



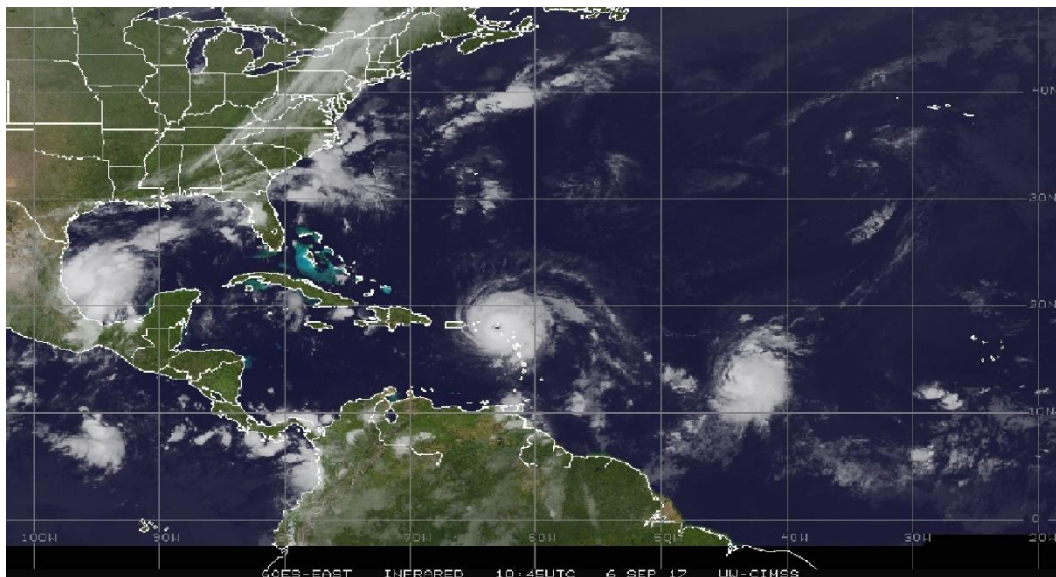
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΕΡΜΑΝΟΥΚΙΑΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΛΑΟΥΡΑ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΙΚΟ ΒΟΡΕΙΟ
ΑΤΛΑΝΤΙΚΟ ΩΚΕΑΝΟ ΤΟ 2020

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023





EMMANOYHA SERMANOYKIAN

Προπτυχιακός φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5871

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΛΑΟΥΡΑ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΙΚΟ ΒΟΡΕΙΟ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟ ΩΚΕΑΝΟ ΤΟ 2020

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας κατά το Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών,
στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Πυθαρούλης Ιωάννης



© Εμμανουήλ Σερμανουκιάν, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΛΑΟΥΡΑ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΙΚΟ ΒΟΡΕΙΟ ΑΤΛΑΝΤΙΚΟ
ΩΚΕΑΝΟ ΤΟ 2020 - Διπλωματική Εργασία

© Emmanouil Sermanoukian, School of Geology, Aristotle University of
Thessaloniki (AUTH), Dept. of Meteorology and Climatology, 2023

All rights reserved

STUDY OF HURRICANE LAURA IN THE TROPICAL NORTH ATLANTIC
OCEAN IN 2020 - Bachelor Thesis

Απαγορεύεται η μερική ή ολική ανατύπωση, αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, 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 εξώφυλλου: Από το CIMSS Tropical Cyclones, απεικονίζεται ο κυκλώνας
Τρμα (2017) στον τροπικό βόρειο Ατλαντικό ωκεανό



Περίληψη

Κύριο στόχο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η περιγραφή και ανάλυση του τροπικού συστήματος που οδήγησε στη δημιουργία του κυκλώνα Λάουρα στον βόρειο Ατλαντικό ωκεανό το 2020. Για τον σκοπό αυτό συνδυάστηκαν δορυφορικά, πραγματικά δεδομένα μαζί με πλεγματικά δεδομένα αναδρομικών αναλύσεων ERA5.

Μελετήθηκε η εξέλιξη ενός Αφρικανικού ανατολικού κύματος στον κυκλώνα Λάουρα πάνω από τον Ατλαντικό ωκεανό κατά την διάρκεια της εποχής των κυκλώνων τον Αύγουστο του 2020. Εντοπίστηκε η ύπαρξη ενός αφρικανικού ανατολικού κύματος στην τροπική ΒΔ Αφρική. Μέσω του Αφρικανικού ανατολικού αεροχείμματος κινήθηκε γενικά δυτικά πάνω από τον τροπικό ΒΑ Ατλαντικό ωκεανό. Οι κατάλληλες περιβαλλοντικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες πάνω από τον Β Ατλαντικό ωκεανό ήταν αυτές που τελικά ευνόησαν στην περεταίρω ενίσχυση του συστήματος σε τροπική ύφεση και τροπική καταιγίδα. Τέλος, η ύπαρξη πολύ θερμών επιφανειακών νερών ιδιαίτερα εντός του Κόλπου του Μεξικού ευνόησαν την αναβάθμιση του συστήματος στον κυκλώνα Λάουρα. Η σύγκριση των πραγματικών δεδομένων με τις αναδρομικές αναλύσεις ERA5 έδειξε ότι οι τελευταίες δεν μπόρεσαν να αποτυπώσουν την πλήρη ένταση του κυκλώνα.



Abstract

The main aim of this bachelor thesis is the description and analysis of the tropical system that created hurricane Laura in north Atlantic in 2020. For this purpose meteorological measurements, satellite data and ERA5 reanalysis data were combined and processed.

The evolution of an African Easterly Wave in hurricane Laura over the Atlantic ocean during the August 2020 hurricane season was examined. An African Easterly Wave was detected in tropical NW Africa. Through the African easterly jet it moved generally westward over the tropical NE Atlantic ocean. The favorable environmental and atmospheric conditions over the N Atlantic ocean were ultimately conducive to the further strengthening of the system into a tropical depression and tropical storm. Finally, the occurrence of warm sea surface waters particularly within the Gulf of Mexico contributed significantly to the upgrade of the system to hurricane Laura. The comparison of the actual data with the ERA5 reanalyses showed that the gridded data did not manage to represent the actual intensity of the hurricane.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Εισαγωγή στους τροπικούς κυκλώνες	9
1.1 Περιγραφή και διάκριση των τροπικών κυκλώνων	9
1.2 Περιοχές σχηματισμού και παράγοντες γένεσης	14
1.3 Δομή τροπικών κυκλώνων	20
1.4 Σκοπός της πτυχιακής	26
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Συνοπτικής Κλίμακας Ανάλυση	28
2.1 Δεδομένα και μεθοδολογία	28
2.2 Συνοπτική ανάλυση	30
2.2.1 Α' Φάση: Συνοπτική ανάλυση προ-συστήματος Λάουρα:	
τροπική διαταραχή - τροπική ύφεση	32



2.2.2 Β' Φάση: Συνοπτική ανάλυση συστήματος Λάουρα:

τροπική καταιγίδα – κυκλώνας	37
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Μέσης Κλίμακας Ανάλυση	47
3.1 Ανάλυση του κυκλώνα Λάουρα όταν εμφάνισε τη μέγιστη ένταση	47
3.1.1 Οριζόντια ανάλυση	47
3.1.2 Κατακόρυφη ανάλυση	53
3.2 Ανάλυση και σύγκριση δεδομένων	57
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Συμπεράσματα – Αποτελέσματα	61
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή στους τροπικούς κυκλώνες

1.1. Περιγραφή και διάκριση των τροπικών κυκλώνων

Οι τροπικοί κυκλώνες είναι φυσικά φαινόμενα που εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα της Γης. Πρόκειται για ισχυρά βαρομετρικά χαμηλά συστήματα συνοπτικής ή υποσυνοπτικής κλίμακας (~200 – 2.000km) που δεν χαρακτηρίζονται από μέτωπα, σχηματίζονται και αναπτύσσονται σχετικά κοντά στον ισημερινό, σε τροπικές και υποτροπικές θαλάσσιες περιοχές. Παρουσιάζουν μια πολύπλοκη τρισδιάστατη δομή και πιο συγκεκριμένα διακρίνεται μία καλά οργανωμένη κυκλωνική κυκλοφορία ισχυρών ανέμων στα χαμηλότερα επίπεδα της τροπόσφαιρας (~900mb) κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας γύρω από μια περιοχή χαμηλότερης ατμοσφαιρικής πίεσης (Holland, 1993, Πυθαρούλης, 2023). Αντίθετα, στα ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας διακρίνεται μια αντικυκλωνική κυκλοφορία ανέμων σύμφωνα με το National Weather Service (2023).

Ως επί το πλείστον, αυτά τα φυσικά φαινόμενα είναι μεγάλης δυναμικότητας και προκαλούν ανυπολόγιστες καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον, στα τεχνικά έργα αλλά και μεγάλες απώλειες ζωών, όπως ο κυκλώνας Άντριου το 1992 που χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό απωλειών ζωών και καταστροφών, αξίας 27 δισεκατομμυρίων δολαρίων Αμερικής (Holland, 1993, Pytharoulis, 1999), και ο κυκλώνας Κατρίνα το 2005 που χαρακτηρίζεται ένας από τους πιο θανατηφόρους και πολυδάπανους οικονομικά κυκλώνες (125 δισ. δολαρίων) που χτύπησαν τις Η.Π.Α με περισσότερους από 1.200 θανάτους, κυρίως εξαιτίας του κύματος της θύελλας (Nunez, 2023).

Κατά τον Foley (1995), με βάση τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό ο τροπικός κυκλώνας αποτελεί έναν γενικότερο όρο μιας ύφεσης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και διαχωρίζεται στα παρακάτω 4 στάδια (με το οποίο συμφωνεί και ο Pytharoulis, 1999):

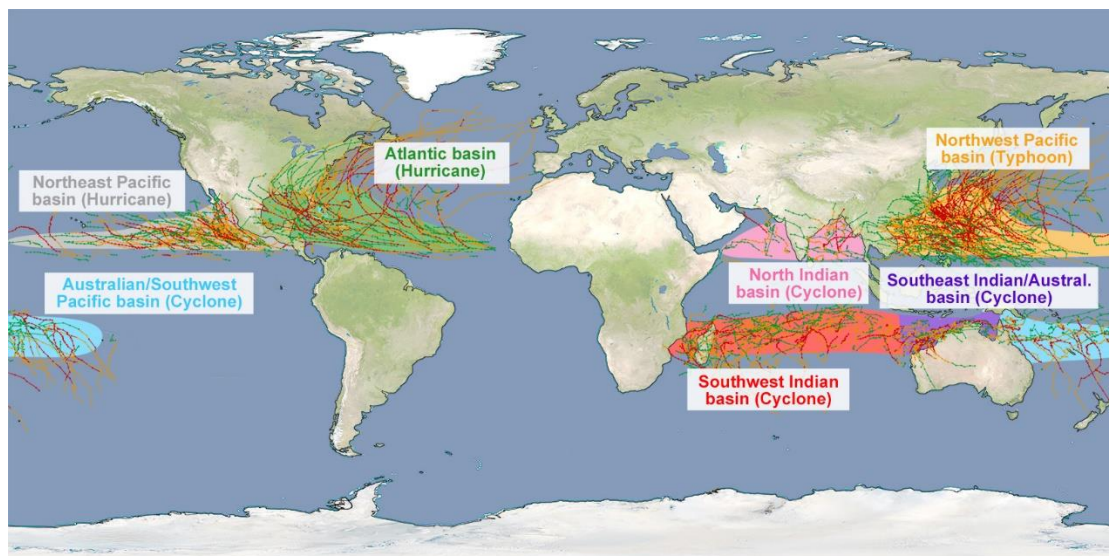
- i) Τροπική διαταραχή (tropical disturbance): παρατηρείται σε μια περιοχή με οργανωμένη αστάθεια διαμέτρου 200-600 km, χωρίς χαρακτηριστικά μετώπων. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Γκιζάνη (2019) εντοπίζεται ένα μη οργανωμένο κέντρο χαμηλής βαρομετρικής πίεσης και η μέγιστη τιμή μέσου ανέμου είναι $< 11 \text{ m/s}$ ($\sim 22 \text{ knots}$)
- ii) Τροπική ύφεση (tropical depression): πρόκειται για ασθενή τροπικό κυκλώνα με πλήρως οργανωμένη κυκλωνική κυκλοφορία ανέμων περιμετρικά από ένα ορατό κέντρο χαμηλής βαρομετρικής πίεσης πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου $< 17 \text{ m/s}$ ($\sim 34 \text{ knots}$ ή 62 km/h)
- iii) Τροπική καταιγίδα (tropical storm): πρόκειται για τροπικό κυκλώνα με σαφή ανάπτυξη κλειστών ισοβαρικών καμπυλών και με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου μεταξύ $17 - 32 \text{ m/s}$ ($34 - 63 \text{ knots}$ ή $63 - 118 \text{ km/h}$). Ο Holland (1993) ανέφερε ότι κάθε τροπικός κυκλώνας λαμβάνει κάποιο όνομα μόλις χαρακτηρίζεται από αυτό το στάδιο και έπειτα, ανεξαρτήτως αν εξελιχθεί μετέπειτα σε κυκλώνα.
- iv) Κυκλώνας (Hurricane/Typhoon/Cyclone): πρόκειται για έντονο τροπικό κυκλώνα όπου η βαρομετρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας στο κέντρο της κυκλωνικής κυκλοφορίας ανέμων μειώνεται περεταίρω, και με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου $> 33 \text{ m/s}$ (64 knots ή 119 km/h).

Οι κυκλώνες ανάλογα με την ωκεάνια λεκάνη δημιουργίας τους χαρακτηρίζονται με έναν εκ των παρακάτω όρων (Holland, 1993, Pytharoulis, 1999, National Weather Service, 2023, Met Office, 2023, Nunez, 2023):

- Hurricane: ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για τους κυκλώνες που λαμβάνουν χώρα στον Βόρειο Ατλαντικό ωκεανό, στον Βόρειο-Ανατολικό Ειρηνικό ωκεανό από την γραμμή του γεωγραφικού μήκους 180°A (ή $180^{\circ}\Delta$) και ανατολικότερα, και στον Νότιο Ειρηνικό ωκεανό από το γεωγραφικό μήκος 142°A και ανατολικότερα, (Σχήμα 1.1).
- Typhoon: ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για τους κυκλώνες στον Βόρειο-Δυτικό Ειρηνικό ωκεανό από την γραμμή του γεωγραφικού μήκους 180°A και δυτικότερα, (Σχήμα 1.1). Επιπλέον, αν η μέγιστη τιμή μέσου ανέμου είναι $> 150 \text{ mph}$, τότε ορίζονται ως ‘super typhoon’.
- Cyclone: ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για όλους τους υπόλοιπους κυκλώνες εκτός των προαναφερθέντων, συγκεκριμένα για τους κυκλώνες στο Νότιο-Δυτικό Ειρηνικό ωκεανό, και στον Ινδικό ωκεανό βόρειο και νότιο (Σχήμα 1.1).

Επιπλέον, σύμφωνα με το Met Office (2023) και το National Weather Service (2023) οι κυκλώνες (cyclones) στον ΝΔ Ειρηνικό και Ινδικό ωκεανό διαχωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με την ωκεάνια λεκάνη σχηματισμού τους:

- i) Έντονος τροπικός κυκλώνας (severe tropical cyclone): εντοπίζονται στο Νότιο-Δυτικό Ειρηνικό ωκεανό από το γεωγραφικό μήκος 160°A και δυτικότερα, και στο Νότιο-Ανατολικό Ινδικό ωκεανό από το γεωγραφικό μήκος των 90°A και ανατολικότερα.
- ii) Έντονη κυκλωνική θύελλα (severe cyclonic storm): εντοπίζονται στο Βόρειο Ινδικό ωκεανό.
- iii) Τροπικός κυκλώνας (tropical cyclone): εντοπίζονται στο Νότιο-Δυτικό Ινδικό ωκεανό.



Σχήμα 1.1. Παρουσιάζονται όλες οι ωκεάνιες περιοχές σχηματισμού των τροπικών κυκλώνων με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου $> 74\text{mph}$ (κυκλώνες) και όλες οι ονομασίες που τους δίνονται. Στις ωκεάνιες λεκάνες του βόρειου Ατλαντικού και βόρειο-ανατολικού Ειρηνικού ωκεανού ονομάζονται ως 'hurricane', στην ωκεάνια λεκάνη του βόρειο-δυτικού Ειρηνικού ωκεανού ονομάζονται ως 'typhoon', και στις ωκεάνιες λεκάνες του νότιο-δυτικού Ειρηνικού και Ινδικού ωκεανού ονομάζονται γενικότερα ως 'cyclone', (Deutscher Wetterdienst, 2023).

Οι κυκλώνες στους οποίους αναφέρεται η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι αυτοί που εντοπίζονται στην ωκεάνια λεκάνη του Βορείου Ατλαντικού. Οι συγκεκριμένοι κυκλώνες χαρακτηρίζονται στις παρακάτω 5 κατηγορίες ανάλογα με την κλίμακα έντασης κυκλώνα Saffir-Simpson, (Simpson and Riehl, 1981). Σύμφωνα με νεότερες αναφορές από το National Hurricane Center (N.H.C.) and Central Pacific Hurricane Center (2021), και από το National Geographic Society (2022), έχουν δημιουργηθεί μικρές τροποποιήσεις στις μέγιστες τιμές μέσου ανέμου σε σύγκριση με την αρχική κλίμακα έντασης κυκλώνα Saffir-Simpson, (Simpson and Riehl, 1981).

Έτσι λοιπόν, στον παρακάτω Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η αναθεωρημένη κλίμακα έντασης κυκλώνα Saffir-Simpson, στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι τιμές της ελάχιστης βαρομετρικής πίεσης σύμφωνα με τους Simpson and Riehl (1981), και οι μέγιστες τιμές μέσου ανέμου (ενός λεπτού) και του μεγέθους των καταστροφών που προκαλούν σύμφωνα με το National Oceanic and Atmospheric Administration (2021) και National Geographic (2022).

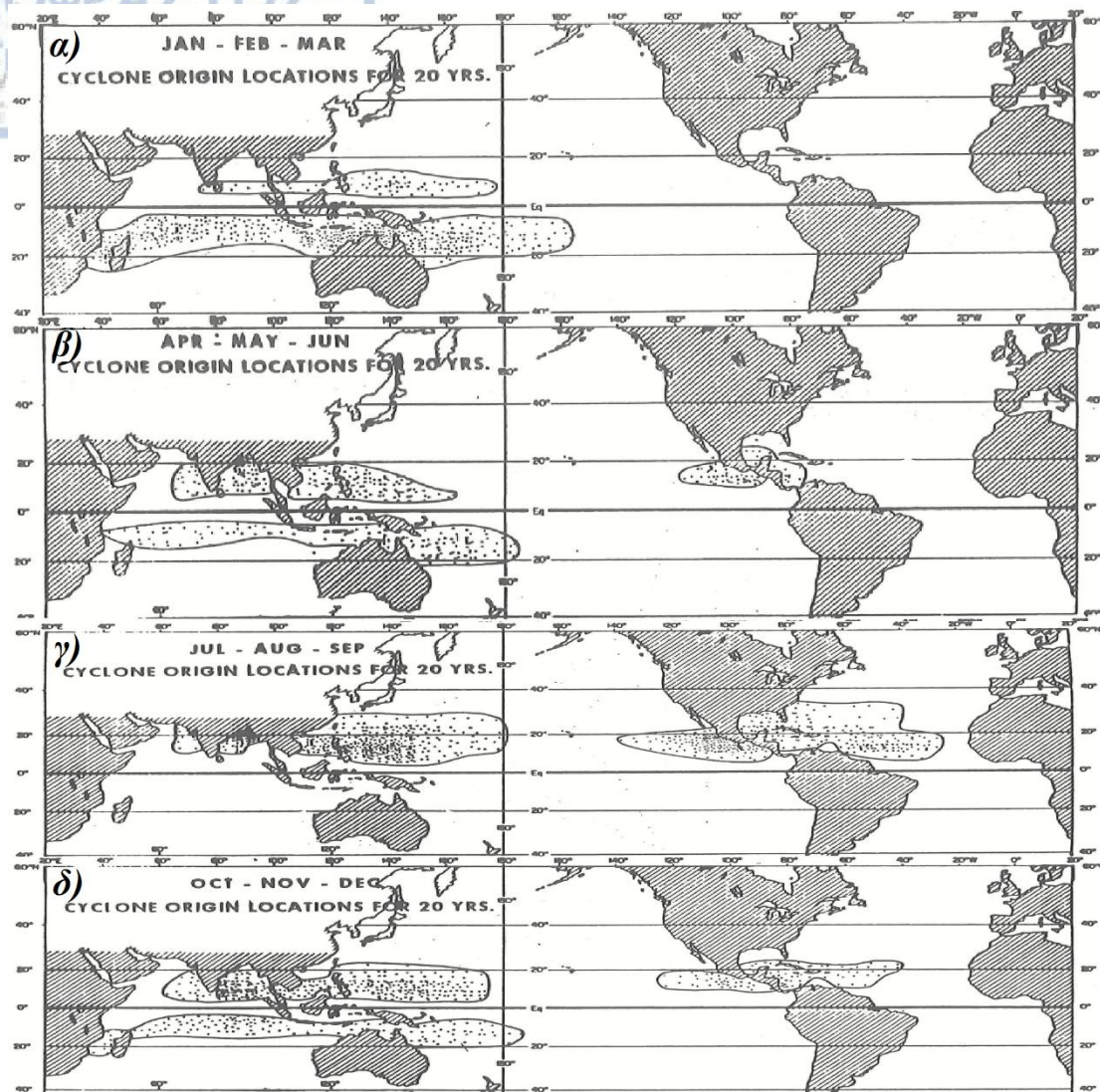
Κατηγορία	Μέγιστη τιμή μέσου ανέμου (mph) (knots) (km/h)			Ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης στην επιφάνεια (mb)	Καταστροφές στην ξηρά
1	74-95	64-82	119-153	≥ 980	Μικροζημιές κτηρίων, ανατροπές δέντρων, διακοπές ηλεκτροδότησης, τραυματισμοί από αιωρούμενα συντρίμμια
2	96-110	83-95	154-177	979-965	Εκτεταμένες ζημιές κτηρίων, ανατροπές δέντρων, διακοπές ηλεκτροδότησης, τραυματισμοί και θάνατοι από αιωρούμενα συντρίμμια
3	111-129	96-112	178-208	964-945	Ολέθριες καταστροφές, ανατροπές πολλών δέντρων, διακοπές ύδρευσης και ηλεκτροδότησης, υψηλός κίνδυνος τραυματισμών και θανάτων
4	130-156	113-136	209-251	944-920	Καταστροφικές ζημιές, ανατροπές δέντρων-φυλώνων ηλεκτροδότησης, δυσκολία μετακίνησης, ακατοίκητες περιοχές, πολύ υψηλός κίνδυνος τραυματισμών και θανάτων
5	≥ 157	≥ 137	≥ 252	≤ 919	Καταστροφικές ζημιές με πολλές αστοχίες κτηρίων, σχεδόν όλα τα δέντρα-φυλώνες ανατρέπονται, απομονωμένες ακατοίκητες περιοχές, μέγιστος κίνδυνος τραυματισμών και θανάτων και σε κλειστούς χώρους

Πίνακας 1.1 Η αναθεωρημένη κλίμακα έντασης κυκλώνα Saffir-Simpson. Πρόκειται για ένα σύστημα κατηγοριοποίησης των κυκλώνων από το 1 – 5 με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους, όπως, την μέγιστη τιμή μέσου ανέμου, την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας στο κέντρο της οργανωμένης κυκλωνικής κυκλοφορίας ανέμων, και το μέγεθος των καταστροφών που προκαλούν στην ξηρά.

Επιπλέον, σύμφωνα με το MetLink (2020) ένας τροπικός κυκλώνας με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου περίπου $> 50 \text{ m/s}$ ή 178 km/h (κατηγορίας 3 και άνω) μπορεί να χαρακτηριστεί ως 'ισχυρός τροπικός κυκλώνας' (severe tropical cyclone) και 'ισχυρός κυκλώνας' ('major hurricane' ή 'super typhoon') ανάλογα με την ωκεάνια λεκάνη σχηματισμού του.

1.2 Περιοχές σχηματισμού και παράγοντες γένεσης

Σύμφωνα με τον Pytharoulis (1999), οι τροπικοί κυκλώνες σχηματίζονται αποκλειστικά σε ωκεάνιες λεκάνες που εντοπίζονται μεταξύ των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερου. Εξαίρεση αποτελούν οι ωκεανοί του νότιου Ατλαντικού και νότιου-ανατολικού Ειρηνικού, αλλά και όλες οι περιοχές εκατέρωθεν του ισημερινού με γεωγραφικό πλάτος μικρότερο των 2.5°B ή N (McBride, 1995), όπου δεν παρατηρούνται τροπικοί κυκλώνες. Στο Σχήμα 1.2, διακρίνονται οι ωκεάνιες περιοχές και ειδικότερα οι αρχικές θέσεις σχηματισμού των τροπικών κυκλώνων σε παγκόσμια κλίμακα, για την χρονική περίοδο 1958-1977 σύμφωνα με τον Gray (1979). Επιπλέον, ο McBride (1995) ανέφερε ότι σχηματίζονται κατά την διάρκεια ολόκληρου του έτους, όμως σε διαφορετικές περιοχές διότι επηρεάζονται από τις εποχιακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, σε μια ωκεάνια περιοχή από τα τέλη της καλοκαιρινής μέχρι τις αρχές της φθινοπωρινής περιόδου παρουσιάζεται η μεγαλύτερη συχνότητα σχηματισμού τους. Για το βόρειο ημισφαίριο η περίοδος αυτή συμπίπτει από τον Ιούλιο έως τον Σεπτέμβριο, ενώ για το νότιο ημισφαίριο συμπίπτει από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο, αντίστοιχα, στις λεκάνες που βρίσκονται στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο.



Σχήμα 1.2. Τα παραπάνω σχήματα α) – δ) προτάθηκαν από τον Gray (1979) και αποτυπώνουν τις θέσεις δημιουργίας των τροπικών κυκλώνων σε όλες τις πιθανές ωκεάνιες λεκάνες για την χρονική περίοδο μεταξύ 1958-1977. Τα παραπάνω τέσσερα σχήματα αποτυπώνουν όλες τις ωκεάνιες λεκάνες, αλλά διαφοροποιούνται ως προς την εποχή στην οποία αναφέρονται. Συγκεκριμένα, το κάθε σχήμα αναφέρεται: α) μεταξύ Ιανουαρίου-Μαρτίου, β) μεταξύ Απριλίου-Ιουνίου, γ) μεταξύ Ιουλίου-Σεπτεμβρίου και δ) μεταξύ Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου.

Ο McBride (1995) ανέφερε ότι περισσότεροι τροπικοί κυκλώνες εμφανίζονται στο βόρειο ημισφαίριο και περίπου οι διπλάσιοι στο ανατολικό από ότι στο δυτικό ημισφαίριο, διότι στο δεύτερο συμπεριλαμβάνονται οι δύο ωκεάνιες λεκάνες στις οποίες όπως προαναφέρθηκε δεν σχηματίζονται καθόλου τροπικοί κυκλώνες. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από το Σχήμα 1.2.

Για την χρονική περίοδο μεταξύ 1968 – 1989 (22 χρόνια) εμφανίζονται κατά μέσο όρο περίπου 80 τροπικοί κυκλώνες που χαρακτηρίζονται τουλάχιστον ως τροπικές καταιγίδες ανά έτος σε όλο τον πλανήτη, με τους περισσότερους εξ' αυτών να χαρακτηρίζονται και ως κυκλώνες. Οι περιοχές σχηματισμού των τροπικών κυκλώνων διακρίνονται στις παρακάτω επτά ωκεάνιες λεκάνες (Πίνακας 1.2), καθώς επίσης και το πλήθος, η ετήσια συχνότητα, και το ποσοστό γένεσης τους ανά λεκάνη, (Neumann, 1993, McBride, 1995, Pytharoulis, 1999).

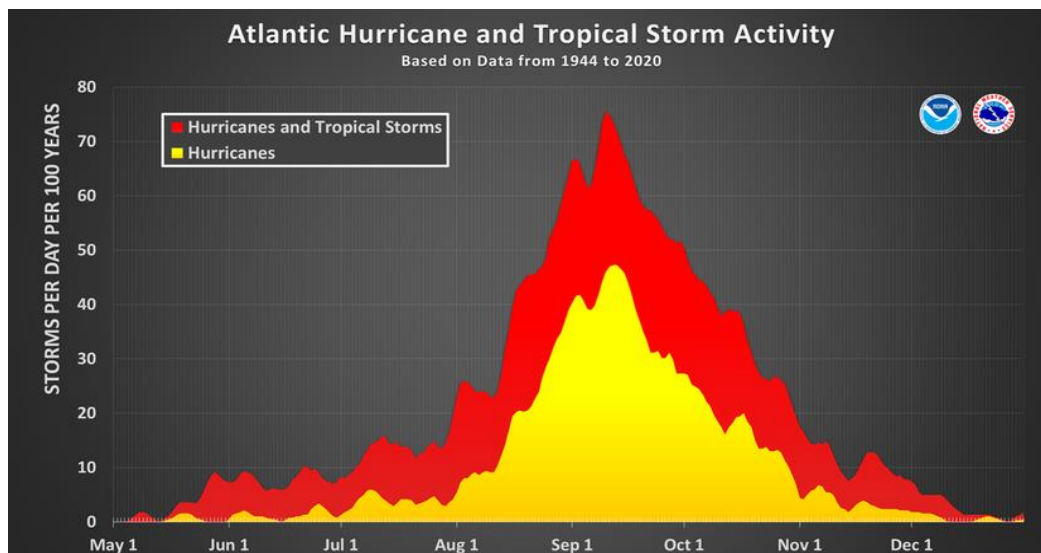
Ωκεάνια λεκάνη	Βόρειος Ατλαντικός	ΒΑ Ειρηνικός	ΒΔ Ειρηνικός	Βόρειος Ινδικός	ΝΔ Ινδικός (δυτικότερα των 100°Α)	ΝΑ Ινδικός/ Αυστραλίας (δυτικότερα των 142°Α)	ΝΔ Ειρηνικός/ Αυστραλίας (ανατολικότερα των 142°Α)
Πλήθος (εκ των οποίων κυκλώνες)	214 (118)	364 (195)	565 (353)	120 (55)	228 (98)	152 (75)	199 (94)
Συχνότητα ανά έτος	9.7 (5.4)	16.5 (8.9)	25.7 (16.0)	5.4 (2.5)	10.4 (4.4)	6.9 (3.4)	9.0 (4.3)
Ποσοστό	11.6 (12.0)	19.8 (19.7)	30.7 (35.7)	6.5 (5.6)	12.4 (9.9)	8.2 (7.6)	10.8 (9.5)

Πίνακας 1.2 Παρουσιάζονται οι επτά ωκεάνιες λεκάνες. Για κάθε μία από αυτές αναγράφεται: το πλήθος των τροπικών κυκλώνων που χαρακτηρίζονται τουλάχιστον ως τροπικές καταιγίδες, η ετήσια συχνότητά τους, το ποσοστό εμφάνισης τους ανά λεκάνη, καθώς και το αντίστοιχο πλήθος, η συχνότητα και το ποσοστό των ισχυρότερων τροπικών κυκλώνων με μέγιστες τιμές μέσου ανέμου $\geq 33\text{m/s}$ ή 64knots, που χαρακτηρίζονται ως κυκλώνες (τιμές στις παρενθέσεις), για την χρονική περίοδο 1968-1989, σύμφωνα με τον Neumann (1993).

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι, η ωκεάνια λεκάνη του ΒΔ Ειρηνικού είναι η πιο ενεργή καθώς εντοπίζονται οι περισσότεροι τροπικοί κυκλώνες σε πλήθος από οποιαδήποτε άλλη λεκάνη, με τη δεύτερη κατά σειρά να ακολουθεί αυτή του ΒΑ Ειρηνικού (Pytharoulis, 1999). Η ωκεάνια λεκάνη ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, αυτή του βόρειου Ατλαντικού, είναι η τέταρτη κατά σειρά πιο ενεργή, με

περίπου 10 τροπικούς κυκλώνες (κατηγορίας τουλάχιστον τροπικών καταιγίδων και άνω) να εμφανίζονται ανά έτος, από τους οποίους οι 5-6 να χαρακτηρίζονται ως κυκλώνες, για το συγκεκριμένο διάστημα των 22 χρόνων (1968-1989).

Σύμφωνα με νεότερες έρευνες από το National Oceanic and Atmospheric Administration and National Weather Service (2023), οι οποίες έλαβαν υπόψη και μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μεταξύ 1944-2020, προκύπτουν περισσότερες πληροφορίες για τους τροπικούς κυκλώνες στον Ατλαντικό ωκεανό. Έτσι, για την λεκάνη του Ατλαντικού ωκεανού η χρονική περίοδος δραστηριοποίησης των κυκλώνων είναι από την 1 Ιουνίου έως τις 30 Νοεμβρίου, ωστόσο μπορεί να δημιουργηθούν τόσο νωρίτερα όσο και αργότερα από τις παραπάνω ημερομηνίες. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται το πλήθος των τροπικών κυκλώνων, συγκεκριμένα των τροπικών καταιγίδων και κυκλώνων μαζί, αλλά και το πλήθος μόνο των κυκλώνων στην περιοχή του Ατλαντικού ωκεανού, για την χρονική περίοδο από την 1 Μαΐου έως τις 31 Δεκεμβρίου. Το πλήθος όλων των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν μια περίοδο 77 χρόνων (1944-2020), ωστόσο κανονικοποιήθηκαν για περίοδο 100 χρόνων. Επομένως, στο διάγραμμα αποτυπώνεται το πλήθος των τροπικών καταιγίδων και κυκλώνων για κάθε μία ημέρα, με περίοδο αναφοράς 100 χρόνων.



Σχήμα 1.3 Στο διάγραμμα του σχήματος αποτυπώνεται το πλήθος των τροπικών κυκλώνων με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου ≥ 34 knots (κόκκινη περιοχή), και το πλήθος των κυκλώνων με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου ≥ 64 knots (κίτρινη περιοχή) από την 1 Μαΐου μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου ανά ημέρα, για μια περίοδο 100 χρόνων. Το διάστημα των 100 χρόνων προέκυψε από την κανονικοποίηση δεδομένων για 77 χρόνια, μεταξύ 1944-2020, (National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center, 2023).

Σύμφωνα με τον Gray (1979) η χωρική κατανομή γένεσης των τροπικών κυκλώνων εξαρτάται από τους παρακάτω έξι παράγοντες (δεν είναι απόλυτα επαρκείς), την άποψη αυτή ενστερνίζονται και οι McBride (1995) και Pytharoulis (1999):

- i. Σχετικός στροβιλισμός κατώτερης τροπόσφαιρας
Δημιουργούνται σε περιοχές με υψηλές τιμές σχετικού στροβιλισμού (Vxu) στην κατώτερη τροπόσφαιρα, (McBride και Zehr, 1981). Επιπλέον, ο Emanuel (1986) ανέφερε ότι όσο ισχυρότερος είναι ο αρχικός στροβιλισμός τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να δημιουργηθεί τροπικός κυκλώνας.
- ii. Επαρκής τιμή πλανητικού στροβιλισμού (οφείλεται στην περιστροφή της Γης)
Όταν μια περιοχή βρίσκεται πολύ κοντά στον ισημερινό η δύναμη Coriolis που ευθύνεται για την περιστροφή του ανέμου παίρνει μικρές τιμές (που γίνονται ίσες με μηδέν πάνω από τον ισημερινό) και συνεισφέρει ελάχιστα στον απόλυτο στροβιλισμό. Επομένως, οι συνθήκες δημιουργίας τροπικών κυκλώνων δεν είναι ευνοϊκές σε περιοχές κοντά στον ισημερινό (με γεωγραφικά πλάτη έως 3-5° B ή N). Ο Gray (1979), κατάφερε να συσχετίσει το γεωγραφικό πλάτος με τη συχνότητα γένεσης των τροπικών καταιγίδων μέσω μιας περίπου γραμμικής σχέσης που ισχύει για τα γεωγραφικά πλάτη μεταξύ των 3° και 15° B, ενώ το μεγαλύτερο πλήθος τροπικών καταιγίδων σημειώνεται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη.
- iii. Ασθενής κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου

Με βάση έρευνες του Gray (1968) ο σχηματισμός των τροπικών κυκλώνων ευνοείται σε περιοχές που επικρατεί ασθενή κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου. Αντίθετα τα βαροκλινικά βαρομετρικά χαμηλά συστήματα που εντοπίζονται στα μέσα γεωγραφικά πλάτη ευνοούνται από ισχυρή κατακόρυφη διάτμηση. Η κατακόρυφη διάτμηση του οριζόντιου ανέμου λαμβάνεται υπόψη μεταξύ της κατώτερης και ανώτερης τροπόσφαιρας, συγκεκριμένα για τις ισοβαρικές επιφάνειες μεταξύ των 850mb (υψόμετρο ~1.460m) και 200mb (~11.800m). Επιπλέον, από μελέτες ραδιοβολίσεων που πραγματοποίησαν οι McBride και Zehr (1981) προέκυψε ότι για την δημιουργία τροπικής κυκλογένεσης πρέπει να εντοπίζονται και δύο γειτονικές περιοχές ως

προς το σύστημα, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ισχυρή κατακόρυφη διάτμηση ανέμου αντίθετου πρόσημου.

iv. Υψηλές θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας

Οι Palmen (1948) και Gray (1979) έδειξαν ότι στους θερμούς ωκεανούς με θερμοκρασίες επιφανειακών νερών μεγαλύτερες των 26°C για τα πρώτα 60m βάθος οι τροπικοί κυκλώνες σχηματίζονται και διατηρούνται, διότι η ενέργεια τους προέρχεται κυρίως από τις επιφανειακές ροές θερμότητας και υγρασίας της θάλασσας. Οι καταγραφές της θερμοκρασίας του επιφανειακού θαλασσινού νερού πραγματοποιούνταν παλαιότερα με δορυφορικά συστήματα εξοπλισμένα με όργανα υπερύθρων τα οποία απαιτούσαν ανέφελο ουρανό. Αντιθέτως, σήμερα πραγματοποιείται με διάφορους δορυφόρους που καταγράφουν το σήμα και διά μέσου των νεφών, έτσι μπορεί να εκτιμηθεί καλύτερα η μελλοντική τροχιά που θα διαγράψει ο τροπικός κυκλώνας, καθώς και αν ενισχυθεί ή αποδυναμωθεί (Gutro, 2003).

v. Μεγάλες τιμές σχετικής υγρασίας στην κατώτερη και μέση τροπόσφαιρα

Σύμφωνα με τον Gray (1979), τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης από τα οποία αποτελούνται οι τροπικοί κυκλώνες δεν σχηματίζονται όταν η σχετική υγρασία κυμαίνεται σε τιμές μικρότερες των 50-60% στην μέση τροπόσφαιρα (ισοβαρικές επιφάνειες 700-500mb). Αυτό συμβαίνει διότι, αν οι τιμές σχετικής υγρασίας είναι χαμηλές στην μέση τροπόσφαιρα τότε δεν ευνοείται η δημιουργία τροπικής κυκλογένεσης εξαιτίας των καθοδικών ρευμάτων αέρα που μεταφέρουν σχετικά ξηρότερο αέρα από την ανώτερη προς την κατώτερη τροπόσφαιρα, με αποτέλεσμα την μείωση της αστάθειας στην κατώτερη τροπόσφαιρα (Emanuel, 1993). Συμπεραίνοντας, η υψηλή τιμή σχετικής υγρασίας μεγαλύτερη του 50-60% στη μέση τροπόσφαιρα ευνοεί τη μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών και άρα την τροπική κυκλογένεση, για μεγάλο χρονικό διάστημα.

vi. Επαρκής κατακόρυφη αστάθεια μεταξύ της επιφάνειας (της θάλασσας) και της μέσης τροπόσφαιρας (500mb)

Η κατακόρυφη μεταβολή της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας (θ_e) επηρεάζει τον βαθμό αστάθειας και άρα την ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών

κατά την τροπική κυκλογένεση. Για να προκληθεί τροπική κυκλογένεση η μεταβολή της θε μεταξύ των δύο ισοβαρικών επιφανειών (επιφάνειας θάλασσας και 500mb) πρέπει να κυμαίνονται από 15 έως 20K, και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή αυτή τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το εποχιακό δυναμικό σχηματισμού των τροπικών κυκλώνων, (Gray, 1979). Επιπλέον, η μεταβολή της θε εξαρτάται από την υγρασία στη μέση τροπόσφαιρα (500mb), αλλά και την θερμοκρασία του νερού στην επιφάνεια της θάλασσας. Γενικά, η υψηλή σχετική υγρασία ευνοεί την τροπική κυκλογένεση και οι μεγαλύτερες μεταβολές της θε σχετίζονται με θερμότερα επιφανειακά νερά της θάλασσας.

Σύμφωνα με την Evans (2017), οι παραπάνω έξι παράμετροι μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: οι πρώτες τρεις παράμετροι (i., ii., iii.) χαρακτηρίζονται ως 'δυναμικές παράμετροι' και σχετίζονται με την ημερήσια πιθανότητα γένεσης τροπικών κυκλώνων, φανερώνοντας την ύπαρξη μιας ασθενούς αρχικής διαταραχής, (McBride and Zehr 1981). Αντίθετα, οι τελευταίες τρεις (iv., v., vi.) χαρακτηρίζονται ως 'θερμοδυναμικές παράμετροι', επηρεάζονται από εποχιακές μεταβολές και μεταβάλλονται αργά στο χρόνο.

1.3 Δομή τροπικών κυκλώνων

Ο Emanuel (1988) ανέφερε ότι, στους τροπικούς κυκλώνες ο άνεμος παρουσιάζει κυκλωνική ροή, αριστερόστροφα για το βόρειο ημισφαίριο και δεξιόστροφα για το νότιο, με ελικοειδής μορφή και σύγκλιση προς το κέντρο τους στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας, εξαιτίας της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του ανέμου και της επιφάνειας της Γης προκαλώντας τη στροφή του διανύσματος του ανέμου προς το κέντρο τους (Zehnder, 2023). Αντίθετα, παρουσιάζει αντικυκλωνική ροή στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας, προκαλώντας πλήρη νεφοκάλυψη από πυκνά νέφη cirrus (Emanuel, 1988).

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά που φανερώνουν την ύπαρξη ενός τροπικού κυκλώνα και συγκεκριμένα ενός κυκλώνα, είναι τα εξής, (Σχήμα 1.4):

- ***Το μάτι (eye)***

Εντοπίζεται στο κέντρο του κυκλώνα και αποτελεί το πιο ήρεμο τμήμα του. Πρόκειται για μία περιοχή με κυκλικό περίπου σχήμα (σε κάτοψη), διαμέτρου 32-64 km, που χαρακτηρίζεται από σχετικά αίθριες καιρικές συνθήκες (σε αντίθεση με τις περιοχές που την περιβάλλουν) και χαμηλή τιμή βαρομετρικής πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, χαρακτηρίζεται από ανέφελο ουρανό καθώς παρατηρούνται ασθενείς καθοδικοί άνεμοι με ταχύτητες μικρότερες των 24 km/h (ή 15mph), (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023). Επιπλέον, ο Zehnder (2023) ανέφερε ότι οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται στο εσωτερικό του ματιού είναι κατά περίπου 5.5°C υψηλότερες από ότι στις γύρω περιοχές. Αυτό οφείλεται στον αέρα που κατέρχεται από τα ανώτερα προς τα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας, διότι συμπιέζεται αδιαβατικά και θερμαίνεται. Επιπλέον, ο θερμότερος αέρας δικαιολογεί την παρουσία ανέφελου ουρανού, καθώς συγκρατεί μεγαλύτερο ποσοστό υδρατμών μέχρι να συμπυκνωθούν.

- ***Το τοίχωμα του ματιού (eyewall)***

Εντοπίζεται περιμετρικά του ματιού και χαρακτηρίζεται από ισχυρούς ανέμους και καταιγίδες. Πρόκειται για μια περιοχή σε σχήμα δακτυλίου, στην οποία εντοπίζονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου καθώς και νέφη που παρουσιάζουν τεράστια κατακόρυφη ανάπτυξη μέχρι σχεδόν την τροπόπαυση, σε υψόμετρο 15km (Zehnder, 2023).

Σύμφωνα με τον Zehnder (2023) οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου παρατηρούνται στο υψόμετρο των 300m, ενώ σε μικρότερα υψόμετρα οι άνεμοι εξασθενούν λόγω της δύναμης της τριβής που αναπτύσσεται από την επαφή του ανέμου με την επιφάνεια της Γης. Ομοίως, σε μεγαλύτερα υψόμετρα οι άνεμοι εξασθενούν, λόγω μείωσης της οριζόντιας βαροβαθμίδας. Αυτό οφείλεται στο

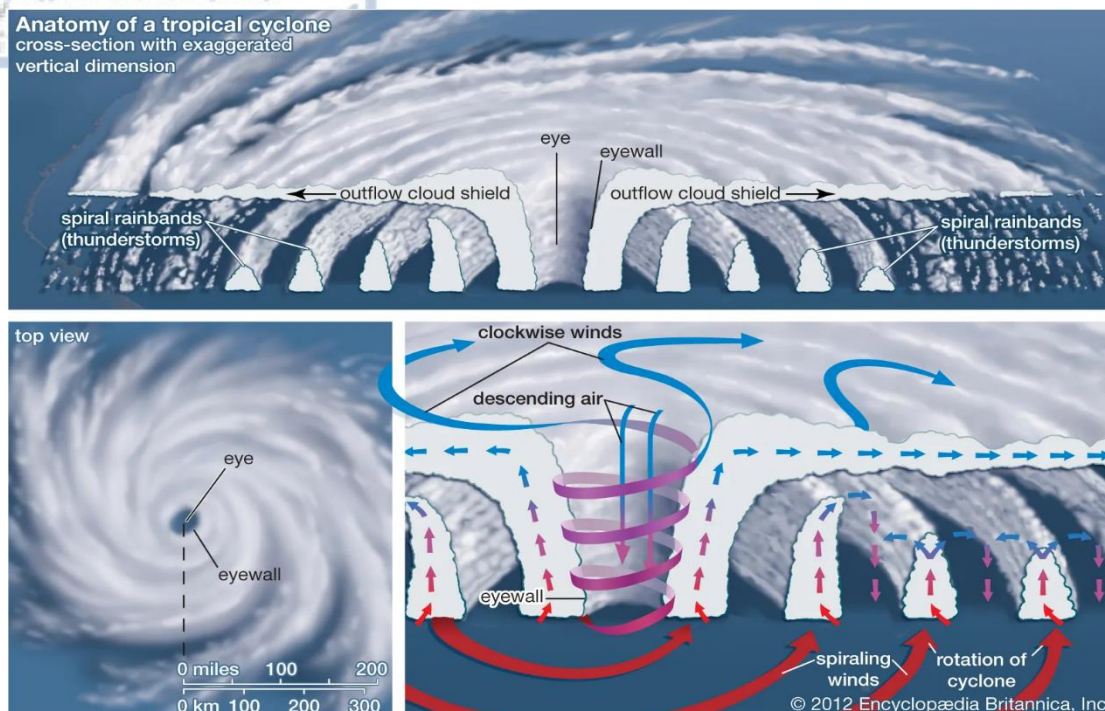
ότι τα συστήματα αυτά είναι θερμού πυρήνα και συνεπώς αποδυναμώνονται με το ύψος.

Οι διαστάσεις του ματιού επηρεάζονται από αλλαγές στη δομή του ματιού και του τοιχώματος του και έτσι προκαλούν μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου και την ένταση των καταιγίδων, (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023). Συγκεκριμένα, η διάμετρος του ματιού αυξάνεται με το ύψος, διότι στο τοίχωμα του ματιού ο άνεμος που κινείται ανοδικά, σχηματίζοντας μια ελικοειδή μορφή έχει σταθερή στροφορμή, η οποία επηρεάζεται από την ακτίνα της τροχιάς του και την ταχύτητα του ανέμου που παρατηρείται πάνω στην περιφέρεια που διαγράφει. Γνωρίζοντας ότι η ταχύτητα του ανέμου ελαττώνεται καθ' ύψος, τότε για να παραμείνει η στροφορμή σταθερή πρέπει να μεγαλώσει η ακτίνα, δηλαδή ο άνεμος να εντοπίζεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το κέντρο, επομένως οι διαστάσεις (διάμετρος) του ματιού μεγαλώνουν (Zehnder, 2023).

Έτσι, η περιοχή αυτή του τροπικού κυκλώνα χαρακτηρίζεται μέγιστης επικινδυνότητας από όλες τις απόψεις.

- **Ζώνες βροχής (rainbands)**

Πρόκειται για καμπύλες ζώνες από νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης σε συνδυασμό με ισχυρούς ανέμους. Οι ζώνες αυτές μοιάζουν να 'ξετυλίζονται' από το τοίχωμα του ματιού και να περιστρέφονται με ελικοειδή μορφή γύρω του, ενώ σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να παραμένουν ακίνητες ως προς το κέντρο του κυκλώνα (Zehnder 2023). Μεταξύ των ελικοειδών ζωνών συχνά παρατηρούνται περιοχές με απουσία ή ασθενείς βροχοπτώσεις και σχετικά ασθενείς ανέμους (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023).

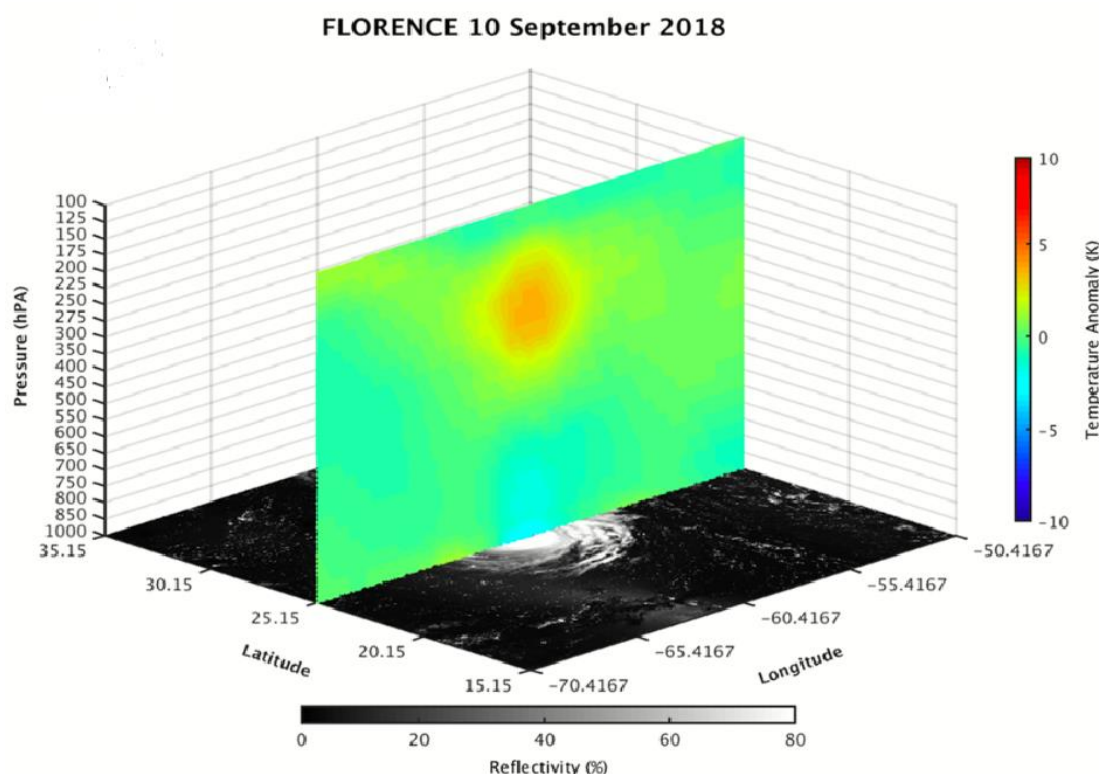


Σχήμα 1.4. Η ανατομία ενός κυκλώνα (Encyclopædia Britannica Inc. 2012).

Διακρίνονται τρία κύρια χαρακτηριστικά του: το μάτι, το τοίχωμα του ματιού και οι ζώνες βροχής. Η περιοχή του ματιού εντοπίζεται στο κέντρο του κυκλώνα, χαρακτηρίζεται από ανέμελο ουρανό και γίνεται ορατή η επιφάνεια της θάλασσας (σε κάτοψη), και επικρατούν ασθενείς καθοδικές ροές ανέμων. Η περιοχή του τοιχώματος του ματιού περικλείει το μάτι, χαρακτηρίζεται από νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης και ισχυρή ανοδική κυκλωνική (αριστερόστροφη για το βόρειο ημισφαίριο) ροή ανέμου μέχρι περίπου την τροπόπαυση, σχηματίζοντας εκεί μια 'ασπίδα' νεφών (cirrus) που επεκτείνεται και πλευρικά, λόγω της αντικυκλωνικής (δεξιόστροφης για το βόρειο ημισφαίριο) ροής που επικρατεί εκεί. Οι ζώνες βροχής, οι οποίες εναλλάσσονται από περιοχές με καθοδική ροή και απουσία καταιγίδων, επεκτείνονται από το τοίχωμα του ματιού προς την περιφέρεια του κυκλώνα με ελικοειδή μορφή και χαρακτηρίζονται από καταιγιδόφρα νέφη και ισχυρή κυκλωνική κυκλοφορία.

Οι κυκλώνες αποτελούν συστήματα με θερμό πυρήνα, καθώς όλες σχεδόν οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες που παρατηρούνται στο ατμοσφαιρικό τους περιβάλλον έχουν θετικές τιμές, κυρίως στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας που βρίσκονται πάνω από το κέντρο χαμηλής πίεσης, δηλαδή στην περιοχή του ματιού (Pytharoulis, 1999). Γενικότερα, οι μέγιστες θετικές θερμοκρασιακές ανωμαλίες προσεγγίζουν περίπου τους 15°C και παρατηρούνται στην ανώτερη τροπόσφαιρα μεταξύ των 250-300mb (Burpee, 1986, Pytharoulis, 1999), όπως παρατηρήθηκε στον κυκλώνα Χίλντα το 1964.

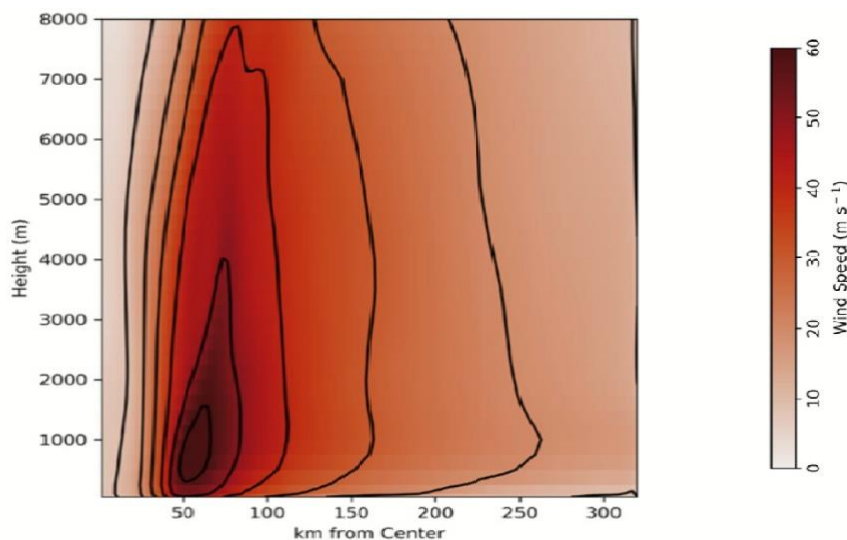
Συγκεκριμένα, για τον κυκλώνα Φλόρενς στις 10 Σεπτεμβρίου 2018 (17:17 UTC), αποτυπώνεται η κατακόρυφη δομή του θερμού πυρήνα μεταξύ των 500 και 150 hPa (Σχήμα 1.5), με την μέγιστη θετική θερμοκρασιακή ανωμαλία να είναι 7.64 K στα 250 hPa (Yan et al. 2020). Αντίθετα, στα χαμηλότερα επίπεδα της τροπόσφαιρας κάτω από τα 550 hPa, διακρίνονται αρνητικές τιμές θερμοκρασιακής ανωμαλίας, λόγω της εξάτμισης των βροχοσταγόνων και των μεγάλων νεφοσωματιδίων κατά τη διάρκεια των καταιγίδων, κυρίως στο τοίχωμα του ματιού (σχήμα 1.5). Αποτέλεσμα της συγκεκριμένης θερμοκρασιακής τους δομής (θερμού πυρήνα) σε συνδυασμό με την εξίσωση του θερμικού ανέμου, είναι η εμφάνιση μεγαλύτερων ταχυτήτων ανέμου στα κατώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας, κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (Pytharoulis, 1999).



Σχήμα 1.5. Παρουσιάζεται η κατακόρυφη διατομή των θερμοκρασιακών ανωμαλιών θερμού πυρήνα του κυκλώνα Φλόρενς κατά μήκος του γεωγραφικού πλάτους 22.15°Β, στις 10 Σεπτεμβρίου 2018 περίπου στις 17:17 UTC. Διακρίνεται ότι η κατακόρυφη ανάπτυξη του θερμού πυρήνα του κυκλώνα Φλόρενς η οποία εντοπίζεται περίπου μεταξύ των 500-150 hPa, με την μέγιστη θετική τιμή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας στα 7.64 K (Yan et al., 2020).

Επιπλέον, οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου εντοπίζονται κοντά στο κέντρο του κυκλώνα, στο τοίχωμα του ματιού, και μάλιστα πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, αλλά όχι ακριβώς πάνω της, εξαιτίας της δύναμης τριβής. Γενικότερα, οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου εντοπίζονται σε αποστάσεις περίπου 20-40 km από το κέντρο του κυκλώνα (Pytharoulis, 1999). Επιπλέον, όσο πιο ισχυρός είναι ένας κυκλώνας τόσο πιο κοντά στο κέντρο του μπορεί να εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές ανέμων και να ξεπεράσουν τα 80 m/s, φτάνοντας μόλις στα 12 Km απόσταση από το κέντρο τους και σε υψόμετρο 700mb, όπως συνέβη το 1988 στον κυκλώνα Γκίλμπερτ (Black and Willoughby 1992, Pytharoulis 1999).

Συγκεκριμένα, πάλι για τον κυκλώνα Φλόρενς στις 14 Σεπτεμβρίου 2018 (00:00 UTC), αποτυπώνεται η κατακόρυφη ακτινική διατομή με την εφαπτομενική συνιστώσα του ανέμου, από το κέντρο του κυκλώνα έως περίπου και 300 km κατά ακτινική απόσταση από αυτό (Σχήμα 1.6). Παρατηρείται ότι, οι μέγιστες τιμές εφαπτομενικού ανέμου εντοπίζονται περίπου σε ένα εύρος εντός 10 km, σε απόσταση μεταξύ 50 – 60 km από το κέντρο του (στο τοίχωμα του ματιού), με τις μέγιστες τιμές τους να είναι λίγο μεγαλύτερες από 60 m/s σε υψόμετρο περίπου από τα 300 έως 1000 m, (Zambon et al., 2021).



Σχήμα 1.6. Παρουσιάζεται η κατακόρυφη ακτινική διατομή της (μέσης) εφαπτομενικής συνιστώσας του ανέμου για τον κυκλώνα Φλόρενς στις 14 Σεπτεμβρίου 2018, 00:00 UTC. Οι τιμές ταχυτήτων του εφαπτομενικού ανέμου αποτυπώνονται στην κλίμακα (δεξιά) με τις διαφορετικές αποχρώσεις του κόκκινου, (από λευκό (0 m/s) έως σκούρο κόκκινο (60 m/s)), ενώ οι συμπαγείς μαύρες καμπύλες γραμμές αποτυπώνουν την ταχύτητα του ανέμου κάθε 10 m/s. Προέκυψε ότι, οι μέγιστες τιμές του εφαπτομενικού ανέμου ξεπερνούν τα 60 m/s και εντοπίζονται εντός της μικρότερης μαύρης συμπαγής κλειστής καμπύλης με σκούρο κόκκινο χρώμα, σε απόσταση ~50-60 Km από το κέντρο και σε υψόμετρο μεταξύ ~300-1.000 m από την επιφάνεια, (Zambon et al., 2021).

1.4 Σκοπός της εργασίας

Στην συγκεκριμένη προπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιείται αναφορά στους τροπικούς κυκλώνες (στον τροπικό βόρειο Ατλαντικό ωκεανό) που χαρακτηρίζονται ως κυκλώνες (hurricanes). Κύριος στόχος της εργασίας είναι η λεπτομερής αναφορά, περιγραφή και ανάλυση του κυκλώνα Λάουρα στον τροπικό βόρειο Ατλαντικό ωκεανό τον Αύγουστο του 2020.

Ο κυκλώνας Λάουρα (2020) επιλέχτηκε ως ο κυκλώνας μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνοντας υπόψη τις παρακάτω δύο ιδιαιτερότητες που παρουσιάζονται:

- I. Το συγκεκριμένο έτος 2020 παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον καθώς είναι η πιο ενεργή χρονιά εμφάνισης τροπικών κυκλώνων στον τροπικό βόρειο Ατλαντικό ωκεανό. Αναλυτικότερα, κατά το έτος αυτό εντοπίστηκαν τριάντα (30) τροπικοί κυκλώνες (τροπικές καταιγίδες και κυκλώνες, συνολικά), εκ των οποίων οι δεκατέσσερεις (14) χαρακτηρίστηκαν ως κυκλώνες (hurricanes) και οι επτά (7) ως ισχυροί κυκλώνες (major hurricanes). Αντίθετα, κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση εντοπίζονταν μόλις δώδεκα (12) τροπικοί κυκλώνες, έξι (6) κυκλώνες και τρεις (3) ισχυροί κυκλώνες (World Meteorological Organization 2020, Probst et al. 2021).

Επομένως, πρόκειται για το έτος (2020) με τους περισσότερους καταγεγραμμένους τροπικούς κυκλώνες (30) στον Βόρειο Ατλαντικό και το δεύτερο σε αριθμό κυκλώνων (14) μετά το 2005 με 15 κυκλώνες, σύμφωνα με το N.H.C. and C.P.H.C. (2023), World Meteorological Organization (2020). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι το 2020 είναι 2η μόνο χρονιά, μαζί με το 2005, στην οποία χρησιμοποιήθηκε και το ελληνικό αλφάβητο για να καλύψει την αυξημένη ζήτηση νέων ονομάτων (συγκεκριμένα μέχρι και το γράμμα 'γιώτα').

II. Ο κυκλώνας Λάουρα κατευθυνόμενος βόρειο-δυτικά εντός του κόλπου του Μεξικού, ενισχύθηκε κι έφτασε να χαρακτηρίζεται ως κυκλώνας κατηγορίας 4 και ήταν ένας από τους ισχυρότερους που έπληξαν ποτέ τις νότιο-ανατολικές ακτές των Η.Π.Α.. Οι καταστροφές που προκάλεσε εκτείνονται μέχρι τα νησιά της Καραϊβικής θάλασσας και ήταν πολυάριθμες. Μόνο για τις Η.Π.Α. οι καταστροφές υπολογίζονται σε 19 δισεκατομμύρια δολάρια Αμερικής, περισσότερα από οποιοδήποτε άλλο κυκλώνα για εκείνη την χρονιά (N.H.C, 2023), ενώ οι νεκροί που άφησε στο πέρασμα του ανέρχονται σε εκατοντάδες (Pasch et al., 2021).

2. Συνοπτικής Κλίμακας Ανάλυση

2.1 Δεδομένα και μεθοδολογία

Στη συγκεκριμένη εργασία για την ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα και πληροφορίες:

A. Αναφορές και επίσημα δεδομένα του Εθνικού Κέντρου Κυκλώνων της Αμερικής (National Hurricane Center). Οι πληροφορίες αυτές δίνονται ανά 6ωρο και καλύπτουν τη χρονική περίοδο από 20/08/2020 (00:00 UTC) έως 29/08/2020 (12:00 UTC). Περιέχουν σημαντικές πληροφορίες, όπως η θέση (ίχνος) του κέντρου του συστήματος κατά γεωγραφικό μήκος ($^{\circ}$ Δ) και γεωγραφικό πλάτος ($^{\circ}$ Β) με ακρίβεια ενός δεκαδικού (0.1°), η ελάχιστη ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας (mb), οι μέγιστες ταχύτητες μέσου ανέμου (knots), αλλά και τα διάφορα στάδια εξέλιξης του τροπικού κυκλώνα που χαρακτηρίστηκε ως τροπική διαταραχή, τροπική καταιγίδα και κυκλώνας στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα.

B. Επιπλέον, για την καλύτερη δυνατή ανάλυση και κατανόηση της τρισδιάστατης δομής του συστήματος και των μετεωρολογικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF). Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται ανά 6ωρο και καλύπτουν την χρονική περίοδο από 15/08/2020 (00:00 UTC) έως 31/08/2020 (18:00 UTC), σε πλέγμα σημείων με γεωγραφικό μήκος 0 - 120° Δ και γεωγραφικό πλάτος 0 - 60° Β, ανά 0.25° .

B1. Τα δεδομένα που αναφέρονται σε ένα μόνο επίπεδο (επιφάνεια θάλασσας) εμπεριέχουν τις παρακάτω τέσσερις μεταβλητές: οι δύο συνιστώσες οριζόντιου ανέμου (u: ανατολής-δύσης, v: βορρά-νότου) σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της Γης, από τις οποίες προκύπτει και το συνολικό μέγεθος του οριζόντιου ανέμου στα 10m (m/s), η ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας (Pa), η θερμοκρασία του νερού στην επιφάνεια της θάλασσας (K).

B2. Τα δεδομένα που αναφέρονται σε δεκαπέντε ισοβαρικές επιφάνειες (μεταξύ 1000 – 50 hPa) εμπεριέχουν τις παρακάτω επτά μεταβλητές: το ποσοστό νεφοκάλυψης, τη σχετική υγρασία (%), τις δύο συνιστώσες ανέμου (u και v), τον (σχετικό) στροβιλισμό (s^{-1}), την κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου ($Pa \cdot s^{-1}$), και το γεωδυναμικό ($m^2 \cdot s^{-2}$).

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διαχείριση, ανάλυση και οπτικοποίηση των διαθέσιμων τρισδιάστατων πλεγματικών δεδομένων (ERA5 του ECMWF) και την εξαγωγή χαρτών καιρού είναι το Grid Analysis and Display System (GrADS), έκδοση 2.2.1. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα σε πέντε διαστάσεις (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, ισοβαρικές επιφάνειες, χρόνος, μέλος στοχαστικής πρόγνωσης). Η οπτικοποίηση των δεδομένων γίνεται με πλήθος γραφικών μεθόδων, όπως γραφήματα γραμμών, στηλών, διανυσμάτων, εξομαλυσμένα και σκιασμένα περιγράμματα, κατακόρυφες ακτινικές διατομές, κ.α. Επιπλέον, τα δεδομένα μπορεί να επικαλύπτονται γραφικά με σωστή χώρο-χρονική κλίμακα. Το GrADS υποστηρίζει διάφορες μορφές αρχείων δεδομένων και στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δυαδικά (.dat) και GRIB (.CTL και .IDX) αρχεία δεδομένων.

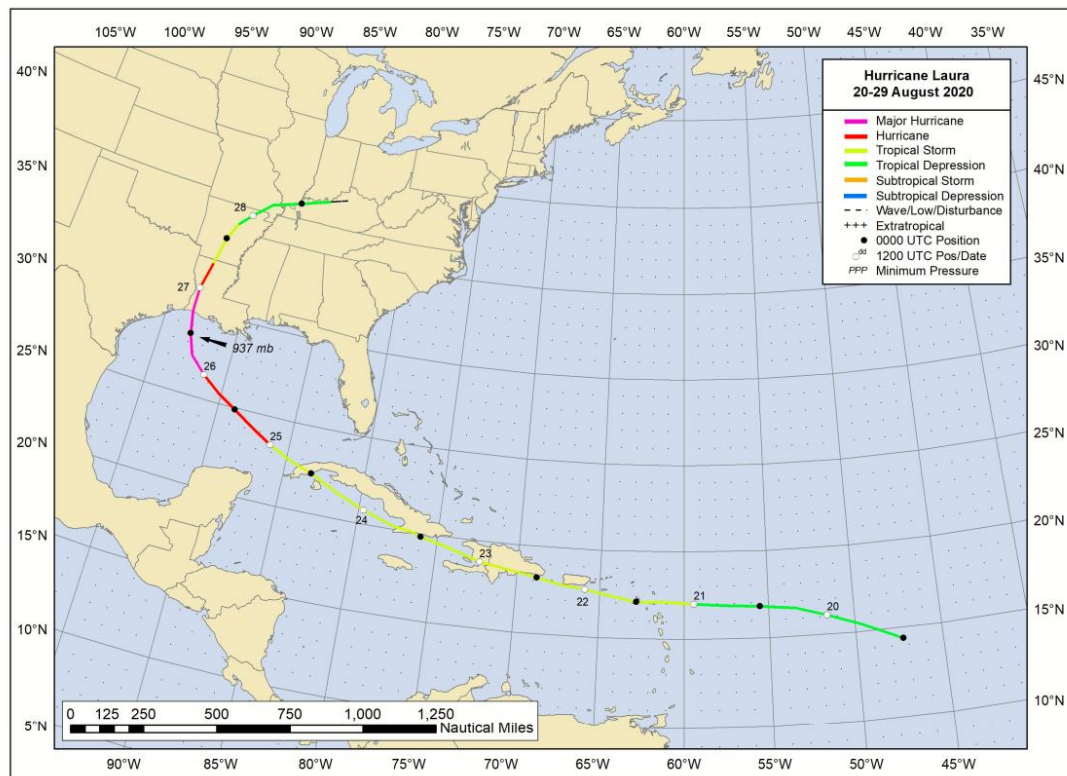
Γ. Δορυφορικές εικόνες ήταν διαθέσιμος από το Eumetrain eport pro. Τα δεδομένα προέρχονται από τον Γεωστατικό Επιχειρησιακό Περιβαλλοντικό Δορυφόρο (GOES EAST 16) που βρίσκεται στις 75.2° Δ και καλύπτει την περιοχή ανατολικά των Η.Π.Α. Παρέχει δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$) και χρονικής ανάλυσης (ανά 3ωρο) και περιέχει 16 φασματικές ζώνες (bands). Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία προέρχονται από τον GOES EAST 16 IR $10.3 \mu\text{m}$, που χρησιμοποιεί υπέρυθρο μήκος κύματος $10.3 \mu\text{m}$ (band-13), κατάλληλο για την ανίχνευση νεφών, και τον GOES EAST 16 IR $10.3 \mu\text{m}$ enhanced, που χρησιμοποιεί

υπέρυθρο μήκος κύματος 10.3 μm (band-13), κατάλληλο για την ανίχνευση μόνο καταιγιδοφόρων νεφών μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης διότι αποτυπώνει μόνο την ανώτερη επιφάνεια των νεφών με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Δ. Εκτιμήσεις υετού από δορυφορικές εικόνες της εφαρμογής Giovanni της NASA. Το Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) παρέχει προϊόντα κατακρημνισμάτων πολλών δορυφόρων για την ομάδα GPM των Η.Π.Α., ανά 30 λεπτά σε πλέγμα σημείων με γεωγραφικό μήκος $180^\circ \text{A} - 180^\circ \text{Δ}$ και γεωγραφικό πλάτος $90^\circ \text{N} - 90^\circ \text{B}$, ανά 0.1° , (GPM_3IMERGHH v06).

2.2 Συνοπτική ανάλυση

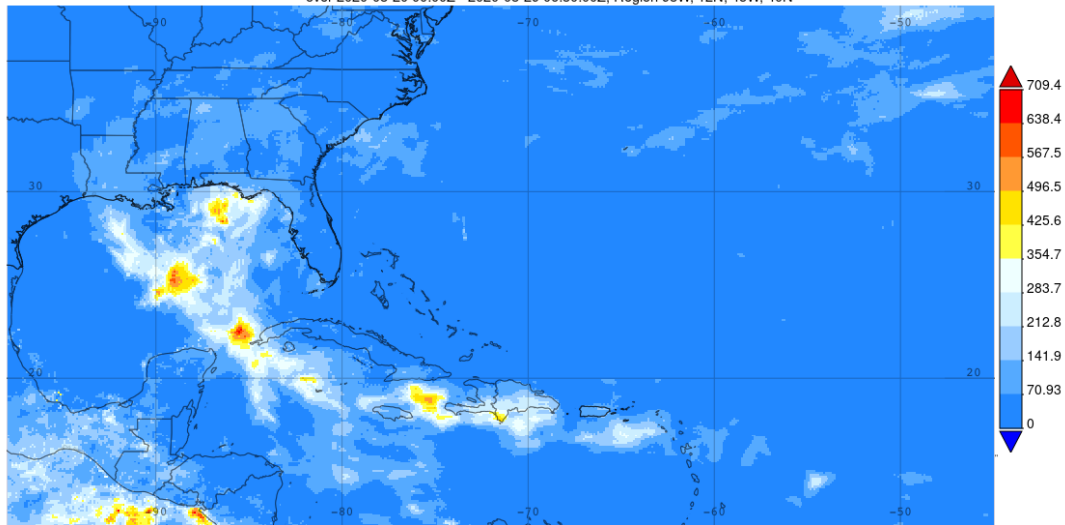
Η διαδρομή του τροπικού συστήματος που χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας Λάουρα κατηγορίας 4 μεταξύ 20 – 29 Αυγούστου 2020, αποτυπώνεται από τους Pasch et al. (2021), στο Σχήμα 2.1. Το σύστημα χαρακτηρίστηκε ως τροπική ύφεση πάνω από τον τροπικό Δ Ατλαντικό ωκεανό και διαγράφοντας ΔΒΔ τροχιά ενισχύθηκε και χαρακτηρίστηκε ως τροπική καταιγίδα Λάουρα. Συνέχισε να ενισχύεται διαγράφοντας ΔΒΔ τροχιά και χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας Λάουρα εντός του Κόλπου του Μεξικού, κατηγορίας 4. Έπειτα, ο κυκλώνας διαγράφοντας Β τροχιά αποδιοργανώθηκε και τελικά υποβαθμίστηκε σε τροπική καταιγίδα και τροπική ύφεση στην ενδοχώρα των Η.Π.Α. Επιπλέον, οι Eley et al. (2021) ανέφεραν ότι κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 20 – 27 Αυγούστου η μέση ταχύτητα μετατόπισης του συστήματος ήταν 8.58 m/s ή 16.68 kt, ενώ στο διάστημα που χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας ήταν 7.02 m/s ή 13.64 kt.



Σχήμα 2.1. Οι Pasch et al. (2021) παρουσίασαν την καλύτερη δυνατή τροχιά εξέλιξης του κυκλώνα Λάουρα μεταξύ 20 - 29 Αυγούστου ανά 12 ώρες. Τα διαφορετικά χρώματα στην καμπύλη τροχιάς αντιπροσωπεύουν τα στάδια εξέλιξης του συστήματος (τροπική ύφεση - κυκλώνας), ενώ οι μαύρες και λευκές κουκίδες αναφέρονται στις ώρες 00:00 και 12:00 UTC αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, χαρακτηρίζεται ως κυκλώνας (κόκκινο τμήμα καμπύλης) από τις 12:00 UTC της 25 Αυγούστου έως τις 18:00 UTC της 27 Αυγούστου.

Το σύστημα διασχίζοντας τον Ατλαντικό ωκεανό έδωσε κατά τόπους συνολικά πολύ μεγάλα ύψη βροχοπτώσεων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Pasch et al. (2021) για το χρονικό διάστημα μεταξύ 21 – 28 Αυγούστου το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης ήταν 298.2 mm (11.74 in) και καταγράφηκε στα ΝΔ της Πολιτείας Λουϊζιάνα στο Bear head Creek. Γενικότερα, αρκετές νότιες περιοχές των Η.Π.Α, κυρίως στην Πολιτεία Λουϊζιάνα κατέγραψαν μεγάλα ύψη βροχόπτωσης πάνω από 279.4 mm (11 in), αλλά και στην Πολιτεία Αρκάνσας καταγράφηκαν 281.94 mm (11.10 in) στο Moro Bay. Επίσης, περισσότερα από 279.4 mm (11 in) καταγράφηκαν και στην Δομινικανή Δημοκρατία κοντά στην χερσόνησο Barahona. Στο γειτονικό Πουέρτο Ρίκο μόνο μία περιοχή κατέγραψε περισσότερα από 127 mm (5 in) βροχής. Αντίστοιχα, ούτε στην Κούβα έπεσαν πολλά ύψη βροχής, τα περισσότερα ήταν 114.3 mm (4.5 in) στο δυτικό άκρο του νησιού (Σχήμα 2.2).

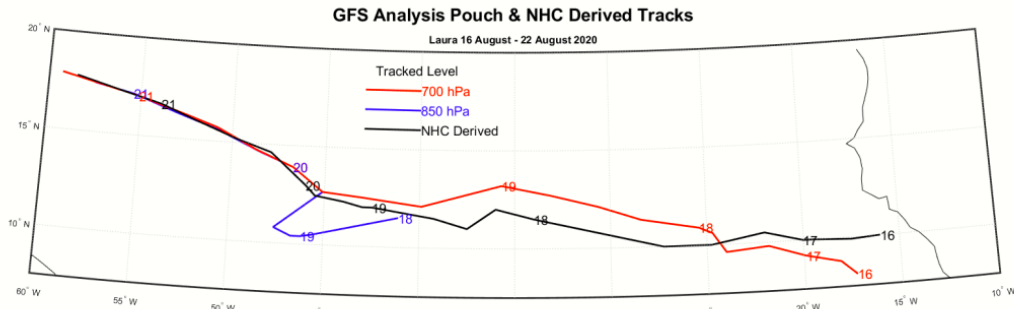
Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM
GPM_3IMERGHH v06] mm
over 2020-08-20 00:00Z - 2020-08-29 06:30:00Z, Region 98W, 12N, 45W, 40N



Σχήμα 2.2. Παρουσιάζονται τα καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχόπτωσης (mm) για μια χρονική περίοδο μεταξύ 00:00 UTC, 20 Αυγούστου – 06:30 UTC, 29 Αυγούστου 2020 (222.5 ώρες) στον ΒΔ Ατλαντικό ωκεανό μέσω της εφαρμογής Giovanni της NASA. Τα μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης αποτυπώνονται με ερυθρές αποχρώσεις και εντοπίζονται κυρίως πάνω από θαλάσσιες περιοχές, με το μέγιστο καταγεγραμμένο ύψος να προσεγγίζει περίπου τα 700 mm στα δυτικά της Κούβας.

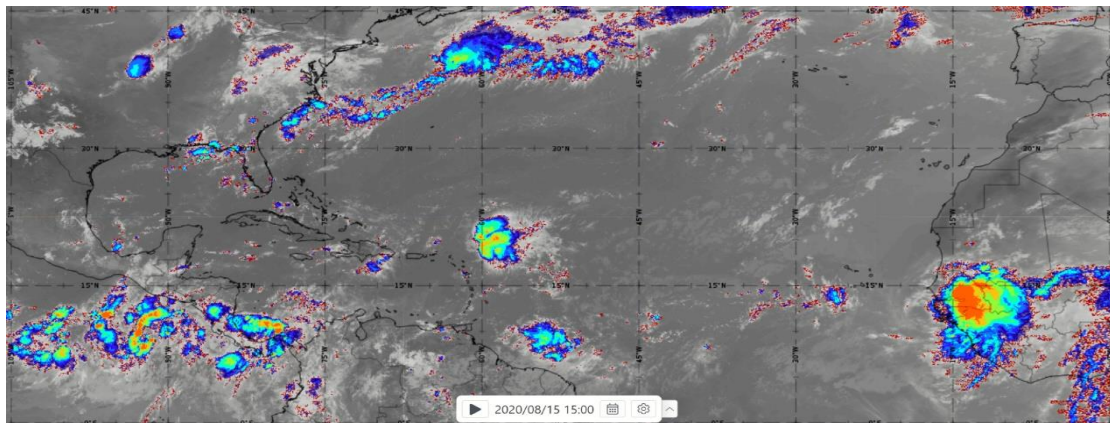
2.2.1 Α' Φάση: Συνοπτική ανάλυση προ-συστήματος Λάουρα: τροπική - διαταραχή – τροπική ύφεση

Σύμφωνα με τον Britton (2021), η παρουσία ενός Αφρικανικού ανατολικού κύματος (διαταραχή συνοπτικής κλίμακας) από την βόρειο-δυτική Αφρικανική ήπειρο ήταν αυτή που οδήγησε στην δημιουργία της τροπικής διαταραχής ανοιχτά των βόρειο-δυτικών ακτών της Αφρικής. Στο Σχήμα 2.3 αποτυπώνεται η τροχιά διαδρομής του συστήματος από τις 16 – 21 Αυγούστου 2020, όταν χαρακτηρίστηκε τροπική διαταραχή και τροπική ύφεση.

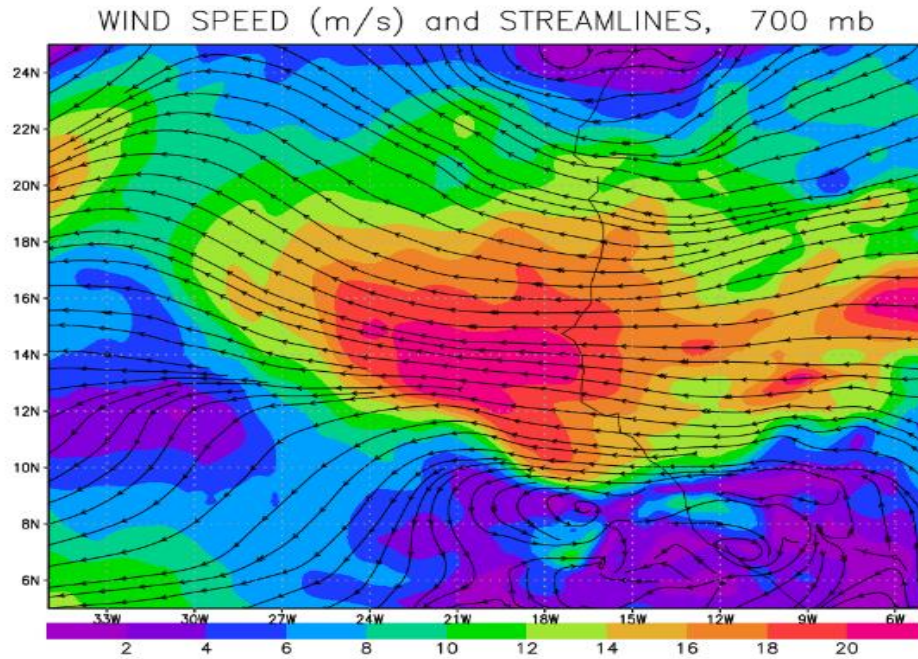


Σχήμα 2.3. Η τροχιά του τροπικού συστήματος μεταξύ 16 - 21 Αυγούστου 2020 στον τροπικό βόρειο ανατολικό Ατλαντικό ωκεανό. Απεικονίζεται η τροχιά σε δύο διαφορετικά επίπεδα, στα 700 hPa (κόκκινη καμπύλη) και στα 850 hPa (μπλε καμπύλη) με βάση το Παγκόσμιο Σύστημα Πρόβλεψης (GFS), καθώς και η τροχιά (μαύρη καμπύλη) με βάση το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων (NHC). Οι καμπύλες δεν συμπίπτουν μέχρι και τις 19 Αυγούστου και παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ 18-19 Αυγούστου, πιθανόν λόγω δυσκολίας ανάλυσης των τροπικών συστημάτων (Britton, 2021).

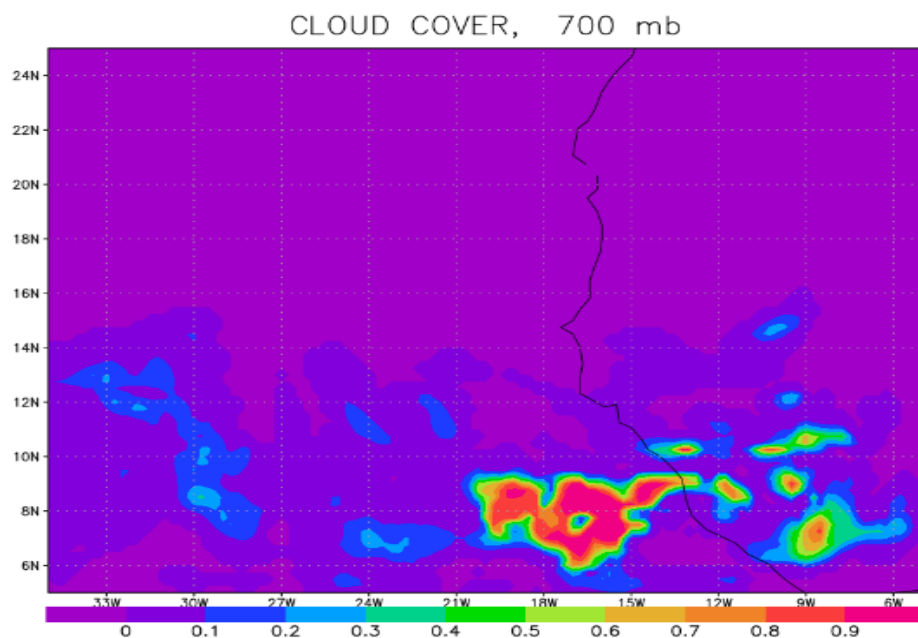
Πιο συγκεκριμένα, η αρχική διαταραχή (Αφρικανικό ανατολικό κύμα) από την οποία δημιουργήθηκε μετέπειτα ο κυκλώνας Λάουρα εντοπίστηκε στην ΒΔ Αφρική σε γεωγραφικό πλάτος περίπου 11° B (Σχήμα 2.4) και κατευθυνόμενη δυτικά υπό την επίδραση του Αφρικανικού Ανατολικού Αεροχείμαρρου στην κατώτερη τροπόσφαιρα, 700 mb (Σχήμα 2.5), έφτασε στα ανοιχτά των δυτικών βόρειων ακτών της Αφρικής στις 16 Αυγούστου 2020 (Σχήμα 2.6). Στην περιοχή αυτή, εντοπίζεται μία εκτεταμένη τροπική διαταραχή με διάσπαρτα κύτταρα κατακόρυφης ανάπτυξης νεφών και αρκετούς άξονες αυλώνων στην μέση τροπόσφαιρα, στα 700mb (Britton, 2021).



Σχήμα 2.4. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR $10.3 \mu\text{m}$ (enhanced) στις 15:00 UTC, 15 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται το Αφρικανικό ανατολικό κύμα πάνω από την βόρειο-δυτική Αφρική και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος $10-15^{\circ}$ Δ και γεωγραφικό πλάτος $10-15^{\circ}$ Β.

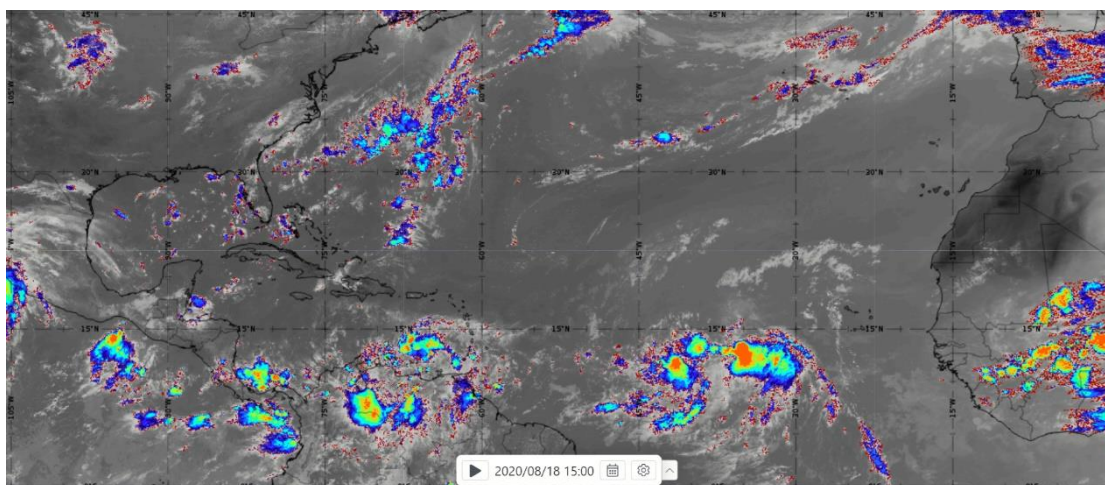


Σχήμα 2.5. Απεικονίζεται ο τροπικός ΒΑ Ατλαντικός ωκεανός στις 12:00 UTC, 16 Αυγούστου 2020, στα 700 mb. Διακρίνονται οι ταχύτητες ανέμου με χρωματική κλίμακα (ανά 2 m/s) και οι ρευματογραμμές με συμπαγείς μαύρες καμπύλες. Στην περιοχή με ερυθρές αποχρώσεις όπου εντοπίζονται οι μέγιστες ταχύτητες > 20 m/s και οι ρευματογραμμές συγκλίνουν εντοπίζεται ο Αφρικανικός ανατολικός αεροχείμαρρος, μεταξύ $10-15^\circ$ B.

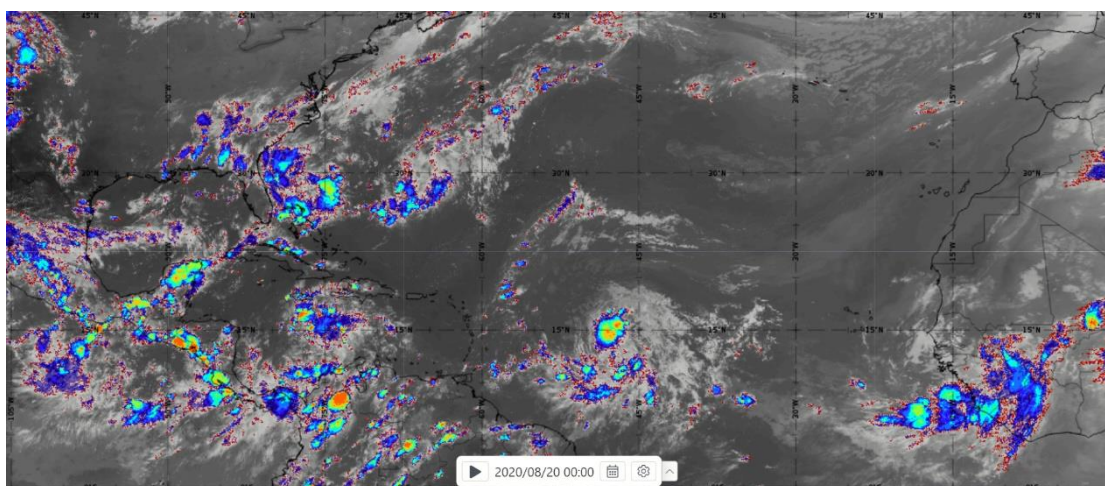


Σχήμα 2.6. Απεικονίζεται ο τροπικός ΒΑ Ατλαντικός ωκεανός στις 12:00 UTC, 16 Αυγούστου 2020, στα 700 mb. Διακρίνεται το ποσό νεφοκάλυψης (0-1) με χρωματική κλίμακα (ανά 0.1). Στην περιοχή με ερυθρές αποχρώσεις που χαρακτηρίζεται από πλήρη νεφοκάλυψη (1) εντοπίζεται το Αφρικανικό ανατολικό κύμα, μεταξύ $6-9^\circ$ B.

Στη συνέχεια, το σύστημα απομακρύνθηκε περαιτέρω από τις ακτές της Αφρικής, μετατοπίστηκε δυτικότερα (Σχήμα 2.7) και βρέθηκε κατά την 18^η Αυγούστου σε περιοχή χαμηλής βαρομετρικής πίεσης και παρουσίασε καλά οργανωμένη κυκλωνική κυκλοφορία ανέμων στην κατώτερη τροπόσφαιρα με νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης. Τελικά, στις 20 Αυγούστου 00:00 UTC το σύστημα αναβαθμίστηκε από τροπική διαταραχή σε τροπική ύφεση (Σχήμα 2.8) (Pasch et al., 2021).

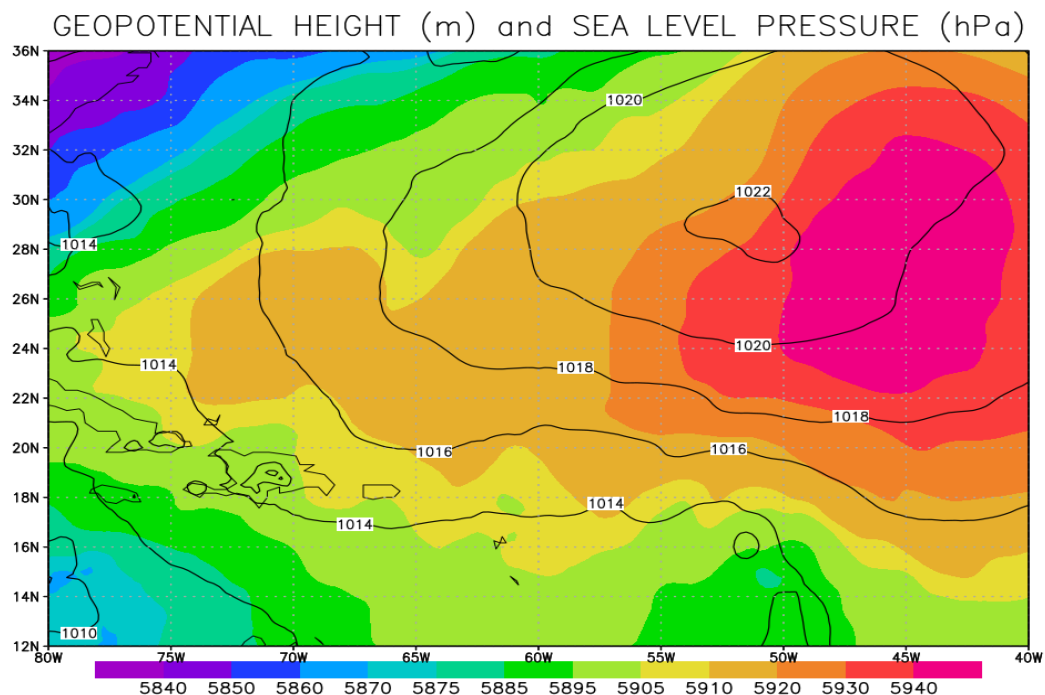


Σχήμα 2.7. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 15:00 UTC, 18 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται η τροπική διαταραχή πάνω από τον βόρειο-δυτικό Ατλαντικό ωκεανό και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος 20-40° Δ και γεωγραφικό πλάτος 10-14° Β.



Σχήμα 2.8. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 00:00 UTC, 20 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται η τροπική ύφεση πάνω από τον βόρειο Ατλαντικό ωκεανό και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος 46-49° Δ και γεωγραφικό πλάτος 13-16° Β.

Κατά τις 20 Αυγούστου, η τροχιά κίνησης του συστήματος μετατράπηκε από ΔΒΔ σε Δ εξαιτίας μιας υποτροπικής ράχης (ridge) και των υψηλών πιέσεων που βρισκόταν στα βόρεια της τροπικής ύφεσης και διακρίνεται από μεγάλα γεωδυναμικά ύψη στη μέση τροπόσφαιρα (σχήμα 2.9). Το σύστημα ανά διαστήματα δεν παρουσίαζε την ίδια καλή οργάνωση πιθανόν λόγω μιας ΝΑ διάτμησης ανέμου στη μέση τροπόσφαιρα (Pasch et al., 2021).



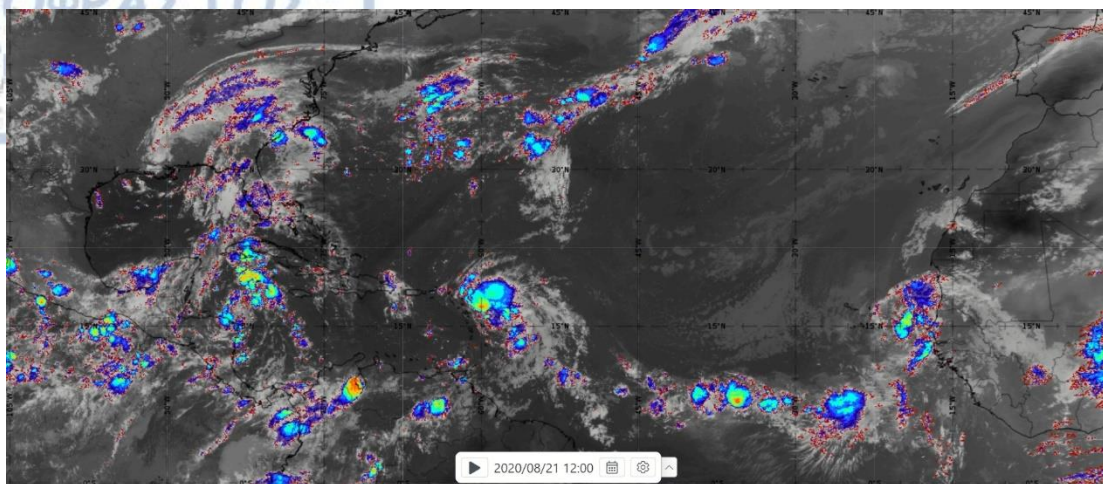
Σχήμα 2.9 Απεικονίζονται τα γεωδυναμικά ύψη με χρωματική κλίμακα (ανά 10 gpm), στα 500 mb, και η βαρομετρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας με ισοβαρείς καμπύλες (ανά 2 hPa), στις 12:00 UTC, 20 Αυγούστου 2020.

Στο Σχήμα 2.9, στις 12:00 UTC της 20 Αυγούστου 2020 διακρίνεται η τροπική ύφεση με ελάχιστη βαρομετρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας μικρότερη των 1012 hPa και εντοπίζεται σε περιοχή που περικλείεται από την κλειστή ισοβαρική καμπύλη των 1012 hPa, περίπου στις 51.5° Δ και 16° Β (με το οποίο συμφωνούν οι Pasch et al., 2021). Βορειότερα του συστήματος, διακρίνεται μια υποτροπική ράχη (στα 500 mb) με μεγάλα γεωδυναμικά ύψη που ξεπερνούν τα 5.940 m ύψος. Η ράχη αυτή σχετίζεται με τις υψηλές πιέσεις στην μέση στάθμη θάλασσας του βαρομετρικού υψηλού των Αζορών. Επιπλέον, η ράχη προκαλεί αντικυκλωνική (δεξιόστροφη) ροή ανέμων και μετατοπίζει την τροπική ύφεση προς τα δυτικά.

Επομένως, το σύστημα ενισχύθηκε πάνω από τον ανατολικό βόρειο τροπικό Ατλαντικό ωκεανό μεταξύ 16^{ης} - 19^{ης} Αυγούστου 2020 λόγω ευνοϊκών ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούσαν στην ευρύτερη περιοχή. Επιπλέον, η Ενδοτροπική Ζώνη Σύγκλισης των αληγών ανέμων βρέθηκε βορειότερα από ότι συνήθως, με αποτέλεσμα να τροφοδοτεί την ατμόσφαιρα με επαρκεί ποσά σχετικής υγρασίας προκαλώντας γενικευμένη κυκλογένεση. Τέλος, η παρουσία ενός αυλώνα μεσημβρινής ανάπτυξης (~ 42° Δ) μεταξύ των υποτροπικών ράχων και αρκετών μικρότερων αυλώνων περίπου κατά μήκος των 11° Β, προκάλεσαν τα διάσπαρτα κύτταρα νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (Britton, 2021).

2.2.2 Β' Φάση: Συνοπτική ανάλυση συστήματος Λάουρα: τροπική καταιγίδα – κυκλώνας

Σύμφωνα με τους Pasch et al. (2021) στις 12:00 UTC της 21 Αυγούστου το σύστημα ενισχύθηκε και το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων Αμερικής (N.H.C.) το αναβάθμισε σε τροπική καταιγίδα Λάουρα στις 17.0° Β, 59.4° Δ (Σχήμα 2.10), με μέγιστες τιμές μέσων ανέμων να προσεγγίζουν τους 40 kt (Σχήμα 2.11α). Η ενίσχυση του συστήματος ήταν βραχυπρόθεσμη καθώς κινούμενο προς δυτικά και φτάνοντας βόρεια των ανατολικών νησιών της Καραϊβικής παρουσίασε αποδιοργάνωση. Την επόμενη μέρα, στις 12:00 UTC της 22 Αυγούστου το σύστημα εντοπίστηκε στις 17.7°Β, 65.9°Δ και κατευθυνόμενο ΔΒΔ πέρασε νότια των Αμερικανικών Παρθένων Νήσων και του Πουέρτο Ρίκο όπου ξανά ενισχύθηκε με μέγιστες τιμές μέσων ανέμων να προσεγγίζουν τους 45 kt (Σχήμα 2.11β). Η τροπική καταιγίδα συνέχισε να κατευθύνεται ΔΒΔ με σταθερούς ανέμους (45 kt) και έφτασε στην νότια ακτή της Δομινικανής Δημοκρατίας στις 00:00 UTC της 23 Αυγούστου στις 18.2°Β, 68.8°Δ (Σχήμα 2.11γ), και λίγες ώρες αργότερα την Αϊτή.



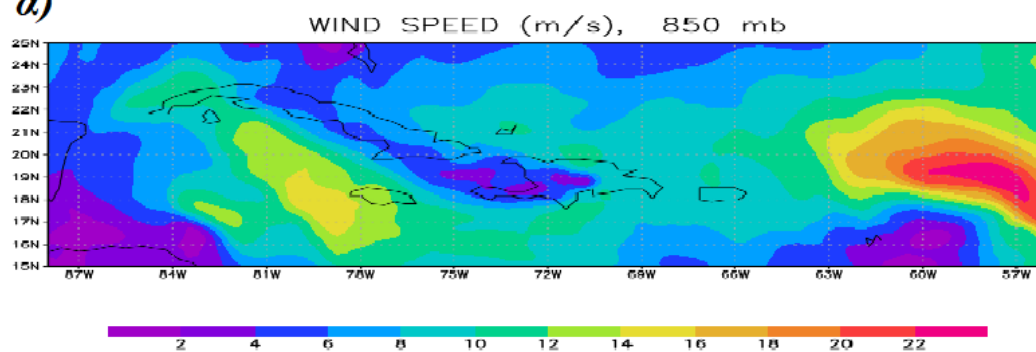
Σχήμα 2.10. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 12:00 UTC, 21 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται η τροπική καταιγίδα Λάουρα πάνω από τον βόρειο-ανατολικό Ατλαντικό ωκεανό και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος 58-61° Δ και γεωγραφικό πλάτος 16.5-19.5° Β.

Στη συνέχεια, το σύστημα πέρασε συνολικά δύο φορές πάνω από την χερσαία Κούβα, 1^η φορά πάνω από την ανατολική και 2^η φορά από τη δυτική Κούβα, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, (Eley et al., 2021):

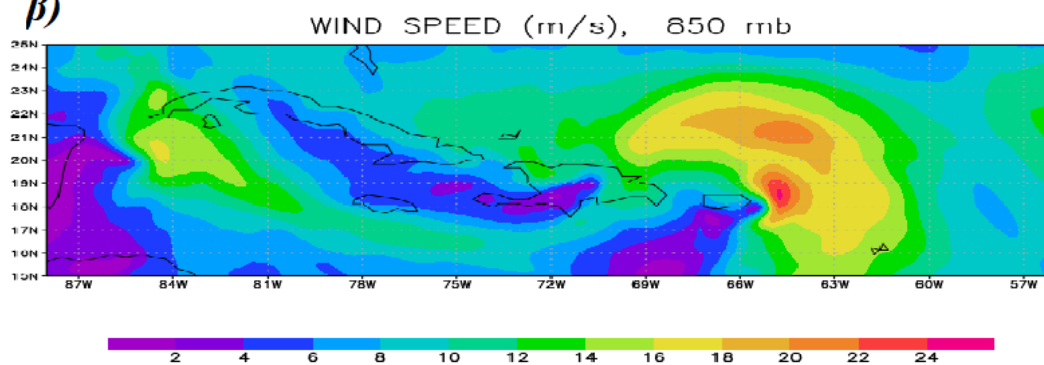
1^η φορά: Κατά τις νυχτερινές ώρες, στις 00:00 UTC της 24 Αυγούστου εντοπίστηκε στις 19.8°B, 76.0°Δ στα νοτιότερα τμήματα της ανατολικής Κούβας με μικρή ενίσχυση ανέμων προσεγγίζοντας τους 55 kt (Σχήμα 2.11δ). Κατά την διάρκεια της ίδιας μέρας κινήθηκε προς ΔΒΔ παράλληλα με τις νότιες ακτές της Κούβας μέχρι και αργά το βράδυ (Pasch et al., 2021).

2^η φορά: Κατά τις νυχτερινές ώρες, στις 00:00 UTC της 25 Αυγούστου εντοπίστηκε στις 22.3°B, 83.3°Δ στην δυτική Κούβα με αντίστοιχες ταχύτητες ανέμων περίπου 55 kt (Pasch et al., 2021). Επομένως, το σύστημα εντοπίστηκε δύο φορές πάνω από την χερσαία Κούβα.

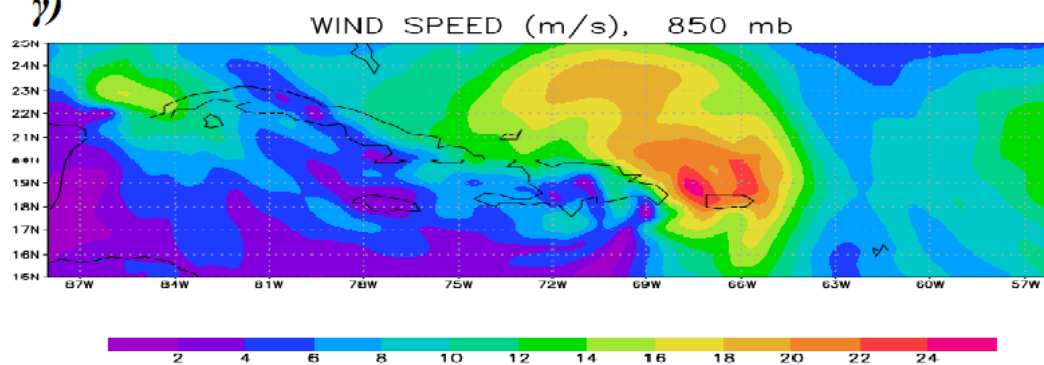
α)



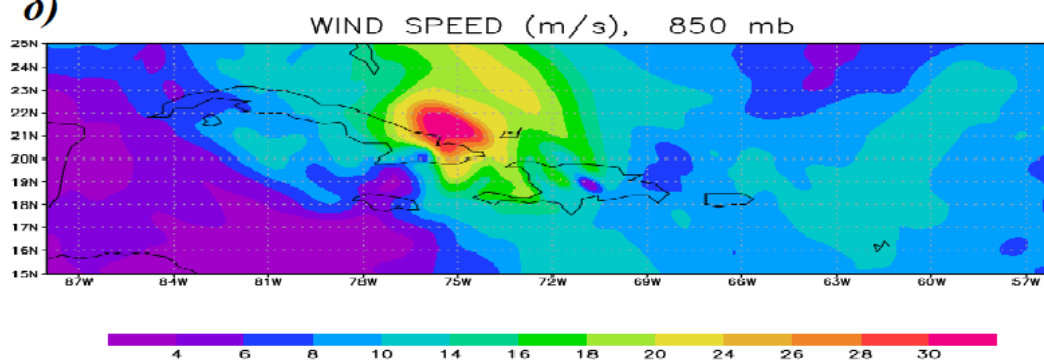
β)



γ)

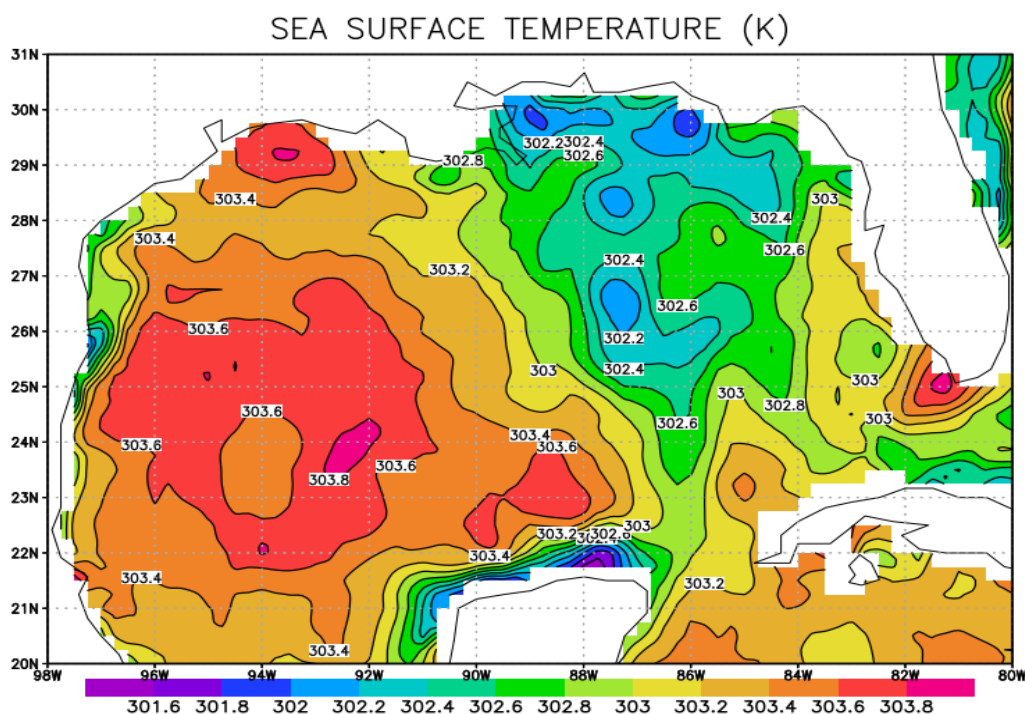


δ)



Σχήμα 2.11. Παρουσιάζεται η ταχύτητα ανέμου με χρωματική κλίμακα ανά 2 m/s στα 850 mb πάνω από τον ΒΔ Ατλαντικό ωκεανό (βόρεια Καραϊβική θάλασσα) σε 4 διαφορετικές χρονικές στιγμές: α) 12:00 UTC, 21 Αυγούστου 2020, β) 12:00 UTC, 22 Αυγούστου 2020, γ) 00:00 UTC, 23 Αυγούστου 2020, δ) 00:00 UTC, 24 Αυγούστου 2020. Διακρίνεται η ΔΒΔ μετατόπιση της τροπικής καταιγίδας Λάουρα με σταδιακή ενίσχυση ανέμων.

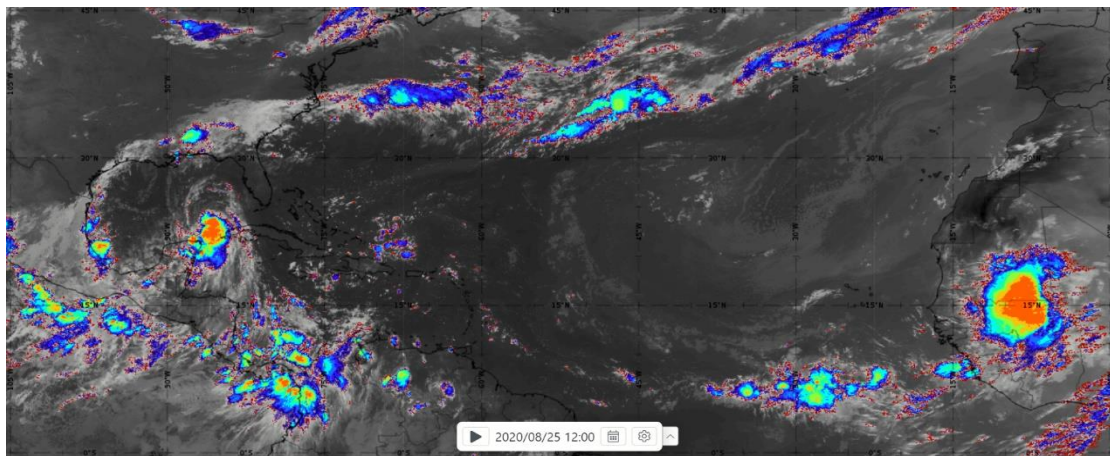
Το σύστημα καθώς απομακρυνόταν από τη δυτική Κούβα συνέχισε να διαγράφει ΔΒΔ τροχιά και κατευθύνθηκε προς τον Κόλπο του Μεξικού από τα ΝΑ του. Εντός του Κόλπου ενισχύθηκε σημαντικά, λόγω θερμότερων επιφανειακών θαλάσσιων νερών περίπου στις 06:00 UTC της 25 Αυγούστου (Σχήμα 2.12), σε συμφωνία με τους Pasch et al. (2021).



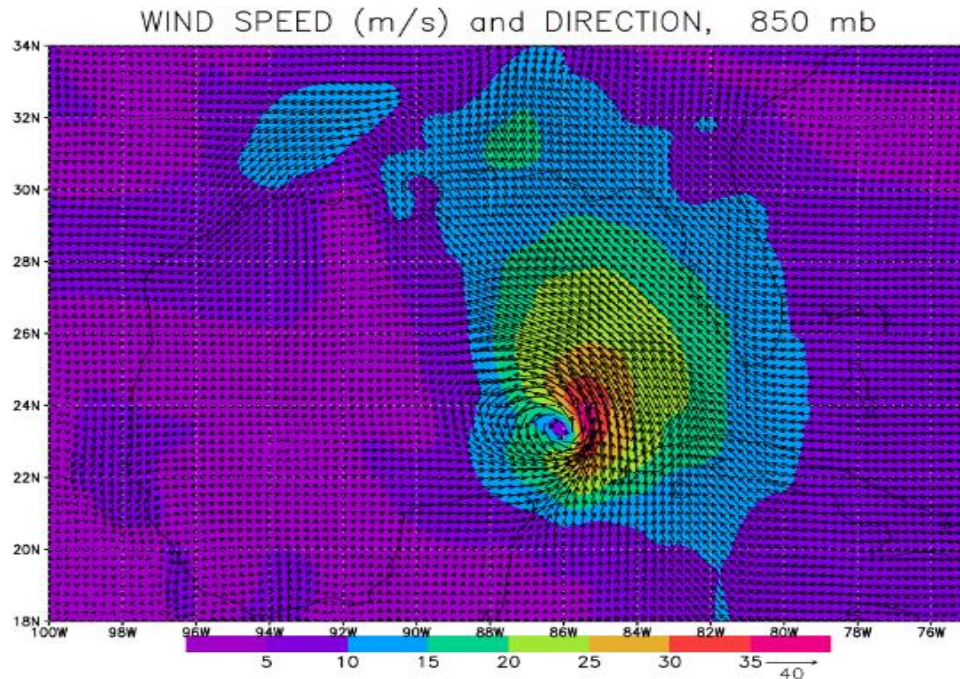
Σχήμα 2.12. Παρουσιάζεται η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας στον κόλπο του Μεξικού με χρωματική κλίμακα ανά 0.2 K, στις 06:00 UTC της 25 Αυγούστου 2020. Οι θερμοκρασίες των επιφανειακών νερών κυμαίνονται μεταξύ 301.4 – 304.0 K (28.3 – 30.9 °C) και είναι πολύ ευνοϊκές για να ενισχυθεί περαιτέρω το σύστημα.

Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζονται οι επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας στον Κόλπο του Μεξικού και κυμαίνονται μεταξύ 28.3 – 30.9 °C . Οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα υψηλές και ευνοϊκές (>26 °C), ώστε το σύστημα να ενισχυθεί περαιτέρω σε κυκλώνας.

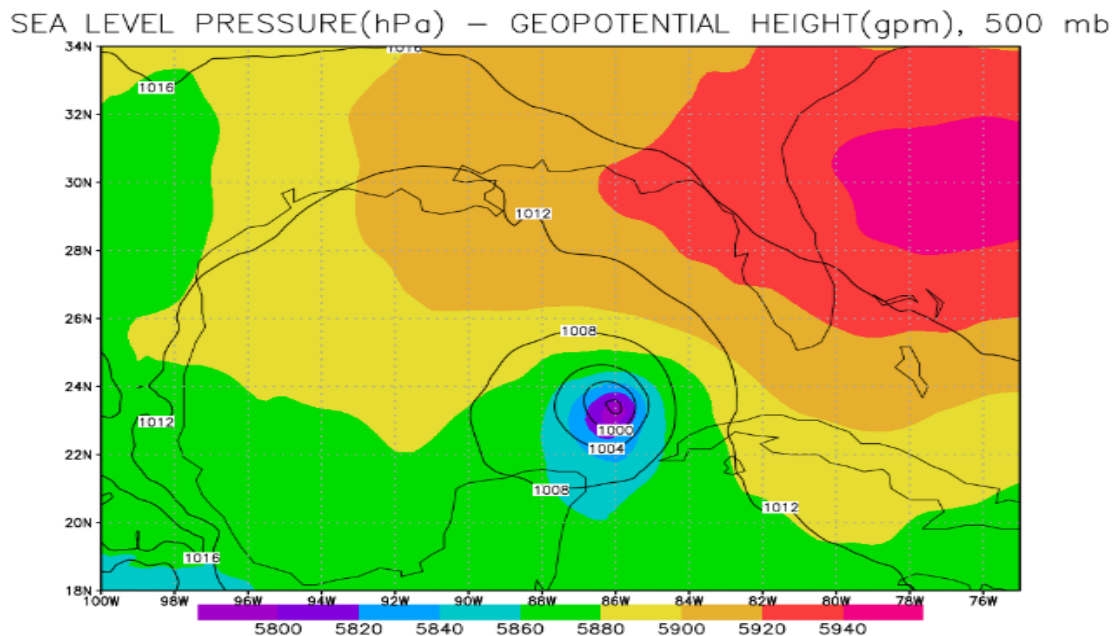
Λίγες ώρες αργότερα, στις 12:00 UTC της 25 Αυγούστου η τροπική καταιγίδα ενισχύθηκε περαιτέρω και αναβαθμίστηκε τελικά σε κυκλώνα στις 23.4° B, 86.2° Δ (Σχήμα 2.13), με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου να προσεγγίζει τους 65 kt και ελάχιστη βαρομετρική πίεση περίπου 990mb (Σχήμα 2.14 και 2.15). Συνέχισε να κατευθύνεται με πιο αργό ρυθμό (~ 15 kt) ΔΒΔ κατά μήκος του νότιο-δυτικού ορίου της ράχης (ridge) που επεκτεινόταν μέχρι τη βόρεια Φλόριντα (Σχήμα 2.15), (Pasch et al., 2021).



Σχήμα 2.13. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR $10.3 \mu\text{m}$ (enhanced) στις 12:00 UTC, 25 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται ο κυκλώνας Λάουρα πάνω από τον ΝΔ Κόλπο του Μεξικού και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος $84-87^{\circ}$ Δ και γεωγραφικό πλάτος $22-25^{\circ}$ Β.

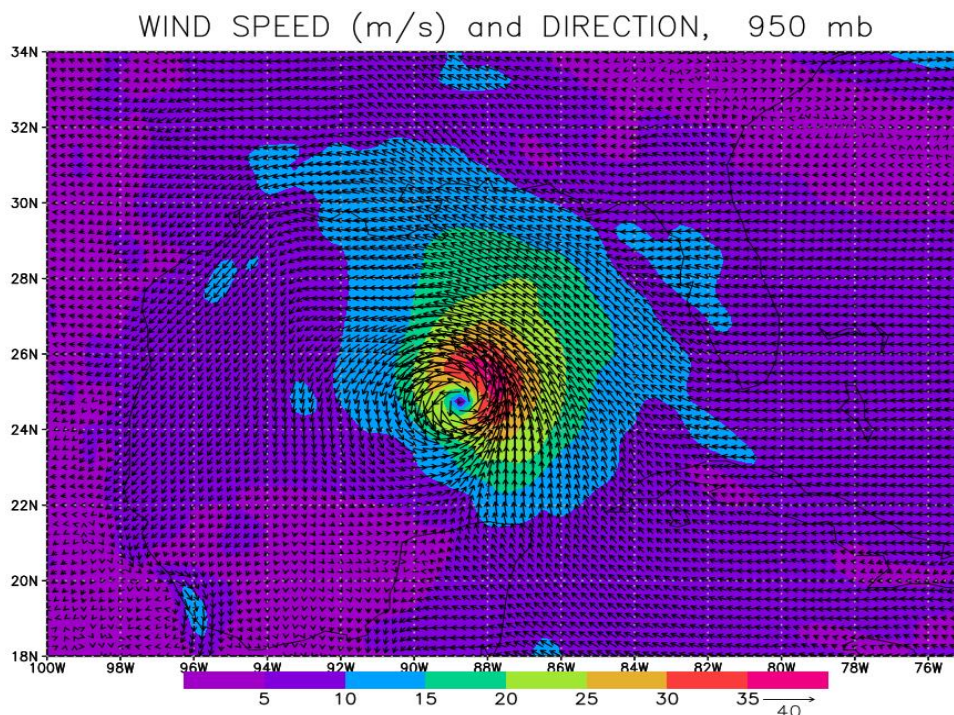


Σχήμα 2.14.. Απεικονίζεται ο κυκλώνας Λάουρα στον κόλπο του Μεξικού στις 12:00 UTC, 25 Αυγούστου 2020. Διακρίνονται η ταχύτητα ανέμου με χρωματική κλίμακα ανά 5 m/s και η κατεύθυνση ανέμου με (μαύρα) διανύσματα, στα 850 mb. Η μέγιστη τιμή είναι περίπου 35 m/s (68 kt), στο τοίχωμα ματιού.



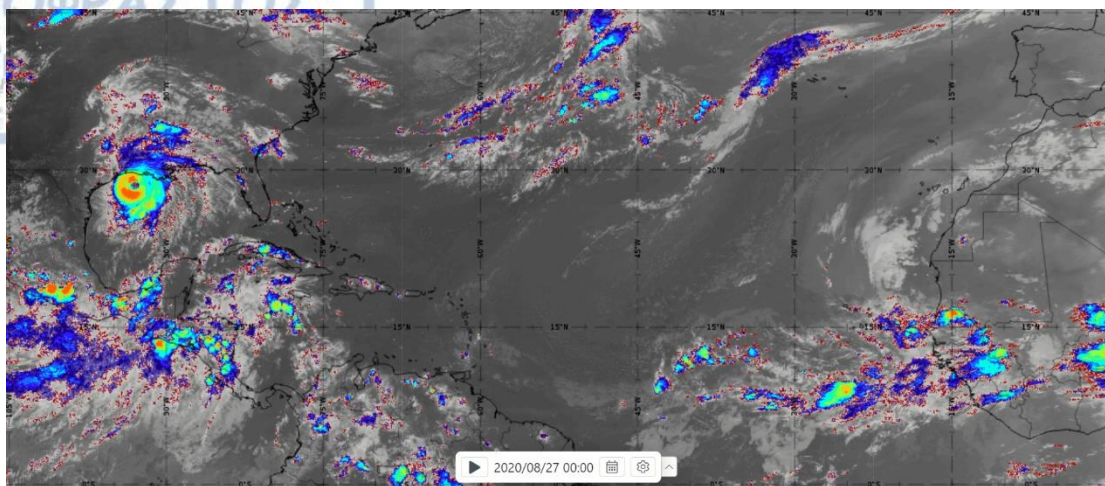
Σχήμα 2.15. Απεικονίζεται ο κυκλώνας Λάουρα στον κόλπο του Μεξικού στις 12:00 UTC, 25 Αυγούστου 2020. Διακρίνονται η βαρομετρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας με ισοβαρείς καμπύλες ανά 4 hPa και ελάχιστη τιμή περίπου 995 mb, και τα γεωδυναμικά ύψη της επιφάνειας των 500 mb με χρωματική κλίμακα ανά 20 gpm.

Στη συνέχεια, στις 00:00 UTC της 26 Αυγούστου παρατηρήθηκε πολύ καλή οργάνωση στην κατώτερη τροπόσφαιρα και ενίσχυση των μέγιστων τιμών μέσου ανέμου προσεγγίζοντας τους 75 kt (Σχήμα 2.16). Πλέον, ο κυκλώνας Λάουρα εντοπίζεται πάνω από μια θαλάσσια περιοχή με ευνοϊκές ατμοσφαιρικές συνθήκες και σε συνδυασμό με τα θερμά θαλάσσια νερά του Κόλπου παρουσίασε γρήγορη ανάπτυξη με τους ανέμους να αυξάνονται κατά 55 Kt σε ένα 24ωρο και αναβαθμίστηκε από κατηγορίας 1 σε 4 (Eley et al., 2021, Pasch et al., 2021). Συνέχισε να κατευθύνεται πλέον προς τα ΒΔ και αργότερα προς τα Β, λόγω ενός βαρομετρικού χαμηλού στην μέση τροπόσφαιρα στην πολιτεία της Οκλαχόμα.



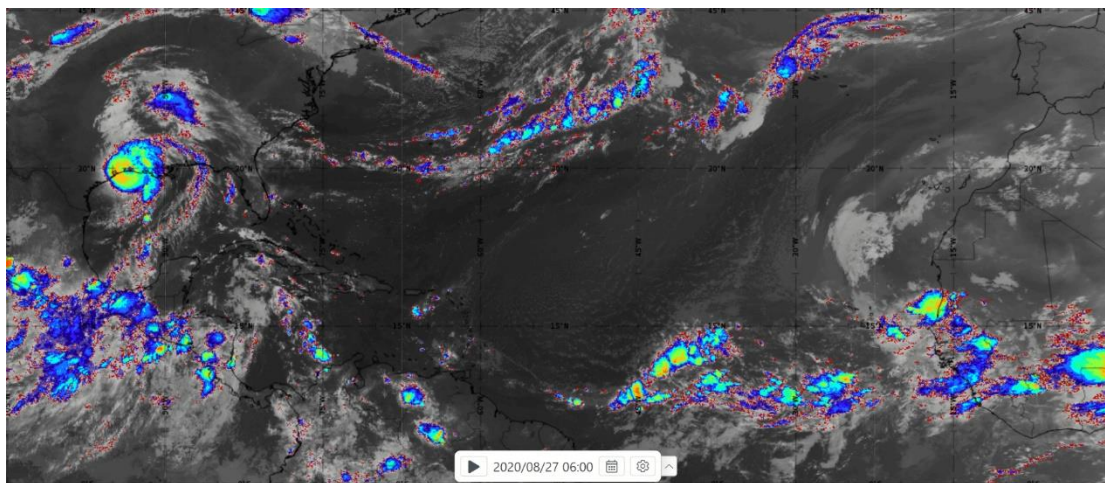
Σχήμα 2.16. Απεικονίζεται ο κυκλώνας Λάουρα στον κόλπο του Μεξικού στις 00:00 UTC, 26 Αυγούστου 2020, στα 950 mb. Διακρίνονται η ταχύτητα ανέμου με χρωματική κλίμακα ανά 5 m/s και η κατεύθυνση ανέμου με (μαύρα) διανύσματα. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου είναι περίπου 37 m/s ή 72 kt.

Σύμφωνα με τους Pasch et al. (2021), ο κυκλώνας Λάουρα ενισχύθηκε και έφτασε τη μέγιστη ένταση στις 00:00 UTC την 27 Αυγούστου στις 28.5°B, 93.0°Δ (Σχήμα 2.17), με μέγιστες τιμές μέσου ανέμου στους 130 kt και ελάχιστη βαρομετρική πίεση στο κέντρο του ματιού μόλις 937 mb. Έτσι χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας κατηγορίας 4 (λεπτομερής ανάλυση γίνεται στο επόμενο Κεφάλαιο 4).



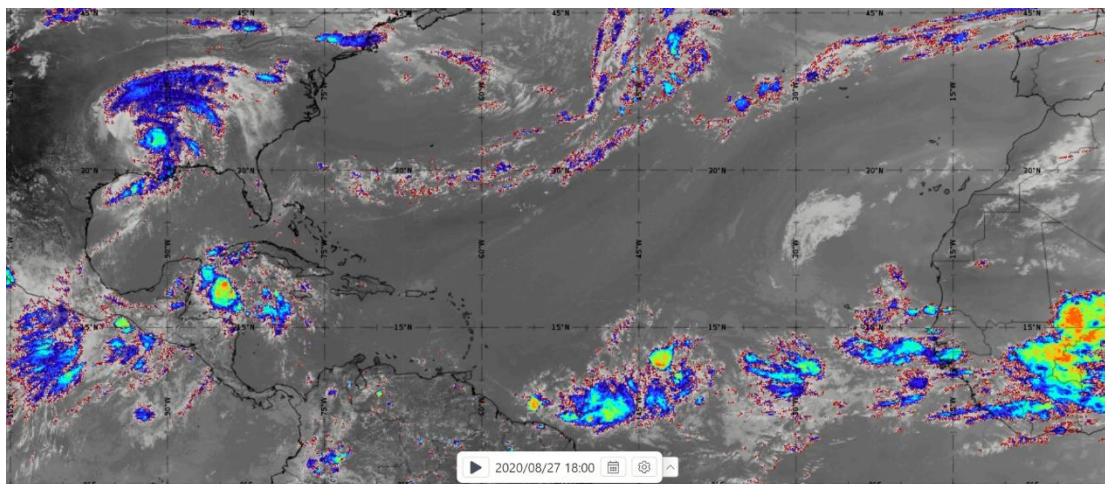
Σχήμα 2.17. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται ο κυκλώνας Λάουρα πάνω από τον ΒΔ Κόλπο του Μεξικού (στα ανοιχτά των νότιων ακτών των Η.Π.Α.) και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος $91-95^\circ \Delta$ και γεωγραφικό πλάτος $26-30^\circ \text{B}$.

Από την παραπάνω χρονική στιγμή και έπειτα το μάτι του κυκλώνα άρχισε σταδιακά να αποδιοργανώνεται. Συγκεκριμένα, μόλις 6 ώρες αργότερα, στις 06:00 UTC της 27 Αυγούστου στις 29.8°B , $93.3^\circ \Delta$ (Σχήμα 2.18), διέσχισε την ΝΔ ακτή της Πολιτείας Λουϊζιάνα παραμένοντας κατηγορίας 4.



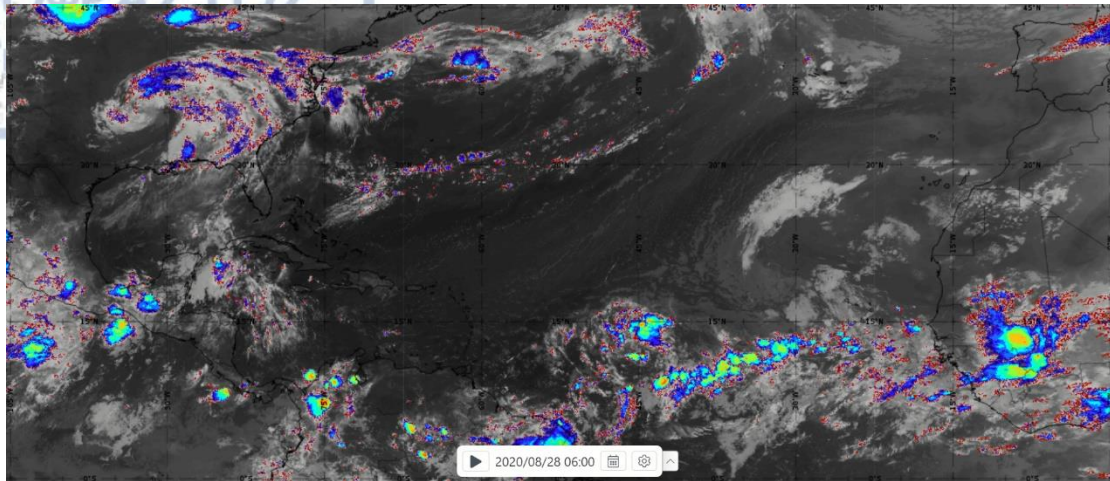
Σχήμα 2.18. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 06:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται ο κυκλώνας Λάουρα πάνω από τις νότιες ακτές των Η.Π.Α. της Πολιτείας Λουϊζιάνα και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος $91.5-95.5^\circ \Delta$ και γεωγραφικό πλάτος $27-31^\circ \text{B}$.

Από την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και έπειτα ο κυκλώνας κατευθυνόμενος βορειότερα κατά μήκος της δυτικής Πολιτείας Λουϊζιάνα παρουσίαζε εξασθένηση και τελικά στις 18:00 UTC της 27 Αυγούστου υποβαθμίστηκε σε τροπική καταιγίδα καθώς βρισκόταν στο ΒΔ άκρο της πολιτείας Λουϊζιάνα στις 32.8°B , $92.9^{\circ}\Delta$ (Σχήμα 2.19)



Σχήμα 2.19. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 18:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται η τροπική καταιγίδα Λάουρα πάνω από την ενδοχώρα των Η.Π.Α. στα δυτικά της Πολιτείας Λουϊζιάνα και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος $91-95^{\circ}\Delta$ και γεωγραφικό πλάτος $26-30^{\circ}\text{B}$.

Έπειτα, η τροπική καταιγίδα συνέχισε να κατευθύνεται βορειότερα, και εντοπίστηκε στην γειτονική Πολιτεία Αρκάνσας διαγράφοντας εκεί μια BBA τροχιά. Το σύστημα υποβαθμίστηκε σε τροπική ύφεση στις 06:00 UTC της 28 Αυγούστου στις 35.4°B , $92.0^{\circ}\Delta$ (Σχήμα 2.20) (Pasch et al., 2021).



Σχήμα 2.20. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 06:00 UTC, 28 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται ο τροπικός βόρειος Ατλαντικός ωκεανός και διακρίνεται η τροπική ύφεση Λάουρα πάνω από την ενδοχώρα των Η.Π.Α. στην Πολιτεία Αρκάνσας τα δυτικά της πολιτείας Λουϊζιάννα και τα καταιγισμοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), περίπου σε γεωγραφικό μήκος $91-95^\circ \Delta$ και γεωγραφικό πλάτος $26-30^\circ \text{B}$.

Στη συνέχεια, η τροπική ύφεση ακολουθώντας πιο ΒΑ κατεύθυνση διέσχισε τις ΝΑ περιοχές της Πολιτείας Μιζούρι κατά τις απογευματινές ώρες, ενώ αργότερα, κατά τις βραδινές ώρες διέσχισε και τις δυτικές περιοχές της πολιτείας Κεντάκι. Τελικά, το σύστημα συνέχισε να αποδυναμώνεται με αποτέλεσμα μέχρι τις 12:00 UTC της 29 Αυγούστου να υποβαθμιστεί ως μία υπολειμματική ύφεση πάνω από την πολιτεία Μιζούρι.

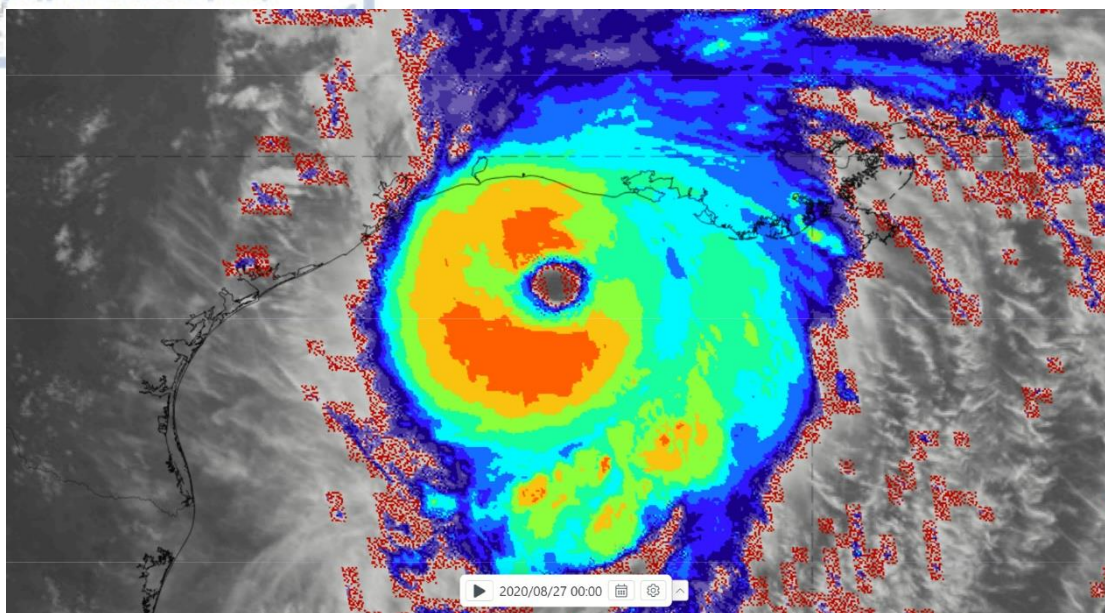
3. Μέσης Κλίμακας Ανάλυση

3.1. Ανάλυση του κυκλώνα Λάουρα όταν εμφάνισε τη μέγιστη ένταση

Το σύστημα χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας Λάουρα μεταξύ των 12:00 UTC της 25 Αυγούστου - 12:00 UTC της 27 Αυγούστου 2020 (Pasch et al., 2021). Ειδικότερα, κάθε μεταβλητή που σχεδιάζεται παρακάτω αναφέρεται στις 00:00 UTC της 27 Αυγούστου 2020, όπου παρουσιάστηκε η μέγιστη ένταση του συστήματος.

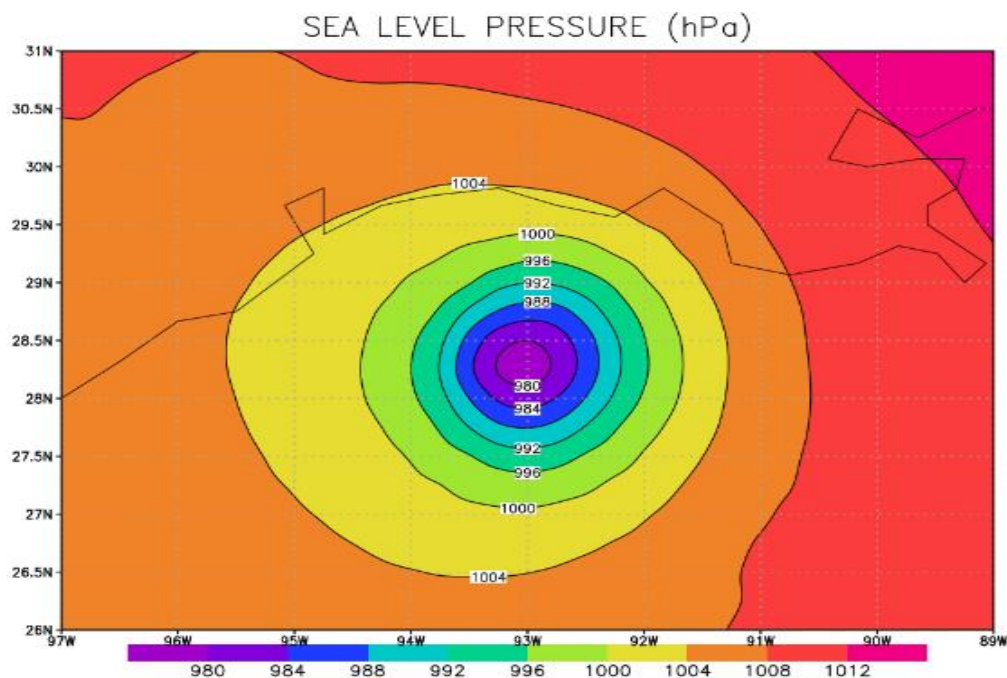
3.1.1. Οριζόντια ανάλυση

Στις 00:00 UTC της 27 Αυγούστου (Σχήμα 3.1), διακρίνονται τα νέφη γύρω από τον κυκλώνα Λάουρα παρουσιάζοντας μια ελικοειδή σπειροειδή μορφή κυρίως προς τα ανατολικά. Στο κέντρο του εντοπίζεται μια σχεδόν κυκλική περιοχή με απουσία νεφών υποδηλώνοντας καθοδικές ροές ανέμου και αποτελεί το μάτι του κυκλώνα. Περιμετρικά του ματιού εντοπίζεται μια περιοχή με καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης (με χρωματική κλίμακα) υποδηλώνοντας ανοδικές ροές ανέμου και αποτελεί το τοίχωμα του ματιού. Οι χρωματικές αποχρώσεις αντιπροσωπεύουν χαμηλές θερμοκρασίες που βρίσκονται στην ανώτερη επιφάνεια των νεφών. Συγκεκριμένα οι κόκκινες και πορτοκαλί αποχρώσεις φανερώνουν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες δηλαδή τα μεγαλύτερα ύψη νεφών.

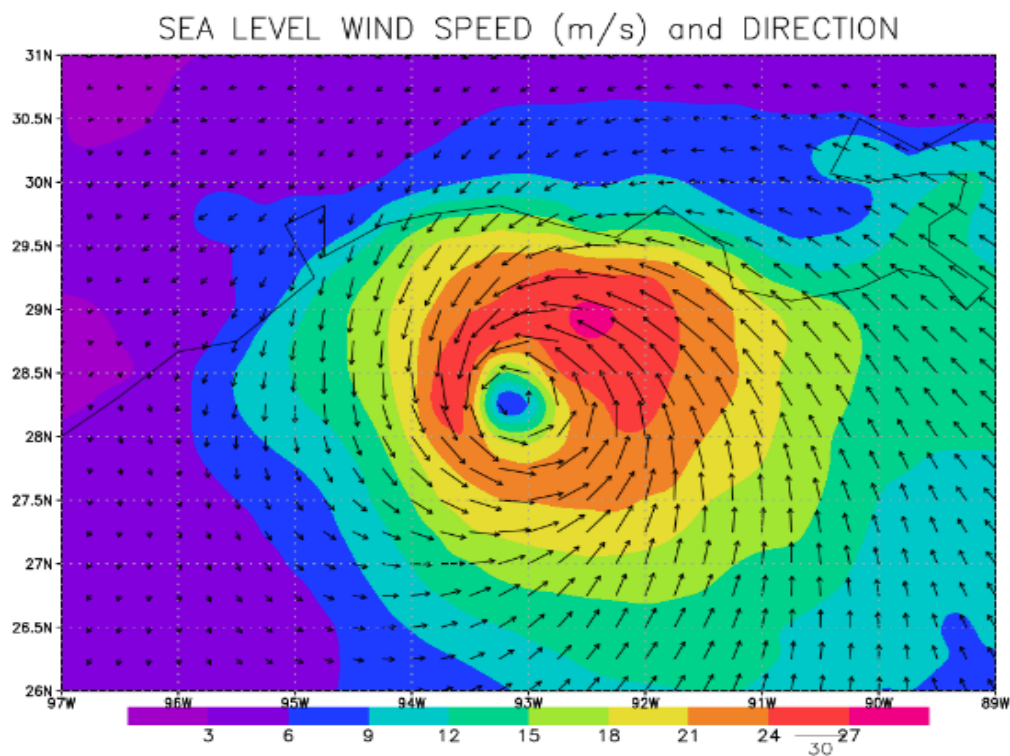


Σχήμα 3.1. Δορυφορική εικόνα του GOES EAST 16 στο κανάλι IR 10.3 μm (enhanced) στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Παρουσιάζεται η ΒΔ λεκάνη του Κόλπου του Μεξικού και διακρίνεται ο κυκλώνας Λάουρα στα ανοιχτά των νότιων ακτών των Η.Π.Α., και τα καταιγιδοφόρα νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με χρωματικές αποχρώσεις (χαμηλές θερμοκρασίες), σε γεωγραφικό μήκος περίπου $91-95^\circ \Delta$ και γεωγραφικό πλάτος $26-30^\circ \text{B}$.

Η βαρομετρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας μειώνεται προς το κέντρο του συστήματος με ελάχιστη τιμή 978 mb (στα πλεγματικά δεδομένα ERA5) στις $93^\circ \Delta$ και 28.3°B (Σχήμα 3.2). Γύρω από το κέντρο αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου με μέγιστη τιμή 27.5 m/s στην μέση στάθμη θάλασσας, ενώ μειώνονται σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις και πάνω από τις νότιες ακτές των Η.Π.Α. (Σχήμα 3.3). Επίσης, τα διανύσματα ανέμου φανερώνουν κυκλωνική κυκλοφορία που συγκλίνει προς το κέντρο.

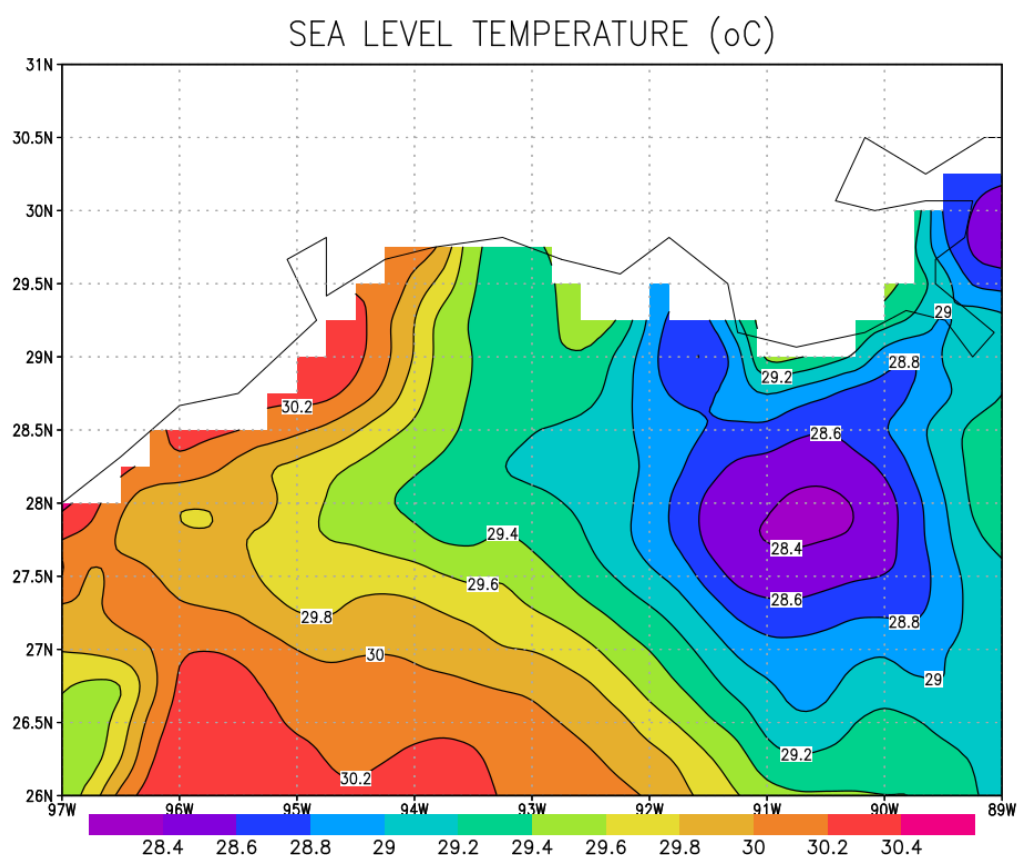


Σχήμα 3.2. Απεικονίζεται ο ΒΔ Κόλπος του Μεξικού στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Διακρίνεται η βαρομετρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας με χρωματική κλίμακα και ισοβαρείς καμπύλες ανά 4 hPa, και διακρίνεται το βαρομετρικό χαμηλό.



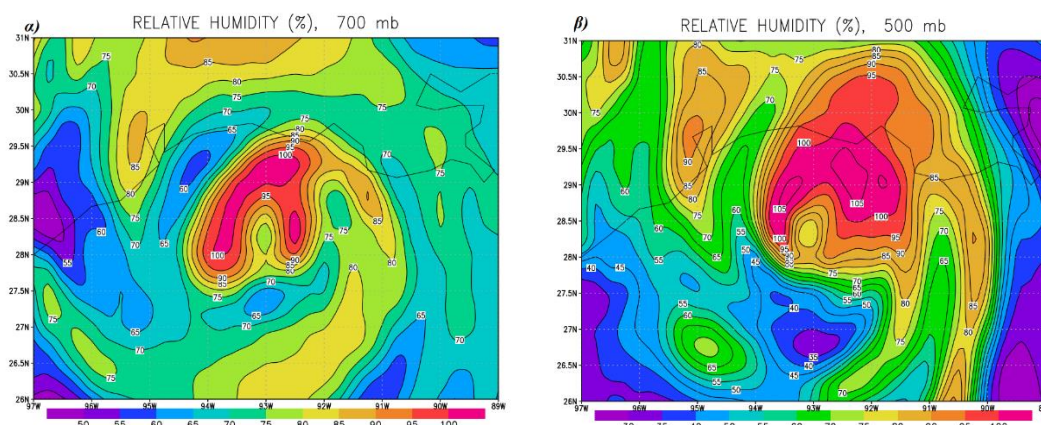
Σχήμα 3.3. Απεικονίζεται ο ΒΔ Κόλπος του Μεξικού στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Διακρίνονται η ταχύτητα του ανέμου στα 10 m με χρωματική κλίμακα ανά 3 m/s, και τα διανύσματα ανέμου με (μαύρα) βελόκια, στα 10 m ύψος από την επιφάνεια.

Οι επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας εντός του κόλπου του Μεξικού είναι ιδιαίτερα υψηλές. Στο Σχήμα 3.4, φαίνεται ότι οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 28.2 – 30.6 °C. Εφόσον είναι > 26 °C θεωρούνται επαρκείς για να τροφοδοτήσουν το σύστημα, διότι η ενέργεια του προέρχεται κυρίως από επιφανειακές ροές θερμότητας και υγρασίας της θάλασσας. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες κυμαίνονται κοντά στους 28.2 °C και εντοπίζονται ανατολικότερα του κυκλώνα. Σύμφωνα με τους Eley et al. (2021) η πτώση της θερμοκρασίας πιθανόν οφείλεται σε έναν άλλον κυκλώνα (Μάρκο) που διέσχισε την περιοχή τρεις μέρες νωρίτερα (κατά της 24 Αυγούστου 2020).



Σχήμα 3.4. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας στον ΒΔ Κόλπο του Μεξικού στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Οι θερμοκρασίες (χρωματική κλίμακα) κυμαίνονται μεταξύ 28.2 – 30.6 °C με ισόθερμες καμπύλες ανά 0.2 °C.

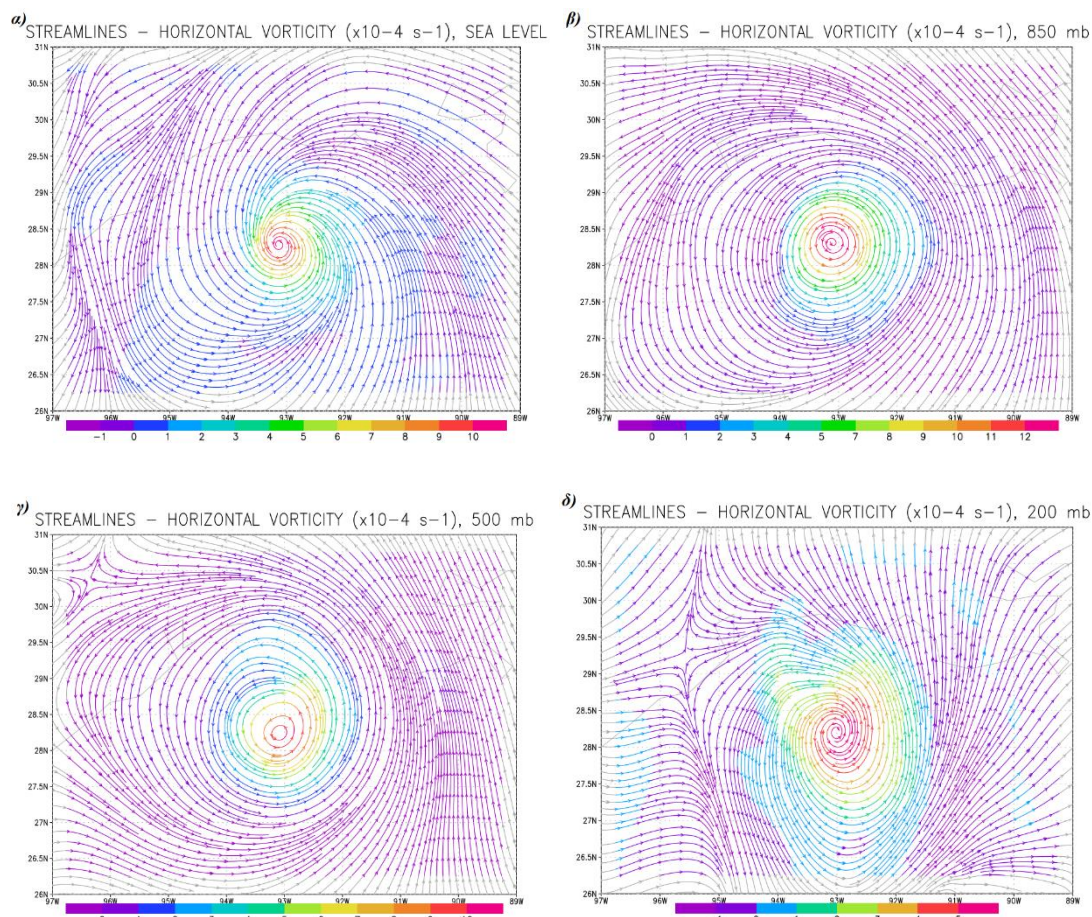
Οι υψηλές θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας (Σχήμα 3.4) αυξάνουν τις επιφανειακές ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας και την αστάθεια. Αποτέλεσμα είναι η σχετική υγρασία στην κατώτερη και μέση τροπόσφαιρα να είναι πολύ υψηλή (Σχήμα 3.5). Έτσι, οι τιμές της κυμαίνονται γενικά μεταξύ 40 – 100 % και είναι επαρκείς (>50%) για να συμβάλουν στην μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών. Η μέγιστη σχετική υγρασία 100% εντοπίζεται γύρω από το κέντρο, στο τοίχωμα του ματιού.



Σχήμα 3.5. Η σχετική υγρασία στα ισοβαρικά επίπεδα των: α) 700 mb, και β) 500 mb, στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Η σχετική υγρασία (χρωματική κλίμακα) και στα δύο ισοβαρικά επίπεδα είναι γενικά μεγαλύτερη του 50%, ανά 5%, και οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται με κόκκινες αποχρώσεις (100%) στο τοίχωμα του ματιού.

Η κατεύθυνση του ανέμου στα 10 m ύψος από την επιφάνεια (Σχήμα 3.6α) και στα στρώματα της κατώτερης τροπόσφαιρας (Σχήμα 3.6β) παρουσιάζει κυκλωνική ροή με ελικοειδή μορφή που συγκλίνει προς το κέντρο. Στα στρώματα της μέσης τροπόσφαιρας (Σχήμα 3.6γ) ο άνεμος συνεχίζει να παρουσιάζει κυκλωνική ροή, όμως με μικρή απόκλιση γύρω από το κέντρο. Τελικά, στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας (Σχήμα 3.6δ) διατηρείται η κυκλωνική ροή γύρω από το κέντρο, με ορατή πλέον απόκλιση κυρίως στα ανατολικά και βόρεια του συστήματος. Μάλιστα σε ακτινικές αποστάσεις μεγαλύτερες περίπου των 2° η ροή του ανέμου στρέφεται σε αντικυκλωνική.

Επιπλέον, η κυκλωνική ροή ανέμου παράγει θετικό οριζόντιο στροβιλισμό και παρουσιάζει μεγαλύτερες θετικές τιμές στην κατώτερη τροπόσφαιρα (Σχήμα 3.6β). Αντίθετα, στην ανώτερη τροπόσφαιρα παρουσιάζει μικρότερες θετικές τιμές και μικρές αρνητικές που συνδέονται με ασθενή αντικυκλωνική ροή ανέμου (Σχήμα 3.6δ).

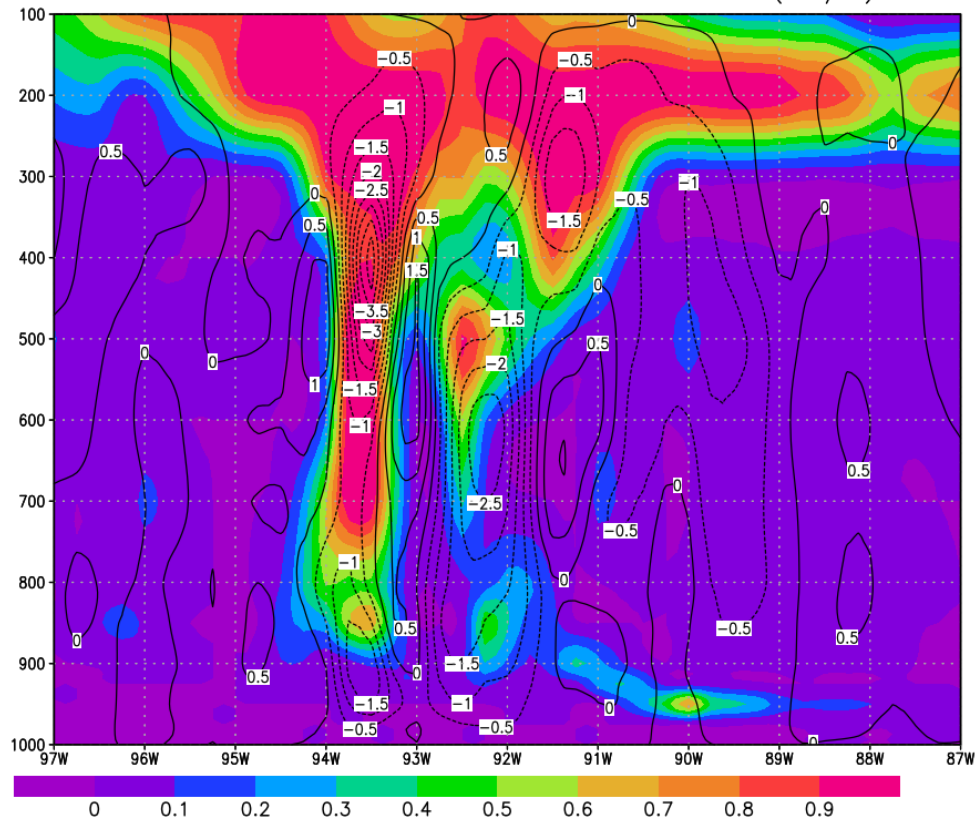


Σχήμα 3.6. Παρουσιάζονται οι ρευματογραμμές (καμπύλες γραμμές) πάνω στις οποίες αποτυπώνονται χρωματικά οι τιμές οριζόντιας στροβιλότητας (10^{-4} s^{-1}), α) στα 10 m ύψος από την επιφάνεια και σε τρία ισοβαρικά επίπεδα: β) 850 mb, γ) 500 mb, δ) 200 mb, στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Φανερώνει κυκλωνική ροή ανέμων στην κατώτερη τροπόσφαιρα που μετατρέπεται σταδιακά σε αντικυκλωνική στην ανώτερη τροπόσφαιρα.

Όλα τα παρακάτω σχήματα αποτυπώνουν το κατακόρυφο ακτινικό προφίλ της τροπόσφαιρας μεταξύ 1000-100 mb με χρήση διάφορων παραμέτρων, σε γεωγραφικό μήκος μεταξύ 87–97° Δ και γεωγραφικό πλάτος 28.25° Β, ή γεωγραφικό μήκος 93° Δ και γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 23.5-34.5° Β, στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020.

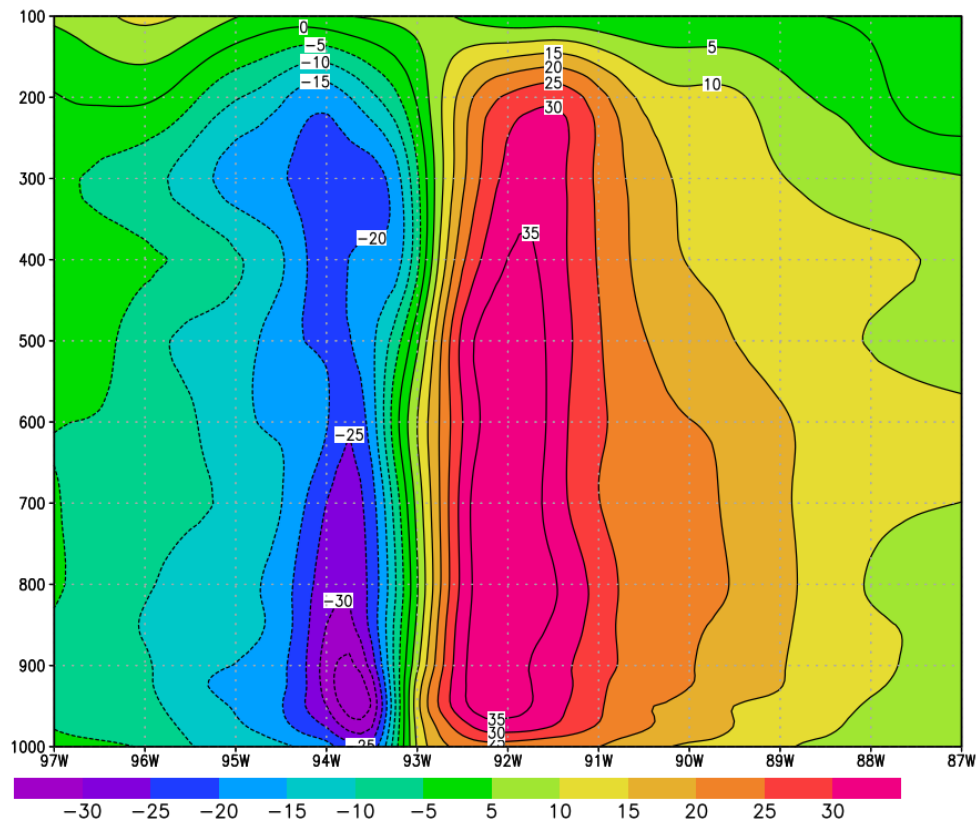
Στο κέντρο (μάτι) του κυκλώνα Λάουρα (93° Δ) η κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου (Pa/s) είναι θετική και φανερώνει καθοδικές ροές ανέμου προκαλώντας νεφοδιάλυση κυρίως στα κατώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας (<500 mb). Αντίθετα, στο τοίχωμα του ματιού η κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου είναι αρνητική και φανερώνει ανοδικές ροές ανέμου προκαλώντας μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών, πάνω από τα 800 mb. Στις περιοχές εξωτερικά του τοιχώματος η κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου είναι κοντά στο μηδέν και τα νέφη μικρής ανάπτυξης. Στην ανώτερη τροπόσφαιρα, περίπου από τα 250 mb μέχρι την τροπόπαυση σχηματίζεται μία ‘ασπίδα’ νεφών που εκτείνεται και πλευρικά (Σχήμα 3.7).

CLOUD COVER and VERTICAL VELOCITY (Pa/s)



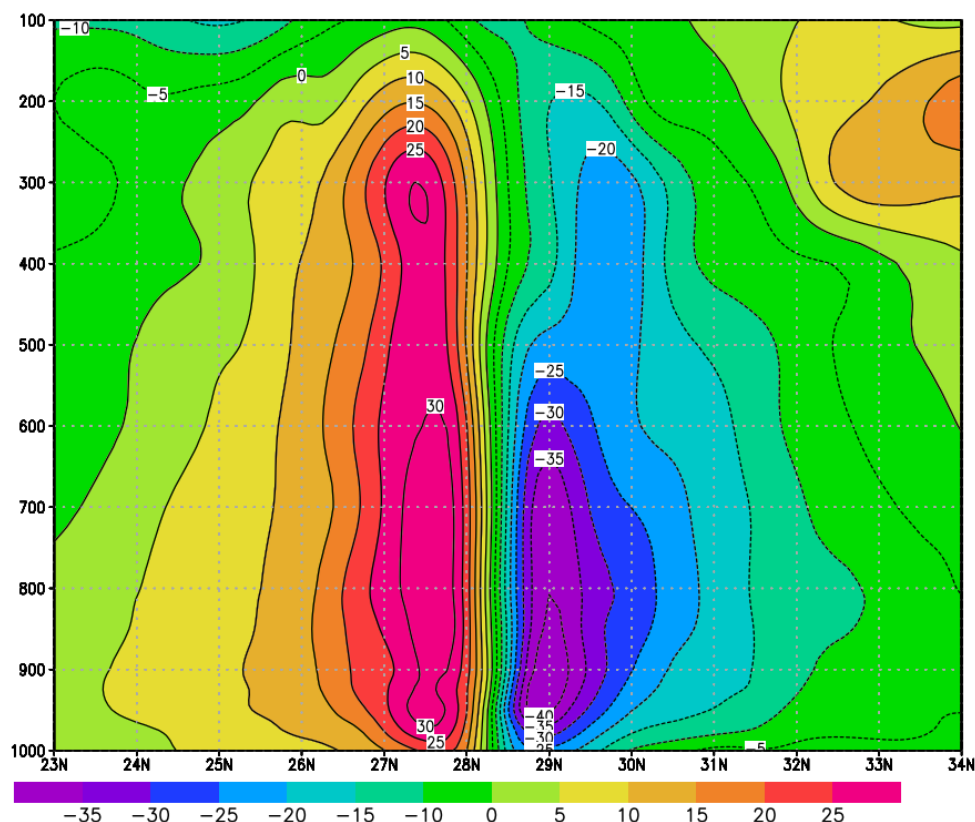
Σχήμα 3.7. Κατακόρυφη διατομή με δύο παραμέτρους: i) κατακόρυφη ταχύτητα ανέμου ανά 0.5 Pa/s με συμπαγείς (θετικές) και διακεκομμένες (αρνητικές) καμπύλες γραμμές που φανερώνουν καθοδικές και ανοδικές ροές ανέμων αντίστοιχα, και ii) νεφοκάλυψη (χρωματική κλίμακα, 0-1), στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Οι δύο παράμετροι συνδέονται μεταξύ τους καθώς αρνητικές κατακόρυφες ταχύτητες συνδέονται με ανοδικές ροές ανέμων και τη δημιουργία καταιγιδοφόρων νεφών.

Η κατακόρυφη ακτινική διατομή με τις (μέσες) της εφαπτομενικής συνιστώσας του οριζόντιου ανέμου (v) σε γεωγραφικό πλάτος 28.25° B, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Παρατηρείται, η ξεκάθαρη ύπαρξη έντονης κυκλωνικής κυκλοφορίας μεταξύ ενός εύρους περίπου 0.5° οριζόντια, στο τοίχωμα του ματιού, από την επιφάνεια μέχρι την ανώτερη τροπόσφαιρα, με μέγιστη ένταση ανέμου (<40 m/s) κοντά στην επιφάνεια (850-700 mb). Αυτό υποδηλώνει και την ύπαρξη θερμού πυρήνα.



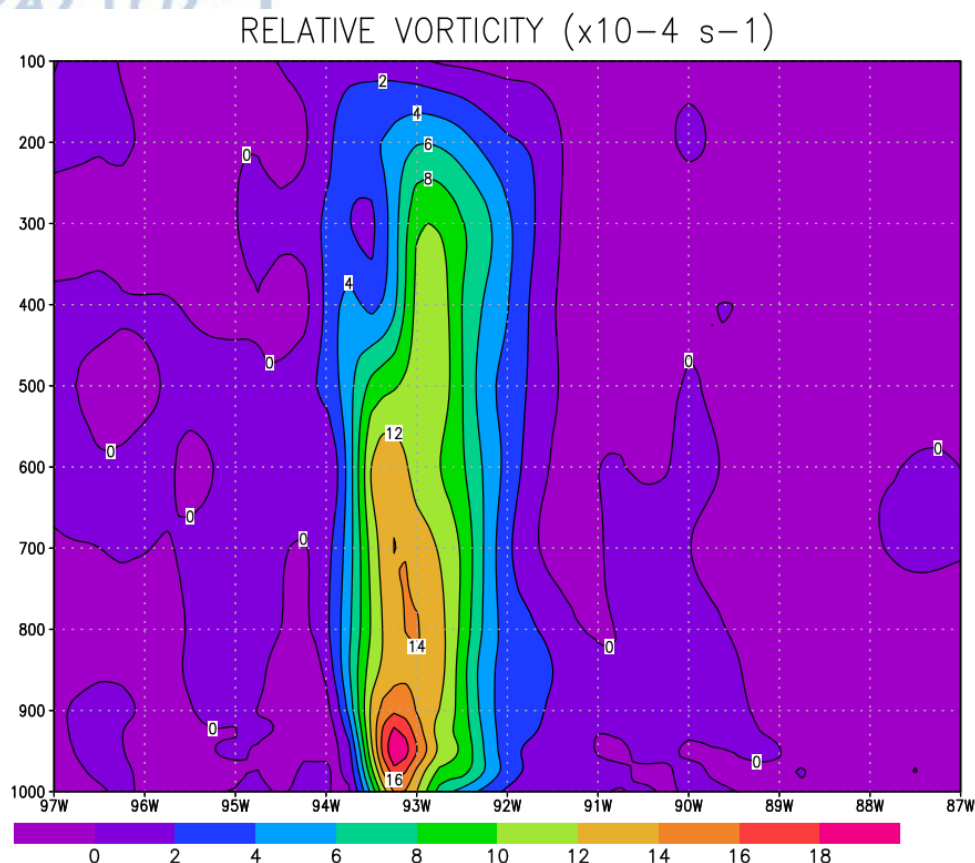
Σχήμα 3.8. Κατακόρυφη ακτινική διατομή Α-Δ της εφαπτομενικής συνιστώσας του ανέμου σε γεωγραφικό πλάτος 28.25° Β, στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Η χρωματική σκίαση δείχνει την ταχύτητα του ανέμου και οι μαύρες καμπύλες είναι ανά 5 m/s. Προκύπτει ότι, οι μέγιστες τιμές του εφαπτομενικού ανέμου είναι μικρότερες από 40 m/s και εντοπίζονται μεταξύ $91.8-92.3^\circ$ Δ σε υψόμετρο μεταξύ 850-700 mb.

Η κατακόρυφη ακτινική διατομή με τις εφαπτομενικές συνιστώσες ανέμων (u) σε γεωγραφικό μήκος 93° Δ, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Παρατηρείται ότι, οι μέγιστες τιμές εφαπτομενικού ανέμου εντοπίζονται σε ένα εύρος περίπου 0.5° (μεταξύ $27.3-278^\circ$ Β) στο τοίχωμα του ματιού, με μέγιστες τιμές μικρότερες από 40 m/s (περίπου 35 m/s), μεταξύ 850-700 mb ύψος. Και σε αυτό το σχήμα οι μέγιστη ένταση του ανέμου είναι κοντά στην επιφάνεια, σε συμφωνία με τη δομή θερμού πυρήνα που έχουν οι τροπικοί κυκλώνες.



Σχήμα 3.9. Κατακόρυφη ακτινική διατομή B-N της εφαπτομενικής συνιστώσας του ανέμου σε γεωγραφικό μήκος 93° Δ, στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Η χρωματική σκίαση δείχνει την ταχύτητα του ανέμου και οι μαύρες καμπύλες είναι ανά 5 m/s. Προκύπτει ότι, οι μέγιστες τιμές του εφαπτομενικού ανέμου είναι περίπου 40 m/s και εντοπίζονται μεταξύ $27.3-27.8^{\circ}$ B σε υψόμετρο μεταξύ 850-700 mb.

Η κατακόρυφη ακτινική διατομή με τον σχετικό στροβιλισμό (s^{-1}) σε γεωγραφικό πλάτος 28.25° B, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10. Ο σχετικός στροβιλισμός συνδέεται με οριζόντιες διαφορές της ταχύτητας ανέμου και είναι θετικός στον κυκλώνα. Παρατηρείται ότι, οι μέγιστες τιμές σχετικού στροβιλισμού εντοπίζονται στην κατώτερη τροπόσφαιρα μεταξύ των ισοβαρικών επιφανειών 1000-850 mb (σε συμφωνία με τη δομή θερμού πυρήνα λόγω της εξίσωσης του θερμικού ανέμου), με μέγιστες τιμές λίγο μικρότερες από $20 \times 10^{-4} s^{-1}$.



Σχήμα 3.10. Κατακόρυφη ακτινική διατομή Α-Δ του σχετικού στροβιλισμού στις 00:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020. Η χρωματική σκίαση δείχνει τις τιμές σχετικού στροβιλισμού και οι μαύρες καμπύλες είναι ανά $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Προκύπτει ότι, οι μέγιστες τιμές σχετικού στροβιλισμού είναι μικρότερες από $20 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ και εντοπίζονται μεταξύ $93-93.5^\circ \Delta$ σε υψόμετρο μεταξύ 1000-850 mb.

3.2. Ανάλυση και σύγκριση δεδομένων

Τα αριθμητικά δεδομένα που συγκρίνονται προέρχονται από το Εθνικό Κέντρο Κυκλώνων Αμερικής (N.H.C.) και από το ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF). Αναφέρονται στην χρονική περίοδο μεταξύ 25 Αυγούστου (12:00 UTC) – 27 Αυγούστου (12:00 UTC) που το σύστημα χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας Λάουρα.

Α. Δεδομένα Ν.Η.Σ.: ημερομηνίας, ώρας (UTC), βαρομετρικής πίεσης (mb) και ταχύτητας ανέμου (kt) για τον κυκλώνα Λάουρα μεταξύ 12:00 UTC, 25 Αυγούστου – 12:00 UTC 27 Αυγούστου 2020

Ημερομηνία	Ωρα (UTC)	Βαρομετρική πίεση (mb)	Ταχύτητα ανέμου (kt)
25/08/2020	12:00	990	65
25/08/2020	18:00	990	70
26/08/2020	00:00	983	75
26/08/2020	06:00	978	90
26/08/2020	12:00	963	100
26/08/2020	18:00	952	120
27/08/2020	00:00	937	130
27/08/2020	06:00	939	130
27/08/2020	12:00	970	85

Πίνακας 3.1. Παρουσιάζονται οι τιμές ελάχιστης βαρομετρικής πίεσης (mb) και μέγιστης ταχύτητας ανέμου στα 10 m (kt) για τη χρονική περίοδο 12:00 UTC, 25 Αυγούστου - 12:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020, από το Ν.Η.Σ.

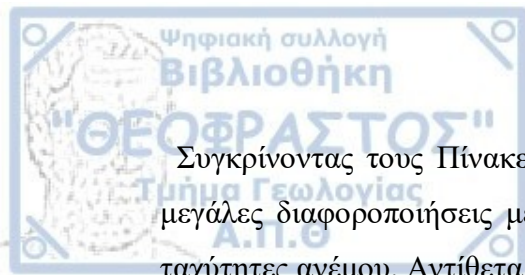
Από τον Πίνακα 3.1 διαπιστώνεται ότι το πραγματικό σύστημα χαρακτηρίστηκε κυκλώνας στις 12:00 UTC της 25 Αυγούστου με ελάχιστη βαρομετρική πίεση 990 mb και ταχύτητα με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου 65 kt. Έπειτα παρουσίασε γρήγορη και σημαντική ενίσχυση. Έτσι, 36 ώρες αργότερα, στις 00:00 UTC της 27 Αυγούστου απέκτησε μέγιστη ενίσχυση, με ελάχιστη βαρομετρική πίεση 937 mb και ταχύτητα με μέγιστη τιμή ανέμου 130 kt. Αργότερα, παρουσίασε σχετικά γρήγορη αποδυνάμωση.

Β. Δεδομένα ERA5 (ECMWF): ημερομηνίας, ώρας (UTC), βαρομετρικής πίεσης (mb) και ταχύτητας ανέμου (kt) για τον κυκλώνα Λάουρα μεταξύ 00:00 UTC, 25 Αυγούστου – 12:00 UTC 27 Αυγούστου 2020.

Ημερομηνία	Ωρα (UTC)	Βαρομετρική πίεση (mb)	Ταχύτητα ανέμου (kt)
25/08/2020	12:00	995	80
25/08/2020	18:00	993	80
26/08/2020	00:00	989	70
26/08/2020	06:00	989	70
26/08/2020	12:00	985	85
26/08/2020	18:00	984	85
27/08/2020	00:00	978	90
27/08/2020	06:00	980	90
27/08/2020	12:00	982	90

Πίνακας 3.2. Παρουσιάζονται οι τιμές ελάχιστης βαρομετρικής πίεσης (mb) και μέγιστης ταχύτητας ανέμου στα 10 m (kt) για τη χρονική διάρκεια 00:00 UTC, 25 Αυγούστου - 12:00 UTC, 27 Αυγούστου 2020, από το ERA5 του ECMWF.

Από τον Πίνακα 3.2 διαπιστώνεται ότι στα πλεγματικά δεδομένα ERA5 το σύστημα χαρακτηρίστηκε κυκλώνας στις 12:00 UTC της 25 Αυγούστου με ελάχιστη βαρομετρική πίεση 995 mb και ταχύτητα με μέγιστη τιμή μέσου ανέμου 80 kt. Έπειτα παρουσίασε μικρή και αργή ενίσχυση. Έτσι, 36 ώρες αργότερα, στις 00:00 UTC της 27 Αυγούστου απέκτησε μέγιστη ενίσχυση, με ελάχιστη βαρομετρική πίεση 978 mb και ταχύτητα με μέγιστη τιμή ανέμου 90 kt. Αργότερα παρουσίασε αργή αποδυνάμωση.

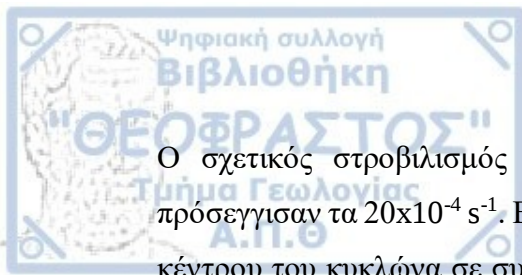


Συγκρίνοντας τους Πίνακες 3.1 και 3.2 προκύπτει ότι τα δεδομένα παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, τόσο στην βαρομετρική πίεση όσο και στις ταχύτητες ανέμου. Αντίθετα, συμφωνούν ως προς την ώρα παρατήρησης της μέγιστης ενίσχυσης του κυκλώνα, στις 00:00 UTC της 27 Αυγούστου 2020. Ειδικότερα, η μικρότερη ελάχιστη βαρομετρική πίεση παρουσιάζει απόκλιση 41 mb μεταξύ των δύο σετ δεδομένων, και οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου απόκλιση 40 kt. Η μικρότερη ενίσχυση του συστήματος που παρατηρείται στα δεδομένα του ERA5 πιθανώς οφείλεται στη χωρική ανάλυση (0.25°) των πλεγματικών δεδομένων ERA5 που έχει ως αποτέλεσμα να χάνεται πληροφορία και να μην μπορούν να αναλυθούν με λεπτομέρεια οι συνθήκες που επικρατούν σε μέση κλίμακα στη φάση που το σύστημα είχε τη μέγιστη ένταση.

4. Συμπεράσματα - Αποτελέσματα

Η παρούσα διπλωματική διατριβή αναφέρεται στη μελέτη ενός τροπικού συστήματος στον τροπικό βόρειο Ατλαντικό ωκεανό όταν αυτό αναβαθμίστηκε και χαρακτηρίστηκε ως κυκλώνας Λάουρα τον Αύγουστο του 2020. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε πλήθος δεδομένων όπως, πραγματικά δεδομένα που δίνονται από το N.H.C, δορυφορικά δεδομένα από το Giovanni της NASA και εικόνες από τον δορυφόρο GOES EAST και πλεγματικά δεδομένα αναδρομικών αναλύσεων ERA5 του ECMWF που επεξεργάστηκαν και οπτικοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού GrADS. Ο συγκεκριμένος κυκλώνας επιλέχτηκε καθώς η τροχιά που διέγραψε επηρέασε πολλές περιοχές προκαλώντας τεράστιες ζημιές (19 δις. δολάρια στις ΗΠΑ) και θανάτους (47 στις ΗΠΑ), και γιατί το έτος αυτό (2020) χαρακτηρίζεται ως η πιο ενεργή χρονιά εμφάνισης των τροπικών κυκλώνων στον βόρειο Ατλαντικό με 30 τροπικές καταιγίδες και κυκλώνες συνολικά, εκ των οποίων οι 14 αποτελούν τους κυκλώνες.

Ο κυκλώνας Λάουρα έγινε τροπική καταιγίδα και έλαβε όνομα ανατολικά της Καραϊβικής στις 21 Αυγούστου 2020, ενώ αναβαθμίστηκε σε κυκλώνα ΝΑ του Κόλπου του Μεξικού κατά τις μεσημβρινές ώρες της 25 Αυγούστου 2020 και συνέχισε διαγράφοντας μια ΒΔ τροχιά εντός του Κόλπου. Η ενίσχυση του οφείλεται στην επικράτηση ευνοϊκών ατμοσφαιρικών συνθηκών και σε εξαιρετικά θερμά θαλάσσια επιφανειακά νερά. Ο κυκλώνας παρουσίασε τη μέγιστη ενίσχυση του στις 00:00 UTC της 27 Αυγούστου, με το κέντρο του να εντοπίζεται σε γεωγραφικές συντεταγμένες 93° Δ και 28.5° Β. Χαρακτηρίστηκε κυκλώνας κατηγορίας 4 σύμφωνα με το N.H.C. και κατέγραψε ελάχιστη βαρομετρική πίεση 937 mb και μέγιστες τιμές μέσου ανέμου 130 kt. Αντίθετα, χαρακτηρίστηκε κυκλώνας κατηγορίας 2 σύμφωνα με την επεξεργασία των δεδομένων ERA5 και κατέγραψε ελάχιστη βαρομετρική πίεση 978 mb και μέγιστες τιμές μέσου ανέμου 90 kt. Οι θερμοκρασίες στη μέση στάθμη θάλασσας ήταν ιδιαίτερα υψηλές ($> 26^{\circ}$ C) και κυμαίνονταν μεταξύ $28.2 - 30.6^{\circ}$ C στα ΒΔ του Κόλπου.



Ο σχετικός στροβιλισμός στην κατώτερη τροπόσφαιρα είχε θετικές τιμές που πρόσεγγισαν τα $20 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Επιπλέον, οι ανοδικές ροές ανέμου κυρίως περιμετρικά του κέντρου του κυκλώνα σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας (>50 %) στη μέση τροπόσφαιρα ευνόησαν την δημιουργία καταιγιδοφόρων νεφών μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης.

Οι μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μεταξύ των δεδομένων του N.H.C. και του ERA5 κατά την χρονική περίοδο που το σύστημα χαρακτηρίστηκε κυκλώνας πιθανόν οφείλονται στη σχετικά χαμηλή ανάλυση των πλεγματικών δεδομένων.

Ο κυκλώνας Λάουρα είχε ως αποτέλεσμα να σημειωθούν μεγάλα ύψη βροχόπτωσης κυρίως σε θαλάσσιες περιοχές προσεγγίζοντας τα 700 mm δυτικά της Κούβας. Οι χερσαίες περιοχές που επλήγησαν περισσότερο ήταν η Πολιτεία της Λουϊζιάνα των Η.Π.Α. με 300 mm βροχόπτωσης και τα νησιά της Καραϊβικής θάλασσας, κυρίως στην χερσόνησο Barahona της Δομινικανής Δημοκρατίας με 280 mm βροχόπτωσης, σύμφωνα με δεδομένα από το N.H.C. και πραγματικά δορυφορικά δεδομένα από το Giovanni της NASA.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Γκιζάνης, Ε. Ι., 2019. Οι τυφόνες που έπληξαν τις νοτιοανατολικές Η.Π.Α. την τελευταία εικοσαετία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Πυθαρούλης, Ι., 2023. Μάθημα Συνοπτικής Μετεωρολογίας. Κεφάλαιο 1, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη “Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον”. Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Διεθνή βιβλιογραφία

Black, M. L., and Willoughby, H. E., 1992. The Concentric Eyewall Cycle of Hurricane Gilbert. Monthly Weather Review, 120, 947-957.

Britton, S. C., 2021. An exploration of the marsupial paradigm in developing African Easterly Waves from 2020: Josephine, Isaias, and Laura. Naval Postgraduate School, 1-107.

Burpee, R. W., 1986. Mesoscale Structure of Hurricanes. Chapter 14, Mesoscale Meteorology and Forecasting, American Meteorological Society, 311-330.

CIMSS, 2017. CIMSS Tropical Cyclones. Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison. <https://tropic.ssec.wisc.edu/archive/data/NWAtlantic/20170906/IRImageColorBackground/20170906.09.NWAtlantic.IRImageColorBackground.png>

Deutscher Wetterdienst, 2023. Tropical cyclones. CLIMATE & ENVIRONMENT. https://www.dwd.de/EN/climate_environment/climatemonitoring/global/tropical_cyclones/tropwirbelstuerme_artikel.html

Eley, E. N., Subrahmanyam, B., and Trott, C. B., 2021. Ocean-Atmosphere Interactions during Hurricanes Marco and Laura (2020). Remote Sens., 13.

Emanuel, K. A., 1986. An Air Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part: I: Steady-State Maintenance. Journal of the Atmospheric Sciences, 43, 585-605.

Emanuel, K. A., 1988. Toward a General Theory of Hurricanes. American Scientist, 76, 371-379.

Emanuel, K. A., 1993. The physics of tropical cyclogenesis over the Eastern Pacific. ICSU/WMO International Symposium on Tropical Cyclone Disasters, 136-142.

Encyclopaedia Britannica Inc., 2012. Tropical Cyclone. Earth Sciences of Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/tropical-cyclone#/media/1/606551/75357>

Evans, J. L., 2017. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. Chapter 4: Tropical Cyclonic Intensity, Structure, and Structure Change, WMO-No. 1194, 1-397

Foley, Gr., 1995. Observations and analysis of tropical cyclones. Global perspectives on tropical cyclones. WMO, TCP- No. 38, 1-20.

Gray, W. M., 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms.. Monthly Weather Review, 96, 669-700.

Gray, W. M., 1979. Hurricanes: Their Formation, Structure and Likely Role in the Tropical Circulation. Meteorology over the tropical ocean. Royal Meteorological Society, Shaw, D. B., 155-218.

Gutro, R., 2003. Recipe for a Hurricane. NASA Goddard Space Flight Center, News & Features. https://www.nasa.gov/vision/earth/environment/HURRICANE_RECIPE.html, (visited 28/3/2023).

Holland, G. J., 1993. Ready Reckoner. Chapter 9, Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. WMO, TCP-31.

McBride, J. L. and Zehr R., 1981. Observational Analysis of Tropical Cyclone Formation. Part II: Comparison of Non-Developing versus Developing Systems. Journal of the Atmospheric Sciences, 38, 1132-1151.

McBride, J. L., 1995. Tropical Cyclone Formation. Chapter 3, Global Perspectives on Tropical Cyclones. WMO, TCP-38, 63-105.

Met Office, 2023. Location of tropical cyclones. Weather & climate. Met Office. <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/hurricanes/locatio>, (visited 17/3/2023).

MetLink, 2020. Stages of a typical Tropical Cyclone Lifecycle. MetLink, Royal Meteorological Society, 1-11.

National Geographic Society, 2022. The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. Earth Science, Climatology, Meteorology. National Geographic Society. 5-8. <https://education.nationalgeographic.org/resource/saffir-simpson-hurricane-wind-scale/>, (visited 7/4/2023).

National Hurricane Center, 2023. 2020 Atlantic Hurricane Season Summary Table. 1-2. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/2020_Atlantic_Hurricane_Season_Summary_Table.pdf, (visited 10/10/2023).



National Hurricane Center and Central Pacific Center, 2023. Tropical Cyclone Climatology. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.nhc.noaa.gov/climo/> , (visited 24/3/2023).

National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center, 2023. Atlantic Tropical Cyclone Tracks. <https://www.nhc.noaa.gov/data/tracks/tracks-at-2020.png> , (visited 10/10/2023).

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. 1-4.

National Weather Service, 2023. Tropical Cyclone Structure. Tropical Weather. <https://www.weather.gov/jetstream/tc> , (visited 23/3/2023)

Neumann, C. J., 1993. Global overview. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. WMO-No. 1194, 1-399.

Nunez, C., 2023. Hurricanes, Cyclones, and Typhoon Explained. Earth Science, Meteorology. National Geographic Society. 12. <https://education.nationalgeographic.org/resource/hurricanes-cyclones-and-typhoons-explained/> , (updated 3/4/2023).

Palmen, E., 1948. On the Formation and Structure of Tropical Hurricanes. Geophysica, 3, 26-38.

Pasch, R. J., Berg, R., Roberts, D. P., and Papin, P. P., 2021. HURRICANE LAURA. National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report, 1-75.

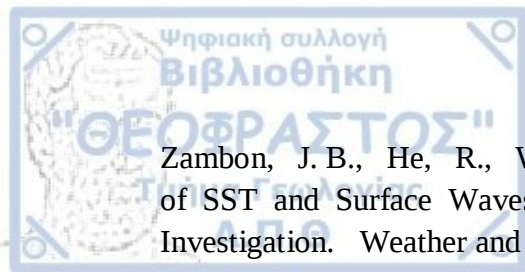
Probst, P., Annunziato, A., Proietti, C., Paris, S., 2021. 2020 – Atlantic Hurricane Season: A record-breaking season. JRC Technical Report, European Commission, 1-36.

Pytharoulis, I., 1999. African Easterly Waves And Their Transformation Into Tropical Cyclones In North Atlantic. A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Meteorology, The University of Reading, 1-196.

Simpson, R. H., and Riehl, H., 1981. The Hurricane and Its Impact. Louisiana State University Press, pp 398.

World Meteorological Organization, 2020. Record-breaking Atlantic hurricane season ends. <https://public.wmo.int/en/media/news/record-breaking-atlantic-hurricane-season-ends> , (updated 1/12/2020).

Yan, B., Liang, D., Porter, W., Huang, J., Sun, N., Zhou, L., Zhu, T., Goldberg, M., Zhang, D. L., and Liu, Q., 2020. Gap Filling of Advanced Technology Microwave Sounder Data as Applied to Hurricane Warm Core Animations. Earth and Space Science, 7, 1-18.



Zambon, J. B., He, R., Warner, J. C., and Hegermiller, C. A., 2021. Impact of SST and Surface Waves on Hurricane Florence (2018): A Coupled Modeling Investigation. *Weather and Forecasting*, 36, 1713-1734.

Zehnder, J. A., 2023. Tropical cyclone. *Earth Sciences of Encyclopaedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/tropical-cyclone>, (visited 3/3/2023).