτεμβρίου, 12Z, όταν εξασθένησε σε τροπική καταιγίδα. Σε σχέση με την πρώτη φορά που μετατράπηκε ο κυκλώνας σε τροπική καταιγίδα τόσο η u όσο και η v συνιστώσα είναι πολύ πιο οργανωμένη και οι ταχύτητες είναι πολύ πιο μεγάλες. Και αυτό είναι λογικό γιατί η μετάβαση γίνεται αντίστροφα, δηλαδή από τις πιο οργανωμένες συνθήκες στη διάλυση. Η μεγαλύτερη διαφορά με τις 30 Αυγούστου είναι ότι πλέον ο κυκλώνας διατηρεί αυτήν τη συμμετρία που είχε αποκτήσει καθώς ωρίμαζε, κάτι που έλειπε από τα αρχικά στάδια σχηματισμού του. Βλέπουμε επίσης πόσο έχει απλωθεί η δομή του υποδηλώνοντας τη σταδιακή του διάλυση.



Σχήμα 3.35: Κατακόρυφες τομές στις 11 Σεπτεμβρίου, 12Z της: α) υ συνιστώσας (m/s) στις 29.5°N, β) ν συνιστώσας (m/s) στις 82.7°W. Η τελεία δηλώνει το κέντρο του συστήματος σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων.

Κεφάλαιο 4. Περίληψη και συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση του τροπικού κυκλώνα Irma, ο οποίος εμφανίστηκε στον τροπικό Βόρειο Ατλαντικό στην περίοδο κυκλώνων του 2017. Η πτυχιακή είχε ως σκοπό τη μελέτη της δομής και της πορείας του κυκλώνα κάνοντας χρήση δεδομένων τα οποία αναλύθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Grads. Η μελέτη του βασίστηκε κυρίως σε επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων των Η.Π.Α. μαζί με δορυφορικές εικόνες του GOES-East.

Στις 27 Αυγούστου το Αφρικανικό ανατολικό κύμα από το οποίο προήλθε η Irma εμφανίστηκε στις ακτές της δυτικής Β. Αφρικής και στη συνέχεια κινήθηκε προς τα Δυτικά. Μετά από λίγες μέρες, στις 30 Αυγούστου 06Z, πήρε όνομα και μετατράπηκε σε τροπική καταιγίδα στη λεκάνη του τροπικού Βορείου Ατλαντικού περίπου 10 μοίρες δυτικά της Αφρικής. Η ανάπτυξη του κυκλώνα συνέχισε μέχρι που τελικά στις 6 Σεπτεμβρίου, 06Z απέκτησε τη μικρότερη πίεση του στο κέντρο (946 hPa με βάση τις πλεγματικές αναλύσεις και 914 hPa με βάση το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων) και την μέγιστη ταχύτητα ανέμου 155 kt (με βάση το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων). Στην πορεία της η Irma συνάντησε τα νησιά της Καραϊβικής και τελικά κατέληξε στις νοτιοανατολικές ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών προξενώντας πολλές καταστροφές. Οι νεκροί λόγω του κυκλώνα ανέρχονται στους 134, ενώ εκατοντάδες άνθρωποι τραυματίστηκαν. Οι υλικές καταστροφές που προξένησε, τον κατέταξε μέσα στους 5 πιο επιζήμιους κυκλώνες των ΗΠΑ. Απ' την μελέτη παρατηρήθηκε ότι όσο μειώνεται η πίεση η δομή γίνεται όλο και πιο συμπαγής. Οπότε, σαν γενικότερο συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι όσο πιο ισχυρός γίνεται ο κυκλώνας τόσο πιο συμπαγής γίνεται η δομή του. Επιπλέον, η ύπαρξη ξηρού πυρήνα επιβεβαιώθηκε καθώς από την προβολή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο των 600 hPa η περιοχή του κέντρου του καταλαμβάνεται από μικρότερες τιμές σε σχέση με την γύρω περιοχή.

Η μελέτη έδειξε ότι η κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου μεταξύ 200 hPa και 850 hPa έπαιρνε τιμές 2-3 m/s, επιτρέποντας την ανάπτυξη του συστήματος. Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας καθώς πλησίαζε την Αμερική συνεχώς αυξανόταν. Αρχικά στην περιοχή γέννησης οι τιμές κυμαινόταν από 27-28 °C, ενώ κατά την αναβάθμιση της σε ισχυρό κυκλώνα, την μέρα με την ελάχιστη τιμή της

βαρομετρικής πίεσης οι τιμές έφταναν τους 30 °C. Λίγο πριν χτυπήσει την Αμερική οι θερμοκρασίες της θάλασσας πλησίασαν τους 31 °C. Μετά από έλεγχο όλων των παραμέτρων που συντελούν στο σχηματισμό ενός τροπικού κυκλώνα, παρατηρήθηκε ότι όλες οι συνθήκες ήταν ευνοϊκές οδηγώντας στο σχηματισμό της Irma.

Η ύπαρξη θερμού πυρήνα φανερώθηκε τόσο από την κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας όσο και από την κατακόρυφη κατανομή της δυναμικής θερμοκρασίας καθώς για το ίδιο επίπεδο πίεσης παρατηρήθηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες στο κέντρο του κυκλώνα. Με τη μελέτη της δομής διαπιστώθηκε επίσης ότι η στοιχειώδης συμμετρία του κυκλώνα υπάρχει στα πιο ισχυρά στάδια και πάλι όμως δεν είναι σε καμία χρονική στιγμή απόλυτη. Η συμμετρία φαινόταν κυρίως στις κάθετες κατακόρυφες τομές των συνιστωσών του ανέμου, αλλά και στην οριζόντια προβολή του. Μια ακόμα αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι η ύπαρξη αντικυκλωνικής κυκλοφορίας στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας στα αρχικά στάδια. Η κίνηση αυτή έχει να κάνει με την ύπαρξη ενός αντικυκλώνα στην ανώτερη ατμόσφαιρα, ο οποίος σταδιακά καθώς εξελισσόταν η κυκλογένεση συνεχώς διαστελλόταν.

Η ελάχιστη πίεση που εμφανίσθηκε στα πλεγματικά δεδομένα ανάλυσης δεν ήταν πάντοτε στο σημείο το οποίο είχε ορισθεί από το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων. Για αυτό και πολλές φορές στα διαγράμματα το κέντρο του κυκλώνα με βάση τα δεδομένα ανάλυσης δεν συνέπιπτε με το κέντρο που ήταν σημειωμένο στο διάγραμμα. Καθώς πλησιάζαμε στην ημέρα με την ελάχιστη πίεση, οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου εμφανίζονται στην κατώτερη τροπόσφαιρα που όπως αναφέρθηκε είναι αποτέλεσμα του θερμού πυρήνα (και εξηγείται από την εξίσωση του θερμικού ανέμου).

Τέτοιου είδους μελέτες έντονων καιρικών φαινομένων και ειδικότερα τροπικών κυκλώνων ξεκαθαρίζουν στους ερευνητές και τους επιχειρησιακούς μετεωρολόγους τη δομή αυτών των ισχυρών και με μεγάλη επίδραση διαταραχών καθώς και το περιβάλλον μέσα στο οποίο αναπτύσσονται. Η συστηματική μελέτη τους γεμίζει με ελπίδες την επιστημονική κοινότητα ότι κάποια στιγμή θα είναι εφικτή η πρόβλεψη τους σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό.



1. Allard, R. A. (1984). A climatology of the characteristics of tropical cyclones in the northeast Pacific during the period 1966-1980. PhD thesis, Texas Tech University, USA.
2. Blake, E. S. (2018). The 2017 Atlantic hurricane season: catastrophic losses and costs. *Weatherwise*, 71(3), 28-37.
3. Camp, J., Scaife, A. A., & Heming, J. (2018). Predictability of the 2017 North Atlantic hurricane season. *Atmospheric Science Letters*, 19(5), e813.
4. Cangialosi, J. P., Latta, A. S., & Berg, R. (2018). National Hurricane center tropical cyclone report: Hurricane Irma. National Oceanic and Atmospheric Administration. Report no. AL112017.
5. Chen, R., Zhang, W., & Wang, X. (2020). Machine learning in tropical cyclone forecast modeling: A review. *Atmosphere*, 11(7), 676.
6. DeMaria, M., & Kaplan, J. (1994). Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. *Journal of Climate*, 7(9), 1324-1334.
7. Elsberry, R. L. (1995). Tropical cyclone motion. Global perspectives on tropical cyclones. WMO/TD-No. 693, 106-197.
8. Frank, W. M. (1987). Tropical cyclone formation. Chap. 3, A global view of tropical cyclones, Office of Naval Research. 53–90, Arlington.
9. Gray, W. M. (1975). Tropical cyclone genesis. PhD thesis, Colorado State University, USA.
10. Gray, W. M., (1979). Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In: *Meteorology over the tropical ocean*. D.B. Shaw (Ed.), Roy.Meteorol. Soc., 155-218.
11. Hamill, T. M., Whitaker, J. S., Fiorino, M., & Benjamin, S. G. (2011). Global ensemble predictions of 2009's tropical cyclones initialized with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 139(2), 668-688.
12. Hawkins, J. D., & Helveston, M. (2008). Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. 28th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Orlando, FL, Amer. Meteor. Soc., 14B. 1.

13. Holland, G., & Bruyere, C. L. (2014). Recent intense hurricane response to global climate change. *Climate Dynamics*, 42, 617-627.
14. Hubert, L. F., Krueger, A. F., & Winston, J. S. (1969). The double intertropical convergence zone-fact or fiction?. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(4), 771-773.
15. Kimball, S. K., & Mulekar, M. S. (2004). A 15-year climatology of North Atlantic tropical cyclones. Part I: Size parameters. *Journal of Climate*, 17(18), 3555-3575.
16. Klotzbach, P. J., Schreck III, C. J., Collins, J. M., Bell, M. M., Blake, E. S., & Roache, D. (2018). The extremely active 2017 North Atlantic hurricane season. *Monthly Weather Review*, 146(10), 3425-3443.
17. Kossin, J. P., Olander, T. L., & Knapp, K. R. (2013). Trend analysis with a new global record of tropical cyclone intensity. *Journal of Climate*, 26(24), 9960-9976.
18. Landsea, C. W., Bell, G. D., Gray, W. M., & Goldenberg, S. B. (1998). The extremely active 1995 Atlantic hurricane season: Environmental conditions and verification of seasonal forecasts. *Monthly Weather Review*, 126(5), 1174-1193.
19. Lee, T. C., Knutson, T. R., Nakaegawa, T., Ying, M., & Cha, E. J. (2020). Third assessment on impacts of climate change on tropical cyclones in the Typhoon Committee Region–Part I: Observed changes, detection and attribution. *Tropical Cyclone Research and Review*, 9(1), 1-22.
20. McBride, J. L. (1981). Observational analysis of tropical cyclone formation. Part I: Basic description of data sets. *Journal of Atmospheric Sciences*, 38(6), 1117-1131.
21. McBride, J. L. (1995). Tropical cyclone formation. Global perspective on tropical cyclones, World Meteorological Organization, 63-105.
22. Merrill, R. T. (1987). An experiment in statistical prediction of tropical cyclone intensity change (Vol. 34). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Hurricane Center.

23. Neumann, C. J., 1993: Global overview. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting, WMO Tech. Doc. 560, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1.1–1.56.
24. Ooyama, K. V., (1982). Conceptual evolution of the theory and modelling of the tropical cyclone. J. Meteor. Soc. Japan, 60, 369-380.
25. Pytharoulis, I. (1999). African Easterly Waves and their transformation into tropical cyclones in North Atlantic. PhD thesis, University of Reading, UK.
26. Ramage, C. S. (1974). Monsoonal influences on the annual variation of tropical cyclone development over the Indian and Pacific Oceans. Monthly Weather Review, 102(11), 745-753.
27. Sharkov, E. A. (2011). Global tropical cyclogenesis. Springer Science & Business Media.
28. Smith, R. K. (2006). Lectures on tropical cyclones. http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/lehre/roger/Tropical_Cyclones/060510_tropical_cyclones.pdf
29. Wang, Y. (2012). Recent research progress on tropical cyclone structure and intensity. Tropical Cyclone Research and Review, 1(2), 254-275.
30. Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A., & Chang, H. R. (2005). Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science, 309(5742), 1844-1846.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Πλατανιώτης, Α. Γ. (2021). Συνοπτική και Δυναμική Ανάλυση των Αφρικανικών Ανατολικών Κυμάτων (No. GRI-2021-31528). Aristotle University of Thessaloniki. <http://ikee.lib.auth.gr/record/333051/files/GRI-2021-31528.pdf>

Διαδίκτυο

1. NOAA's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, U.S Department of Commerce (NOAA): <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>
2. University of Wisconsin – CIMSS : <http://tropic.ssec.wisc.edu/archive/>



3. World Meteorological Organization (WMO): <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones>
4. Zehnder, J. A., 2021 Tropical Cyclone. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/tropical-cyclone> Accessed 29 September 2021.
5. <https://en.sat24.com/en>