

A Katrina hurrikán

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNY ALAPSZAK
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



KÉSZÍTETTE: TIBA CINTIA
TÉMAVEZETŐ: Dr. WEIDINGER TAMÁS

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék
Budapest, 2011.

Tartalomjegyzék

I. Bevezetés	3
II. A trópusi ciklonok általános jellemzői.....	4
II. 1. A trópusi ciklonok kialakulása és körzetei.....	4
II. 2. A trópusi ciklonok fejlődése.....	7
II. 3. A trópusi ciklonok szerkezete és mozgása.....	12
III. Érdekességek a trópusi ciklonokról.....	16
III. 1. A trópusi ciklonok gyakorisága.....	16
III. 2. A trópusi ciklonok összehasonlítása más alacsony nyomású ciklonális rendszerrel.....	19
IV. A Katrina hurrikán.....	21
IV. 1. A Katrina hurrikán szinoptikus története, kialakulása, mozgása.....	21
IV. 2. Meteorológiai statisztikák a Katrina hurrikánban.....	25
IV. 3. A Katrina hurrikán belső szerkezetének összehasonlítása a Rita és Wilma hurrikánnal.....	28
IV. 4. A meleg tengervíz szerepe a Katrina hurrikán intenzitásában.....	31
IV. 5. A kihullható víztartalom és a labilitási energia változása a Katrina hurrikánban	34
V. A Katrina hurrikán hatásai.....	42
V. 1. A Katrina károkozása.....	42
V. 2. A Katrina társadalmi és biztonságpolitikai hatásai.....	44
VI. Összegzés.....	46
Köszönetnyilvánítás.....	47
VII. Irodalomjegyzék.....	48

I. Bevezetés

Gyakran hallhatunk az időjárás jelentésekben ciklonokról, anticiklonokról és különféle frontokról. Ezek határozzák meg a mérsékeltövi területek, így hazánk időjárását, ezeknek köszönhető az aktuális hideg vagy meleg, száraz, avagy csapadékos időjárás. A ciklonok között megkülönböztetünk trópusi, szubtrópusi, mérsékelt övi és poláris ciklonokat, de nem feledkezhetünk meg a szinoptikus skálájú monszun depressziókról sem. Ezek közül a trópusi és a szubtrópusi ciklonok, valamint a monszun depressziók az alacsony szélességek időjárási rendszerei, amelyek áramlási viszonyát elsősorban a Hadley–cella és a passzátok határozzák meg (*Bartholy et al.*, 2008). Az északi és a déli hemiszféra passzátja az Egyenlítő környékén összeáramlási, más néven konvergencia zónát hoz létre (ITCZ – Intertropical Convergence Zone), ami a Földet körülvevő, meanderező sávként jelenik meg (termikus egyenlítő). A Hadley–cella termikus egyenlítő környéki felszálló ágára a termikus okokkal magyarázható alacsony nyomás, míg a térítők környéki leszálló ágra a dinamikus okokkal magyarázható magas nyomás a jellemző.

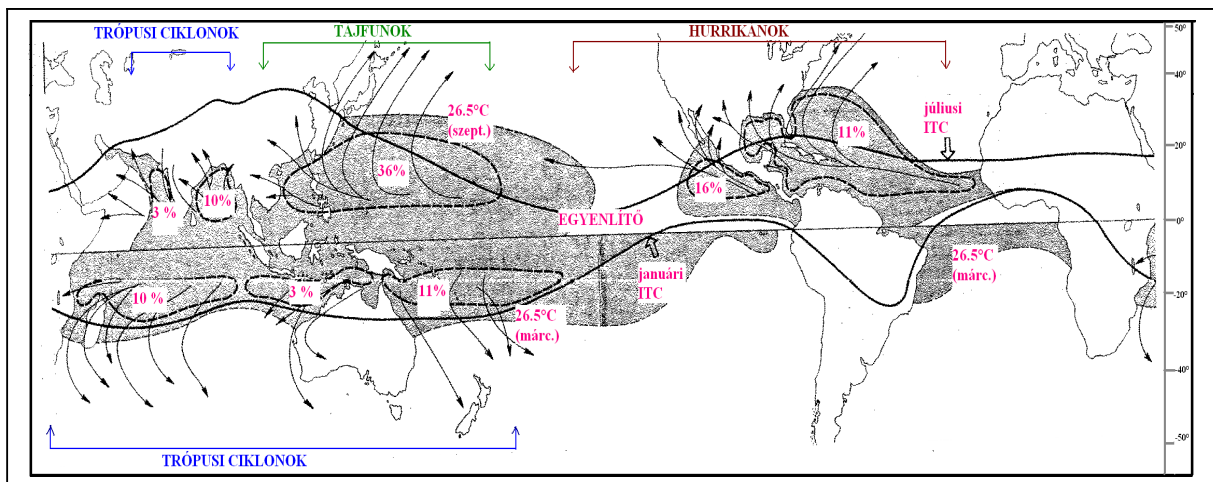
Az alacsony szélességek időjárási rendszerei közül a trópusi ciklonokat vizsgálom. Főbb jellemzőik: trópusi eredet (eltérően a mérsékelt övből „lesodródó” szubtrópusi ciklonoktól), néhány 100 km-es átmérő, alacsony légnyomás, heves szelek, nagy csapadék. A trópusi ciklonok kizárólag óceánok felett alakulnak ki az 5° és 20° szélességi fok között, feltételesen labilis légkörben, ahol a felszíni hőmérséklet nagyobb, mint 26,5 °C (*Emanuel*, 1988).

A szakdolgozat célja, hogy bemutassa a trópusi ciklonok szerkezetét, fejlődését, mozgását és hatását Észak-Amerika időjárására. Mi is az a trópusi ciklon? Milyen feltételek szükségesek a kialakulásához? E kérdések mellett a dolgozatban egy konkrét trópusi ciklon – a 2005. augusztus 29-én New Orleans városára lecsapó Katrina hurrikán – vizsgálata is szerepel. Ez volt az elmúlt 80 év legpusztítóbb hurrikánja: 1800 halálos áldozatot hagyott maga után és hozzávetőlegesen 125 milliárd dolláros károkat okozott az Amerikai Egyesült Államokban (*Kereszturi*, 2010). A dolgozatban nemcsak azt vizsgálom, hogy milyen módon alakult ki ez a rendkívül pusztító hurrikán, hanem azt is, hogyan fejlődött és mozgott, milyen károkat okozott, milyen természeti és társadalmi hatásai voltak az USA-ra és a világra.

II. A trópusi ciklonok általános jellemzői

II. 1. A trópusi ciklonok kialakulása és körzetei

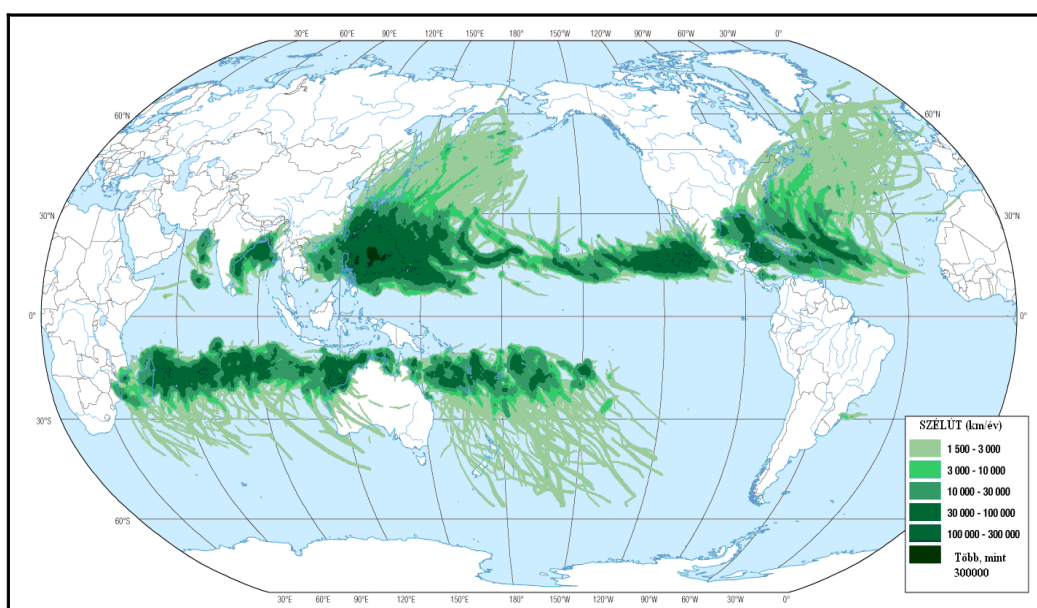
A trópusi ciklonok a világ legnagyobb pusztítását végző viharait hordozó mozgásrendszerek. A nemzetközileg elfogadott definíció szerint: „viszonylag kis (néhány 100 km-es) átmérőjű, trópusi eredetű ciklonok, amelyekre jellemzőek a heves szelek, az alacsony légnyomás, a felhőszakadásszerű esők, esetenként zivatarok; központi magjuk a vihar szeme, melyben csekély a felhőzet és gyenge a szél” (Czelnai *et al.*, 1991). A trópusi ciklonok főbb keletkezési körzeteit az 1. és a 2. ábra szemlélteti.



1. ábra. A trópusi ciklonok fő keletkezési körzetei (Czelnai *et al.*, 1991).

Meleg óceáni területek felett alakulnak ki, amikor a tengerfelszín hőmérséklete magasabb, mint $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (egy „hőerőgép”, melynek „üzemanyaga” a fázisátalakulási hő). Az évente előforduló, nagyjából 50 trópusi ciklon közel 76%-a az északi hemiszférán jön létre, 24% esik a déli féltekére. A legtöbb trópusi ciklon (hózzávetőlegesen 36%) a Csendes-óceán ázsiai szektorában alakul ki, amit északnyugat pacifikus medencének nevezünk. Itt a trópusi ciklonokra a tájfun kifejezést használják, míg az északnyugat atlanti medencében és az északkelet pacifikus medencében a hurrikán elnevezés terjedt el, Ausztráliában pedig willy-willy a neve (Gyuró, 1999). A hűvös tengerek fölé sodródó trópusi ciklonok átalakulhatnak mérsékeltövi viharokká, s az északi féltekén elérhetik a 60° szélességi kört is (2. ábra).

Érdekes történetek kapcsolódnak a trópusi ciklonok elnevezéséhez. Feljegyzések szerint először egy ausztrál meteorológus adott „keresztnevet” a trópusi ciklonoknak a XX. század elején. Azt írta, hogy az országáért sokat dolgozó politikusokról nevezte el azokat (egyfajta dicséretként), míg mások szerint éppen ellenkezőleg; akiket nem kedvelt, azokat „tisztelte meg” azzal, hogy pusztító trópusi ciklonokat nevezett el róluk. Később, a II. világháború idején, a Csendes-óceánon szolgáló amerikai meteorológusok kezdték el megjelölni a trópusi ciklonokat női nevekkal. 1950 után a szavak betűzésére alkalmazott nevekkal – például Able, Baker – ruházták fel a trópusi ciklonokat, majd 1953 óta lett hivatalos az eljárás, miszerint női neveket adnak a hurrikánoknak. Tudni kell, hogy 1979 óta már férfinevek is szerepelhetnek. Az alkalmazott névsort 6 évre előre elkészítik, de más-más névjegyzék használatos a Csendes- és az Indiai-óceánon és Ausztráliában is. Lényeges szempont, hogy a trópusi ciklonok csak akkor kapnak úgynevezett ABC-nevet, ha elérik a vihar erősségét jellemző fokozatok közül a hurrikán szintet. Ezért fontosnak tartom bemutatni a trópusi ciklonok erősségét jellemző Saffir–Simpson-féle skálát (Gyuró, 1999) (1. táblázat).



2. ábra. A trópusi ciklonok fő keletkezési körzetei, intenzitásuk és mozgásuk a teljes életszakaszuk során (a mérsékeltövi viharrá való átalakulásukat is figyelembe véve a szélút alapján, adott helyen a szélsébség és az átvonulási idő szorzatából) (1977–2006). *Global assessment report on disaster risk reduction* (2009).

A trópusi ciklonok fő vonulási irányára jellemző, hogy soha sem keresztezik az Egyenlítőt, mint ahogyan az 1. és a 2. ábrán is látható. Az Egyenlítőtől északra és délre hozzávetőlegesen

az 5°-os szélességi körökig úgymond trópusi ciklonmentes övezet uralkodik – ez a Coriolis-erő következménye. A trópusi ciklonok mozgására jellemző, hogy elsőként nyugati irányba haladnak, később esetleg észak felé mozognak (az északi féltekén), majd a 20°-os szélességi kör átlépése után visszakanyarodnak kelet felé, s egy nagyobb görbületű pályán haladva átalakulhatnak mérsékeltövi viharokká is (2. ábra). Az ok az impulzusmomentum-megmaradás törvénye. Ennek lényege a következő: a trópusi ciklonok forgó mozgásának kialakulásához szükséges a Föld felszínétől kapott impulzusmomentum, mely által csökken zonális keringésük impulzusmomentuma, lassul a nyugat-kelet irányú abszolút mozgásuk, s nyugat felé mozdulnak (a keleties passzát szelekkel haladnak). Ha azonban észak felé is történik mozgás (az eltérítő erő hatása), azaz közelítenek a Föld tengelyéhez, a nyugatias sebességtöbblet kezd nagyobb lenni, s kelet felé mozdulnak el („visszafordulnak”).

Skála/ sajátosságok	1. fokozat	2. fokozat	3. fokozat	4. fokozat	5. fokozat
Jellemző szélsősebesség	120–150 km/h	155–180 km/h	180–210 km/h felett	210–250 km/h felett	250 km/h felett
Központi légnnyomás	980 hPa	965–980 hPa	945–965 hPa	920–945 hPa	920 hPa alatt
Tengerszint emelkedése	1–1,5 m	2–2,5 m	3–4 m	4–5 m	5 m felett
megfigyelhető, okozott károk	gyenge: kémények, közlekedési táblák dőlnek, faágak törnek, csekély károk tengeren és kikötőkben	mérsékelt: háztetők felszakadnak, faházak összedőlnek, a tenger előnti a part menti utakat	erős: gépjárművek összetörnek, órákig tartó esőzés, jelentős áradások	igen erős: kőházak falai kidőlnek, fák kidőlnek, teljes pusztulás a tengertől 10 km-re	pusztító: ipari létesítmények semmisülnek meg, több méteres áradás, teljes pusztulás a tengertől 10–15 km-re

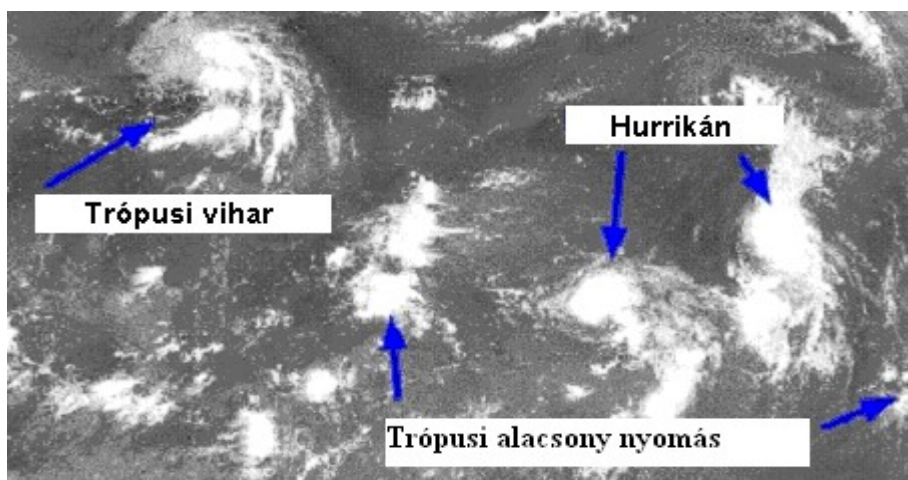
1. táblázat. Saffir–Simpson-féle skála a trópusi ciklonok erősségéről.

A trópusi ciklonok keletkezésével kapcsolatban fontos megemlíteni a kapcsolatát a bevezetésben már említett trópusi összeáramlási vonallal abban a tekintetben, hogy az ITCZ januári és júliusi szélső helyzetei nagyjából magukban foglalják azokat a

területeket, ahol a trópusi ciklonok keletkeznek, még hozzá mindkét féltekén a nyári periódusban.

II. 2. A trópusi ciklonok fejlődése

A trópusi ciklonok keletkezésének pontos körülményei ugyan még ma sem ismertek teljesen, de az biztossággal állítható, hogy több fontos tényező együttes megléte szükséges a kialakulásukhoz (Smith, 2006). Egyrészt nyilvánvaló, hogy a passzát szelek és az általuk létrehozott feláramlás nélkülözhetetlen a létrejövetelükhöz. Másrészt megfigyelések bizonyítják, hogy a passzát szelek övében gomolyfelhők sokasága tapasztalható, ezzel szemben az állandó felhőzettel nem rendelkező változó szelek övében csak ritkán jelennek meg *a hatalmas felhőmentes területekkel tagolt óriási felhőtömbök, melyek főként Cumulonimbusok-ból épülnek fel.* Ezeknek a felhőclustereknek a Hadley–cella vertikális tulajdonság-szállításában van fontos szerepük. Kialakulásuk nélkülözhetetlen feltétele, hogy belső energiátöbblet alakuljon ki, vagyis a feltételes labilitás elérje a szabad konvekció szintjét (Czelnai et al., 1991). A trópusi légkörben az alsó-troposzférára általában az a jellemző, hogy feltételesen instabil hidrosztatikai egyensúlyban van, azaz a légrézecske az őt érő perturbáció következtében annak megszűnése után folytatja a távolodást a kiindulási helyzetétől, még hozzá gyorsuló mozgással. A feltételes instabilitás kialakulásához szükséges, hogy a légrézecske telítetté váljon, amihez azonban egy külső kényszer hatására kialakuló emelőmozgás kell, hiszen a trópusokon az átlagos relatív nedvesség kevesebb, mint 100% (Götz és Rákóczi, 1981).



3. ábra. Különböző fejlettségi fokú konvektív rendszerek a trópusi felhőclusterektől (trópusi alacsony nyomás) a trópusi viharokon át a hurrikánokig. (Az 1995-ös műholdképen a Jerry nevű trópusi ciklon szerepel Florida térségében, <http://earthsci.org/>)

A szabad konvekció lényege tehát, hogy az alsó légréteg felmelegedése révén instabilissá válik a levegő rétegződése, s ez által feláramlás indul meg. A konvekció kialakulásában két fő eset különböztethető meg:

- a keleties szelek uralta passzát övben könnyen létrejövő konvekció, mely során kisméretű Cumulus felhők képződnek;
- a fejlődés a változó szelek övében indul (doldrums-öv), ahol dominánsak a szélcsendes időszakok, ezért csak valamilyen „zavar hatására” indulhat meg a konvekció folyamata (Czelnai *et al.*, 1991).

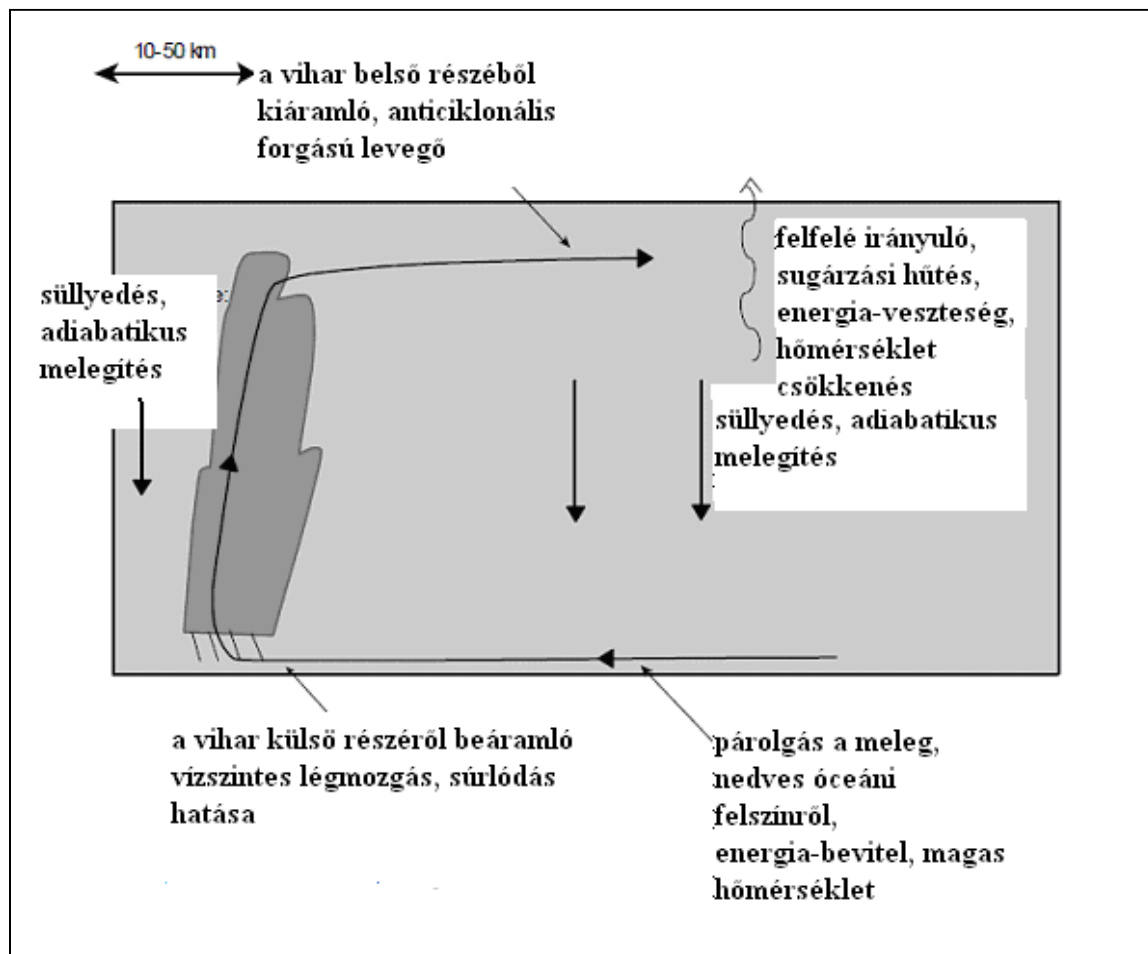
A trópusi ciklonok kialakulását „hosszas készülődés” előzi meg, nem keletkeznek egyik pillanatról a másikra. A keletkezés során általánosan megfigyelhető tulajdonságok: előfordulnak felhők, a záporok jelentősége csekély, kis szélsébség és változó szélirány a jellemző (4. és 5. ábra). Fontos megemlíteni, hogy a trópusi ciklonok kialakulására két teória született. Az egyik az 1960–1970-es években fogalmazódott meg, ez az úgynevezett CISK (Conditional Instability of the Second Kind) elmélet, amely a konvekciós és nagyskálájú konvergens folyamatok együttes hatásán alapul (Ming, 2002). Az elmélet szerint a jellemző mechanizmusok az alábbiak:

- a szélsébségi mezőben gyenge zavarok keletkeznek,
- az Ekman–pumpálás hatása a konvekció kialakulásában és erősödésében,
- látens hőfelszabadulás,
- hőmérsékletnövekedés,
- tengersizinti légnyomásesés,
- szélsébség növekedés,
- növekvő konvergencia.

Megjegyzésként fontosnak tartom az Ekman–pumpálás folyamatának az összefoglalását. Az Ekman–pumpálás a határrétegből a szabad légkör felé irányuló olyan áramlás, amely erőssége arányos egyrészt a határréteg vastagságával, másrészt a geosztrófikus örvényességgel. A határrétegben az áramlás lassú fel-, illetve leáramlással jár, melynek peremén érvényesül az előbb leírt összefüggés. Mivel a ciklonális örvényesség feláramlással, az anticiklonális pedig leáramlással jár, ezért mondjuk, hogy ezek az áramlási folyamatok az Ekman–pumpálás következményei. Az áramlások síkbeli szétterülést vagy összefolyást

okoznak, így az áramlás spirális szerkezetűvé válik, melyre hat a Coriolis-erő és csökken a geosztrófikus örvényesség. Az Ekman-pumpálás tehát részt vesz az örvényesség csillapításában (Tél, 2003).

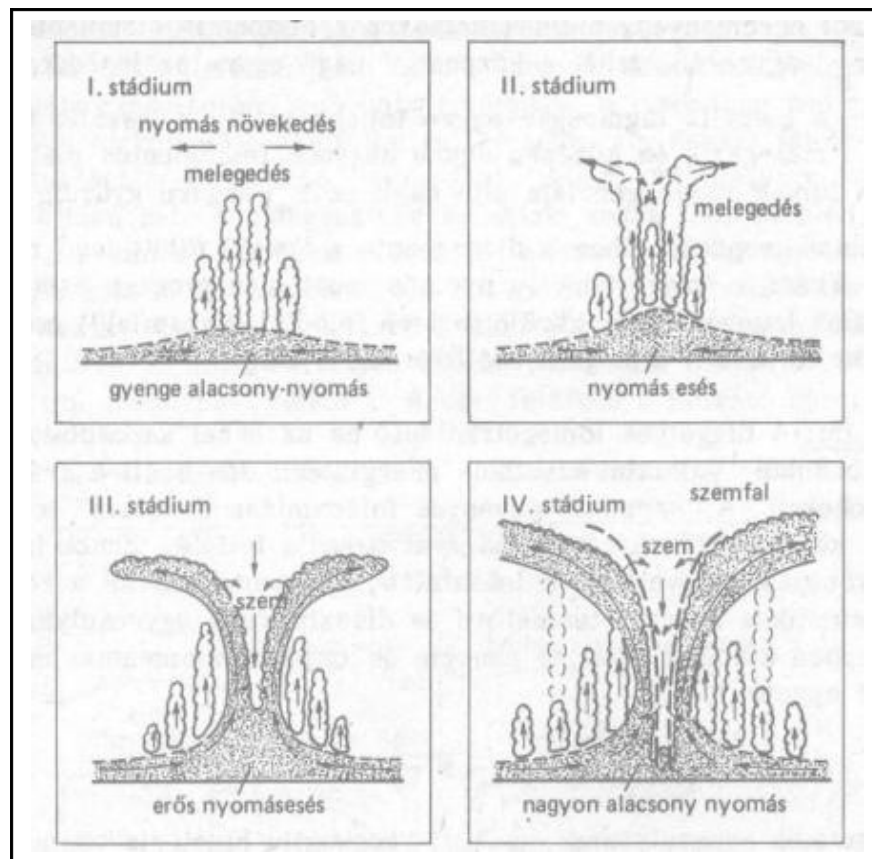
A másik az úgynevezett légkör-óceán kölcsönhatás elmélete, amely alapjaiban különbözik az előző teóriától. Emanuel (1986, 1991) elméletét arra a tényre alapozta, hogy a trópusi ciklonok hasznosítható potenciális energiája a légkör és az óceánok közötti termodinamikai instabilitásból származik.



4. ábra. A trópusi ciklonok kialakulásának sematikus ábrája (Plumb, 2006).

A trópusi ciklonok kialakulását, fejlődését a hazai szakirodalomban négy fő szakaszra bontják (5. ábra, Czelnai et al., 1991). Az első stádium kiindulási körülményeire jellemző a konvekció és az alacsony tengerszinti légnyomás, a látens hőfelszabadulás, a zivatarfelhők keletkezése, és a lassú hőmérsékletemelkedés. E folyamatok eredményeként megindul a levegő szétáramlása, s a rendszer alján légnyomásesés következik be. Ezáltal a felszín

közelében egyre dominánsabbá válik az a folyamat, amely révén nedves levegő áramlik be a képződő rendszerbe.

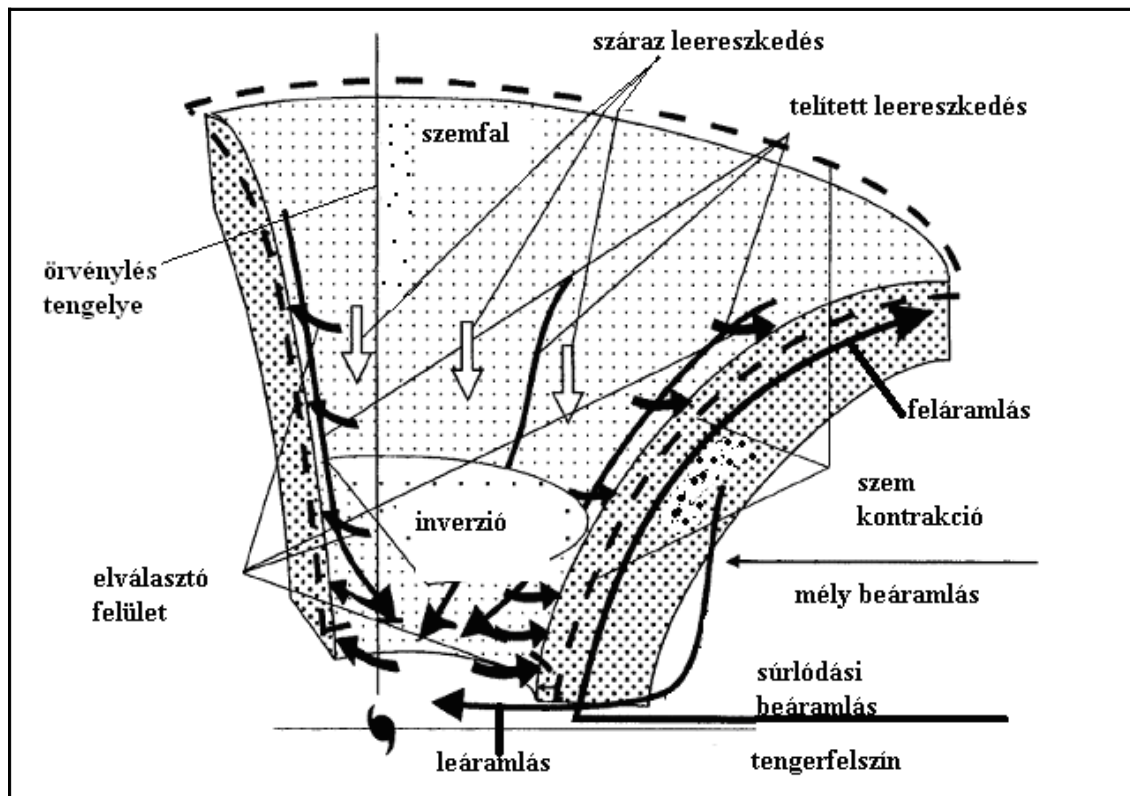


5. ábra. A trópusi ciklonok fejlődési stádiumai (Czelnai et al., 1991).

A második stádiumban az egyre erősödő cirkuláció miatt a felső troposzféra közepéig cirkulációs örvénylés alakul ki. Mivel a rendszer „tetején” létrejön egy alacsony nyomású központ, amit egy magasnyomású réteg vesz körül, ezáltal – mivel a levegő mindig a magas nyomású helyről áramlik az alacsony nyomású hely felé – egy anticiklonális irányú felső légáramlás jön létre. A következmény az lesz, hogy nemcsak a látens hő, de a hőmérséklet is növekedésnek indul. A rendszer felső részén kialakuló szétáramlás egyre nagyobb, íves alakban fog kinyúlni. A szétáramlás miatt a magas nyomású réteg viszonylag alacsony hőmérsékletűvé válik, s ennek következtében az alacsony nyomású központban egy leszálló mozgás alakul ki. A következő, harmadik stádiumban már többé-kevésbé rendezett áramlási képet látunk. Ekkor a centripetális erő növekedésével a felhőmentes szem egyre szélesebbé válik. A süllyedő levegő adiabatikusan – a légkör és környezete között nincs hőcsere – melegszik, s kialakul egy olyan sáv, amelyben már nincs felhőzet. Létrejön a trópusi ciklon szeme és az azt körülölelő szemfal, melyek között turbulens tömegkicserélődés indul meg (Czelnai et al., 1991). Az utolsó, negyedik stádium a korábban említett folyamatok; a

tömegáramlás, a látens hőfelszabadulás és a kinetikus energiatermelés által gyakorlatilag egyensúlyi állapotnak tekinthető.

A szemfal örvényes feláramlása a turbulens kölcsönhatások során magával ragadja felfelé a szem levegőjének egy részét. Ezek hatására a szem közepében növekszik a leáramlás (a szem természetesen továbbra is alacsony nyomású képződmény), s a szem lehatol a rendszer aljára (6. ábra).



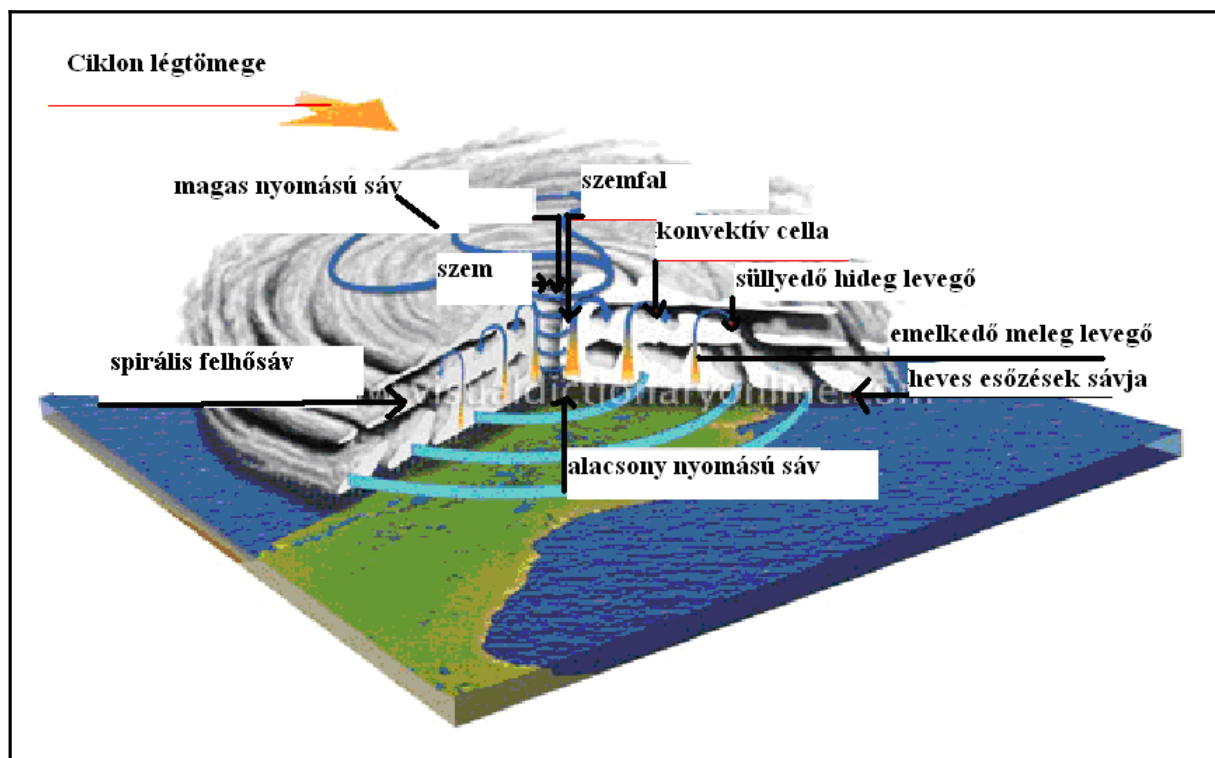
6. ábra. A hurrikánok szemében és szemfalában fellépő másodlagos beáramlás.

A súrlódási beáramlás táplálja a felhajtóerő által vezérelt elsődleges feláramlást és kiáramlást a szemfal felhőzetében. A szemfal alatti beáramlás konvekcióból származik. Ebből és a szemfal belső széle mentén a párolgás hajtotta süllyedésből származik a legtöbb levegő. A termodinamikailag, illetve dinamikusan vezérelt süllyedés során a szem belsejében lévő száraz levegő adiabatikusan melegíti a légoszlopot. A süllyedő mozgás miatt kénytelen a levegő feláramlani a szem aljáról a szemfalba (6. ábra). A szemfalban a nedves levegő termelődése és vesztesége közötti egyensúly határozza meg az inverzió emelkedésének vagy süllyedésének a mértékét. A trópusi ciklonok kialakulásában tehát nélkülözhetetlen valamilyen feláramló mozgás, de ez nem elegendő egy ilyen ciklon megszületéséhez, emellé még a gyenge szélnyírás is szükséges.

II. 3. A trópusi ciklonok szerkezete és mozgása

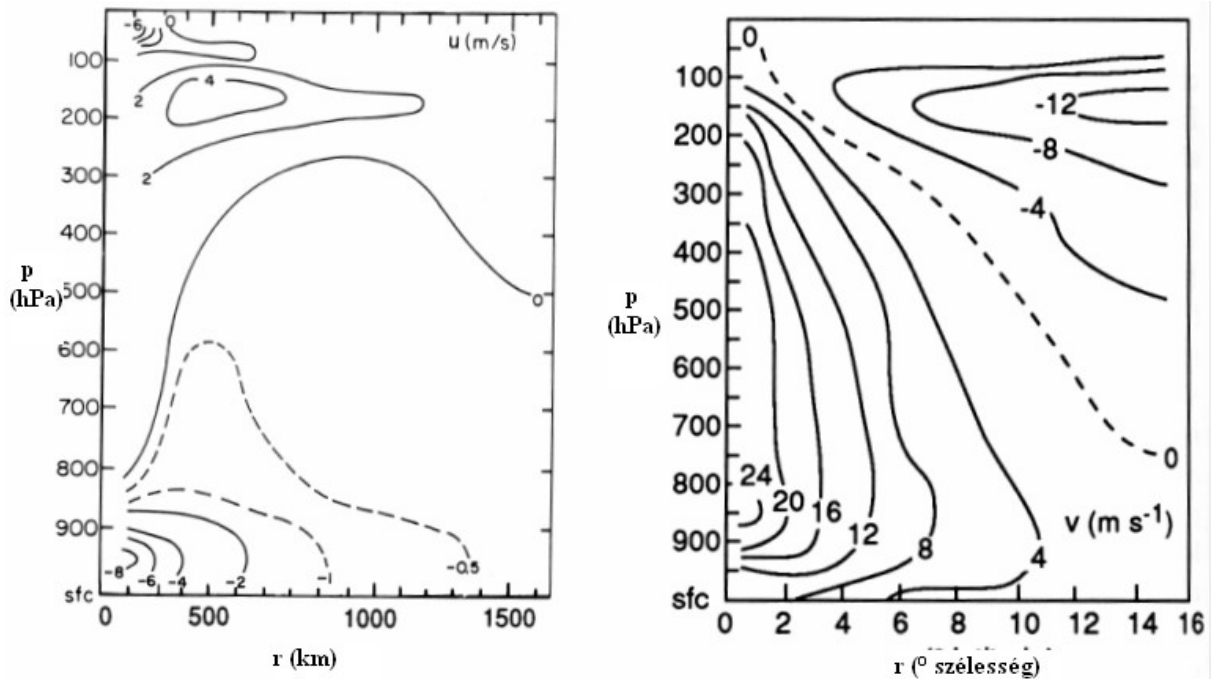
A trópusi ciklonok felépítése két fő részre osztható. A rendszer alján ciklonális forgású beáramlási, míg a felső részén anticiklonálisan mozgó szétáramlási réteg található (Czelnai *et al.*, 1991). A trópusi ciklon felső részében a levegő kiáramlása következtében egy úgynevezett cirruscsóva alakul ki, ezen kívül akár valamilyen, a trópusi ciklon mögött kialakuló konvektív cella is létrejöhet.

A trópusi ciklonok belső szerkezetében elsőként úgynevezett nyíróvonalakat kell megkülönböztetni: egysávós csapadékmodell esetén a nyíróvonal típusa külső, mely a trópusi ciklon és környezete között keletkezik; kétsávós csapadékmodell esetén a belső nyíróvonal elnevezés használatos. A trópusi ciklonok fő sajátossága a ciklon szeme, amely 10–50 km átmérőjű, tipikusan felhőmentes övezet. Ezt az úgynevezett szemfal öleli körül, melyben érvényesül a konvekció. Ezután következik a belső csapadéksáv, mely a legintenzívebb csapadéktevékenység és a leghevesebb szelek övezete. A hurrikán erejű szelek sávban a szélső sebesség a 33 m/s-ot is meghaladhatja. Az ezt határoló külső öv fő jellemzője, hogy a konvekció egyre inkább mérséklődik (7. ábra).



7. ábra. A trópusi ciklonok szerkezete.

A 8. ábrán a trópusi ciklonra jellemző szél radiális és tangenciális komponense van sematikus módon megjelenítve. Megfigyelhető, hogy a tangenciális komponens maximuma a szemfal sarkánál keletkezik, de ugyanakkor gyenge a vertikális szélnyírás.



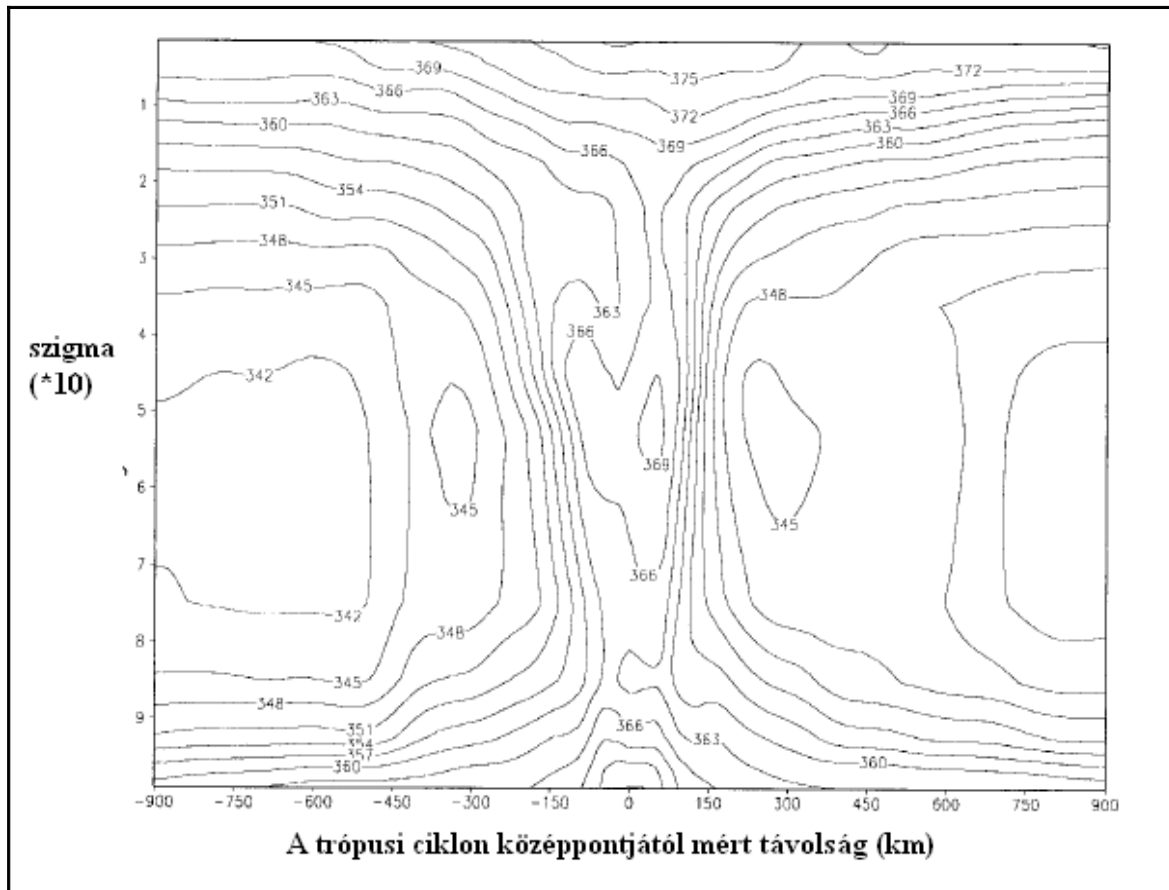
8. ábra. A nyugat-atlanti hurrikánokra jellemző átlagos radiális szélkomponens (u) vertikális keresztmetszete (baloldal), a pacifikus tájfunokra jellemző átlagos tangenciális szélkomponens (v) vertikális keresztmetszete (jobboldal) (Ming, 2002).

A trópusi ciklonokra jellemző hőmérsékleti értékek eltérnek az átlagtól olyan tekintetben, hogy a szem belsejében akár 10–15 °C-kal is magasabb lehet a hőmérséklet, s ennek következtében a felszíni nyomás még alacsonyabb lesz a dinamikus okokkal magyarázhatóan.

Tanulmány készült azzal kapcsolatban is, hogy a potenciális hőmérséklet és a nyomás között milyen összefüggés írható fel a trópusi ciklonokra vonatkozóan (Chan *et al.*, 2001). A szimulációban olyan trópusi ciklont vizsgáltak, ahol a minimális központi nyomás a vizsgált időtartam első 21 órájában gyorsan csökkent, majd a 21–27 óra közötti periódusban gyenge emelkedést mutatott. A következő 6 órában egyre jobban mélyülő fázis jelentkezett. A minimális tengerszinti légnyomás (MSLP) a 48 órás periódus folyamán 986-ról 927 hPa-ra csökkent. A trópusi ciklonok intenzitását az MSLP-t és a P_{\min} -t (minimális légnyomás) tekintve becsülni lehet a maximális potenciális hőmérséklet alapján a trópusi ciklon (nyomás szerinti) keresztmetszetéből. A kutatók a következő eredményt kapták:

$$P_{\min} - P_E = -2,5 (\Theta_{\max} - 350),$$

ahol P_E az 1000 hPa, a Θ_{\max} pedig a 48 órás periódus végén a középpontban (a szemben) mért maximális ekvivalens potenciális hőmérséklet, ami a vizsgált esetben 378 K-nek adódott.



9. ábra. Kelet-nyugat irányú vertikális keresztmetszet az ekvivalens potenciális hőmérsékletről a trópusi ciklonokban (*Chan et al., 2001*).

Ez az érték 930 hPa-os minimális nyomáshoz tartozik, ami a numerikus modellel szimulált 927 hPa-os értéktől alig tért el. Érdekeség, hogy a numerikus modell aszimmetrikus szélstruktúrát eredményezett. A maximális szélsébségű sáv (> 64 m/s) a trópusi ciklon középpontjától 50 km-re kelet-északkeletre helyezkedett el, míg a középpontban csak 6 m/s volt a szélsébség. A 40 m/s-os szelek a középponttól 100 km-es sugarú körben alakultak ki (*Chan et al., 2001*).

A trópusi ciklonok szerkezetének elemzése után térjünk rá mozgásukra, felbomlásuk körülményeire. Tapasztalati tény, hogy a trópusi ciklonok nem bomlanak fel meleg (> 27 °C) óceáni felszínnek felett – csakis hideg óceánok illetve szárazföldek felett (az elegendő látens hő hiánya miatt). A szárazföldek felett tapasztalható „pusztulásuk” oka még a növekvő felszíni súrlódás. Abban az esetben, amikor eljut egy-egy trópusi ciklon a nyugatias szelek övébe, és

felbomlik, az erős szélnyírásnak köszönhető. A rendszer leépülése (disszipációja) során megbomlik a be- és kiáramló levegő tömegegyensúlya, a trópusi ciklon középpontjában konvergencia és így nyomásnövekedés jön létre. Ez maga után vonja a beáramlás csökkenését, a belső feláramlás és a látens hőfelszabadulás csökkenését: a trópusi ciklon nem tudja pótolni a „fennmaradásához” szükséges energiát.

III. Érdekességek a trópusi ciklonokról

III. 1. A trópusi ciklonok gyakorisága

Ebben a fejezetben azt vizsgálom, hogy milyen tényezők befolyásolják a trópusi ciklonok előfordulásának gyakoriságát, felfedezhető-e valamilyen trend ezek gyakoriságában. Foglalkozom azzal a kérdéssel is, hogy milyen hasonlóságok és különbségek vannak a trópusi ciklonok és más alacsony nyomású légköri képződmények között.

A trópusi ciklonok előfordulásának gyakoriságában mutatkozó trendszerű változások megítélésében eltérő véleményekkel találkozunk. Egyes kutatók szerint a globális felmelegedés miatt gyakoribbá váltak a trópusi ciklonok, illetve a trópusi ciklonok miatt erősödik a globális felmelegedés (*Lakotár, 2010*). E hatást a következőképpen magyarázzák: a trópusi ciklonok gyorsan fejlődő felhőrendszere (akár 18 m/s-os felhőtető emelkedés) áttörheti a hideg tropopauzát. E közben az ózon jelenléte miatt melegebb sztratoszférába jégkristályokat juttatnak, amelyek az ottani nagyobb hőmérséklet miatt elpárolognak. Ismert tény, hogy a vízgőz az egyik legjelentősebb üvegházhatású gáz, amely sztratoszférabeli növekedése a Föld felszínének melegedéséhez vezet, s ez által a trópusi ciklonok hozzájárulnak a globális felmelegedéshez.

A trópusi ciklonok a meleg óceánok felett keletkeznek. Felvetődhet a kérdés, hogy vajon a felmelegedés fokozza-e a trópusi ciklonok intenzitását és gyakoriságát. Kutatók éghajlati modellfuttatások alapján megbecsülték, hogy várhatóan milyen gyakorisággal és milyen erősséggel fognak lecsapni a hurrikánok és tájfunok az elkövetkezendő 90 évben (a XXI. század végéig). Arra a következtetésre jutottak, hogy:

- a trópusi ciklonok gyakorisága csökken, vagy nem fog változni még a ~ 3 °C-os globális hőmérsékletnövekedést jelző éghajlati forgatókönyvek esetén sem,
- az évszázad végéig azonban nő a legnagyobb erejű szélviharok intenzitása, s
- nő a viharokkal járó csapadékmennyiség, illetve
- előfordulnak majd olyan területek, ahol a jelenleginél gyakrabban csapnak majd le a szélviharok (*Kurunczi, 2010*).

A trópusi ciklonok előfordulásának klimatológiai vizsgálata alapján a XX. század egészét tekintve nem tapasztaltak statisztikailag szignifikáns változást az atlanti térségben. Habár *Landsea (1993)* kutatásai során talált statisztikailag szignifikáns csökkenést az intenzív hurrikánok előfordulási gyakoriságában. Megfigyelések bizonyítják, hogy 1944-től az 1990-

es évek közepéig az Atlanti-óceán felett kialakuló trópusi ciklonok száma csökkent (*Landsea, 1993*). *Gray et al. (1997)* klimatológiai vizsgálatai során szintén nagy különbségeket talált a hurrikánok aktivitásában.

A tengerparti települések többsége a földfelszín megközelítő hurrikánok zónájában fekszik, így a gazdasági fejlődéssel egyre gyakoribbá váltak a hurrikánok okozta társadalmi hatások (*Pielke et al., 1998*). Vizsgálatok igazolják, hogy a hurrikánok nagymértékben hozzájárulnak a szélsőséges csapadékesemények kialakulásához nemcsak az Atlanti-óceán középső részén, de az Amerika Egyesült Államok New England-i részén is (*Evans et al., 1999*). Szélsőséges (5–6 éves) csapadékhullási periódusokat figyeltek meg a XX. század első felétől Massachusetts keleti felében, illetve az Appalache-hegység nagy részén, ami szintén a trópusi ciklonok aktivitásával hozható kapcsolatba (*Landsea et al., 2006*). A Csendes-óceán északi részén pedig az 1970-es évek óta a trópusi ciklonok aktivitása pozitív tendenciát mutat (*Chan et al., 1996*). A korábbi időszakban (az 1970-es évek előtt) viszont a Csendes-óceán nyugati részén csökkent a hurrikánok aktivitása. Így egy nemlineáris hosszú távú változás rajzolódik ki a trópusi ciklonok gyakoriságában. Ausztrália környékén az 1970-es évek óta figyelhető meg egy erőteljes csökkenő tendencia, ami nagyrészt az El Nino-ban és a Déli Oszcillációban bekövetkező változásoknak tudható be (*Nicholls et al., 1997*).

Tudott, hogy a trópusi ciklonok kialakulásához és fenntartásához meleg tengerfelszíni hőmérséklet szükséges. Ahogy a globális klíma melegszik, elsősorban a növekvő üvegházhatású gázok miatt, úgy növekszik az óceánfelszín hőmérséklete (SST) is azokon a területeken, ahol a hurrikánok keletkeznek. Elméletileg a hurrikánok így még intenzívebbé válhatnak, tehát a globális melegedés során egyre gyakoribbá válhatnak.

A hivatalos hurrikán szezon az észak-atlanti medencében júniusban kezdődik, a csúcstól szeptember elején éri el, majd novemberben megszűnik. Habár trópusi ciklonok elvétve keletkezhetnek ezen az időszakon kívül is. A hurrikán tevékenység növekedése és a hurrikánképződési szezon elején és végén megfigyelhető növekvő hurrikán aktivitás miatt felvetődik a kérdés, hogy a globális felmelegedés lehet-e bármilyen hatással a hurrikánszezon hosszúságára. A megfigyelések szerint a rövid élettartamú trópusi ciklonok esetén – ahol az élettartam kevesebb, mint 2 nap – növekvő tendenciát tapasztalunk, míg a közepes élettartamú, azaz több mint 2 napig létező rendszerekben nem található jelentősen növekvő tendencia. Összességében a trópusi ciklonok gyakorisága és intenzitása az Atlanti-óceán felett nőtt az elmúlt 30 évben a tengerfelszín hőmérsékletével együtt, de ez nem azt jelenti, hogy ezért a légkör antropogén eredetű változása lennének a felelősek. Ezzel a híres amerikai kutató, *Emanuel (2005)* nem ért egyet, hiszen egy cikkében a következőket publikálta:

„az intenzív hurrikánok növekedése figyelhető meg Földünkön, amely elsődleges okozója az antropogén eredetű globális felmelegedés”. Ezzel szemben *Landsea* (2006) feltárja, hogy *Emanuel* (2005) eredményeit hiányos adatokra alapozta, éppen ezért hibásak a következtetései is, s így összességében a hurrikánok intenzitása globális szinten nem növekszik.

A szakdolgozat készítése során számos érdekes cikkre bukkantam. Kutatók azt vizsgálták, hogy van-e valamilyen befolyással az óceánok színe a hurrikánok előfordulására, és sikerült bebizonyítaniuk, hogy az óceánok színének is lehet jelentős hatása a trópusi ciklonok kialakulásának gyakoriságára (*Gnanadesikan et al.*, 2010). Egy számítógépes szimulációban az bizonyosodott be, hogy a színváltozásnak megfelelően 70%-kal csökkent a hurrikánképződés a Csendes-óceán északi régiójában. A hurrikán erejű szelek nagyjából 50%-a ezeken a területeken alakul ki, ezért az előbb említett nagymértékű csökkenés drasztikus változásokhoz vezethet. A vizsgálat kimutatta, hogy a hurrikánképződés esélyét csökkentette a klorofill jelenléte. Tapasztalati tény, hogy elsősorban az, ami meghatározza az óceánok színét és hőmérsékletét, nem más, mint a fitoplankton. Az emberek többsége az óceánok színét kéknek látja, de valójában inkább a zöld különböző árnyalataiban játszik. Az, hogy az óceánok színe nem kék, jelentős hatással van a hurrikánok előfordulására.

A tanulmány arról is beszámol, hogy a biológiailag elszegényedett területeken a klorofill koncentráció és a tenger színének változása miként csökkenti a trópusi ciklonok kialakulásának az esélyét. A fent említett kutatók a hurrikánképződést számítógépes szimulációval vizsgálták. Először a műholdak által megmért klorofill koncentráció alapján hoztak létre egy modellt, majd ezt összehasonlították egy olyan modellel, ahol a csendes-óceáni szubtrópusi térség északi részén lévő óriási áramlás területén a klorofill koncentráció nulla értéket vesz fel. A kialakuló klorofill hiány módosította a szubtrópusi körben a légáramlást és a hőmérséklet eloszlást. Az Egyenlítő mentén 20%-kal nőtt meg a hurrikánok kialakulása. A szimulációk szerint idővel egyre több hurrikán érne el a Fülöp-szigeteket és a Vietnam körüli térséget, ezzel egy időben viszont Dél-Kína és Japán területén csökkenne a hurrikánok száma. Ha csökken a felszíni hőmérséklet, akkor egyrészt a hideg vízre kisebb energia leadás jellemző, másrészt sokkal szárazabbá válik a levegő, harmadrészt a megváltozó légáramlási viszonyok erős szeleket okoznak, ami akadályozza a hurrikánok kialakulásához szükséges szerkezet létrejöttét.

A trópusi ciklonok relatív gyakoriság változásáról a 2. táblázat tájékoztat (*Webster et al.*, 2005). Jól látszik, hogy minden óceáni medencében jelentősen megnövekedett a trópusi ciklonok száma, a legtöbb esetben 1,5-szeresére emelkedett az arányuk 1990–2004 között a korábbi 14 éves időszakhoz (1975–1989) képest. Kiugró változást látunk az Észak-Indiai

medencénél. Emellett a Délnyugat-Pacifikus medencében és a Dél-Indiai medencében is több mint 2-szeresére nőtt a gyakoriság.

	1975–1989	1990–2004
	[db]	[db]
Kelet-Pacifikus medence	36	49
Nyugat-Pacifikus medence	85	116
Észak-Atlanti medence	16	25
Délnyugat-Pacifikus medence	10	22
Észak-Indiai medence	1	7
Dél-Indiai medence	23	50
Összesen	171	269

2. táblázat. A trópusi ciklonok gyakorisága 1975 és 2004 között (*Webster et al.*, 2005).

III. 2. A trópusi ciklonok összehasonlítása más alacsony nyomású ciklonális rendszerekkel

A következőkben a trópusi ciklonok sajátosságait hasonlítom össze a mérsékeltövi, szubtrópusi és poláris ciklonokkal a következő szempontok szerint: légnyomás, skála,

cirkuláció, horizontális kiterjedés, felhőkarok száma, központi szélesség, élettartam, keletkezési terület, látens hő szerepe, mag (*Merics, 2009*).

A *trópusi ciklonok*nál ezek a karakterisztikák rendre a következők: 920 hPa, mezoskála, pozitív cirkuláció, 400–500 km horizontális kiterjedés, több felhőkar, 33 m/s szélesség, 1–4 napos élettartam, trópusi óceánok felett alakulnak ki, látens hő szerepe 95%, meleg mag.

A *szubtrópusi ciklonok*nál a következők az értékek: 950 hPa, mezoskála, pozitív cirkuláció, 400–500 km horizontális kiterjedés, több felhőkar, erősen viharos szélesség, 2–5 nap élettartam, szubtrópusi óceánok felett alakulnak ki, 90%-os a látens hő szerepe, hideg mag.

A *mérsékelt övi ciklonok*ra jellemzők: 970–1010 hPa, szinoptikus skála, pozitív cirkuláció, 1500–2000 km horizontális kiterjedés, kettő felhőkar, a szélesség néha viharos, 5–8 nap élettartam, mérsékelt és szubpoláris öv óceánjai felett alakulnak ki, a látens hő szerepe 40–60%, a mag hideg.

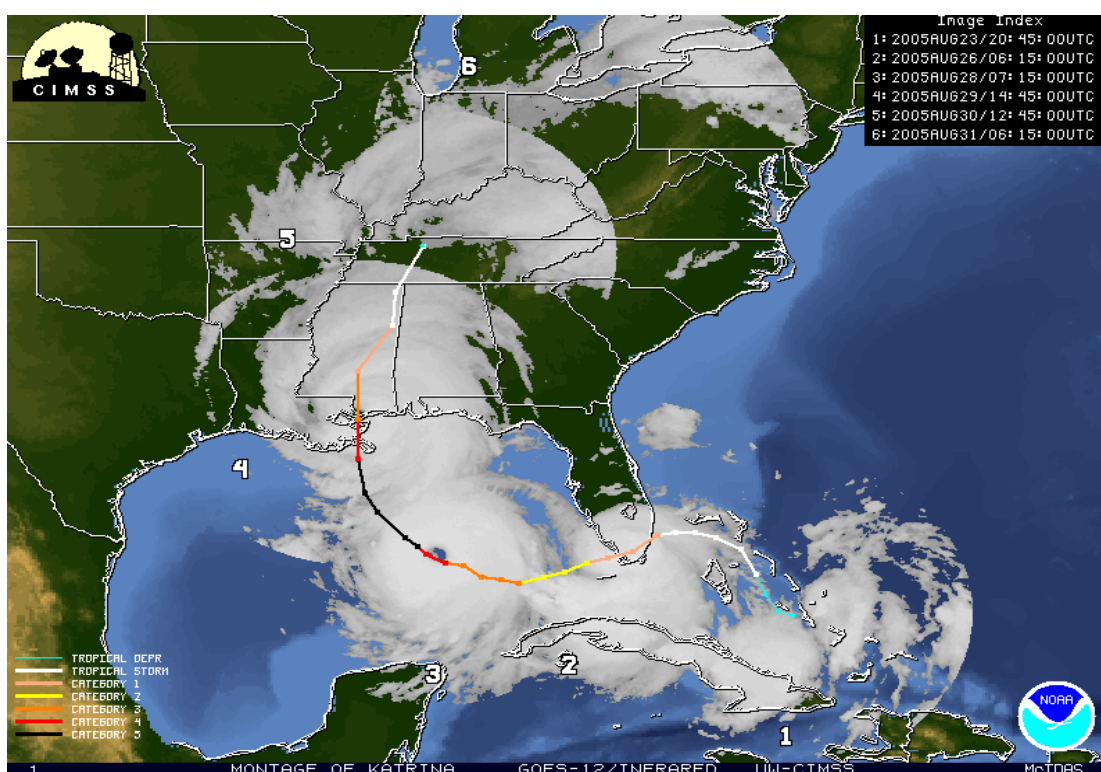
A *poláris ciklonok*nál: 965–1010 hPa, mezoskála, pozitív cirkuláció, 400–500 km-es horizontális kiterjedés, egy felhőkar, 15 m/s a központban a szélesség, 1–3 nap az élettartam, poláris öv óceánjai felett keletkezik, a látens hő szerepe 40–60%, és meleg mag jellemző.

A mérsékelt övi ciklonok kialakulásában a horizontális és vertikális szélnyírás is szerepet játszik, de ahogyan a kisebb mezoskálájú folyamatok felé haladnak, egyre fontosabbá válik a vertikális instabilitás (*Businger et al., 1989*) és a látens hőfelszabadulás. Az előbb felsorolt jellemzők alapján észrevehető, hogy a trópusi ciklonokhoz hasonlóan a poláris ciklonok középpontja is meleg, és a horizontális kiterjedésük is hasonló méreteket ölt, de a trópusi ciklonokban a szélesség sokkal nagyobb a nagy nyomási gradiens miatt. Míg a trópusi ciklonok több felhőkarral rendelkeznek, addig a poláris ciklonok maximum egy felhőszálllyal bírnak. A trópusi ciklonok gyakran érik el a viharos kategóriát, ezzel óriási pusztításokat okozva, addig a poláris ciklonok elsősorban a belőlük hulló nagy csapadékmennyiséggel okoznak károkat.

IV. A Katrina hurrikán

IV. 1. A Katrina hurrikán szinoptikus története, kialakulása, mozgása

A Katrina hurrikán (2005. augusztus) egy különösen erős és „halálos” hurrikán volt, amely rendkívüli katasztrófákat és károkat idézett elő, és számos emberéletet követelt. Ez volt az Amerikai Egyesült Államok történetének egyik legpusztítóbb eseménye, ami az országon valaha is áthaladó 5 legveszélyesebb hurrikán egyike volt. A Saffir–Simpson-skála alapján 1-es kategóriának megfelelő hurrikánként tombolt Dél-Floridában, majd miután elérte az 5. fokozatot a Mexikói-öböl központja felett, 3. kategóriájú hurrikánná gyengült az öböl északi részének megközelítése során. Óriási veszteségeket idézett elő nemcsak Louisiana, hanem Mississippi területén is. Minden tényezőt figyelembe véve bátran kijelenthetjük, hogy a Katrina hurrikán volt az egyik legpusztítóbb katasztrófa, mely az országot történelme során sújtotta (Knabb *et al.*, 2005).



10. ábra. A Katrina útvonala GOES–12 műhold által készített felvételen (<http://noaa.gov>).

A Katrina hurrikán keletkezése magában foglalja a következőket: egy trópusi hullám hatását, ez az úgynevezett „Trópusi Depresszió Tíz” (Tropical Depression Ten) – a 10. olyan trópusi ciklon, amely nem érte el a trópusi vihar fokozatot a 2005-ös Atlanti hurrikán szezonban – közép-troposzférikus maradványait, illetve egy felső-troposzférikus „völgyet” (Knabb *et al.*, 2005). Ez az előbb említett Bahamák felett elhelyezkedő völgy erős nyugatias nyírást idézett elő.

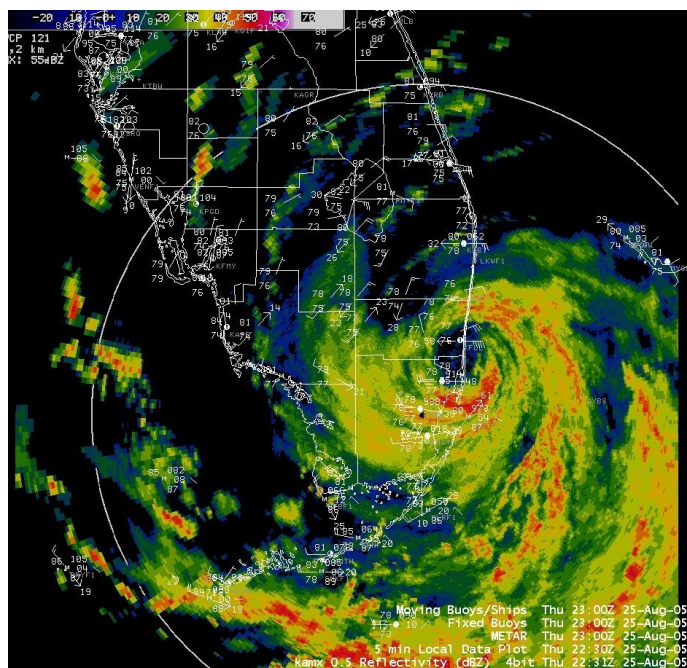
Az alacsonyszintű cirkuláció fokozatosan gyengült, miközben Barbados felől nyugat felé haladt, majd végül augusztus 21-én Kuba közelében eloszlott. Eközben a „Trópusi Depresszió Tízből” származó közép-troposzférikus cirkuláció leszakadt és észak felé mozogva elérte a Leeward-szigeteket augusztus 18–19-én. Ebben az időben egy augusztus 11-én még Afrika nyugati partjainál eltérült trópusi hullám haladt keresztül a Leeward-szigeteken, és beleolvadt a „Tópusi Depresszió Tíz” középső-troposzférikus maradványaiba augusztus 19-én. A felső-troposzférikus völgy folyamatosan gyengült, ahogyan nyugatra haladt Florida irányába, s közben a szélnyírás is mérséklődött annyira, hogy lehetővé tegye egy trópusi depresszió kialakulását a Bahamák felett (2005. augusztus 23. 18 UTC) (Knabb *et al.*, 2005).

A depressziót valójában inkább „Trópusi Depresszió Tizenkettőnek” (Tropical Depression Twelve) nevezték, mint Tíznek, mert úgy tűnt, hogy egy különálló trópusi hullám felelős részben a ciklogenezisért (a számozás a trópusi ciklonok sorszáma utal a 2005-ös atlanti hurrikán szezonban).

A nyomási depresszió egyre szervezettebbé vált augusztus 23-ra a Bahama-szigetekenél. Ezt követően az erősödő ciklon keleti részében a konvekció egyre nőtt, és augusztus 24-én a kora reggeli órákban már egy jól meghatározott sávot hozott létre, amely „nekilátott körbefogni” a cirkuláció központjának északi részét. A légi felderítős repülések mérési adatai alapján láthatóvá vált, hogy a Katrina kialakulásához vezető ciklon augusztus 24-én 12 UTC-kor már a Bahama-szigetek központja felett helyezkedett el. Az a ciklon, ami a Katrina létrejöttét okozta, abban az évben a 11. trópusi vihar volt. Ahogyan a viharban kifejlődött egy belső mag, úgy erősebb ciklonná alakult 24-én. A ciklon hatása alá került egy olyan gerincnek, ami a Mexikói-öböl északi része és az USA déli része felett jött létre. Ez a gerinc a Katrinát Dél-Florida felé fordította 25-én, s generált egy mély konvekciós intenzív feláramlást az alacsonyszintű központ felett, miközben északnyugat felé helyeződött. A ciklon tovább erősödött, míg végül elérte a hurrikán státuszt augusztus 25-én 21 UTC-kor. A Mexikói-öböl északi része és az USA déli része felett erősödő gerinc létrehozott egy olyan északkeleti irányú folyamatot, ami a középső-troposzférikusról a felső-troposzférikus szintre irányult, s

arra kényszerítette a Katrina hurrikánt, hogy nyugati-délnyugati irányba forduljon Florida déli partjainak való elérése után (*Knabb et al.*, 2005).

A Katrina elsőként 1-es kategóriájú hurrikánként ért a szárazföld fölé augusztus 25-én Miami–Dade és Broward megye határán, ekkor a rá jellemző szélesség már 70 csomó volt, azaz csaknem 130 km/h. A Doppler–radar által készített felvételeken (11. ábra) látható, hogy Dél-Florida felett a hurrikán aszimmetrikus mintázatú volt az északi szélnyírás következtében.

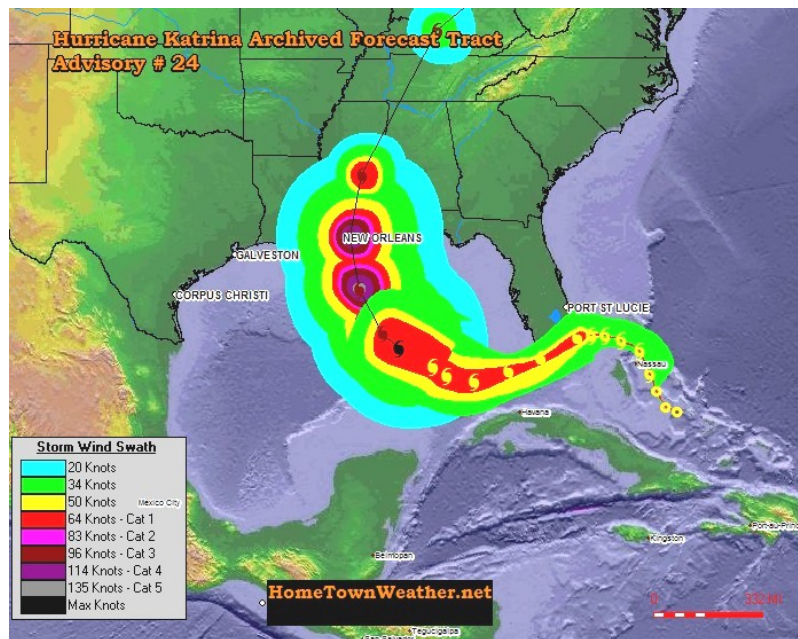


11. ábra. Doppler–radarral készített kép a Katrináról 2005. augusztus 25-én 22:31 UTC-kor Dél-Florida közelében (<http://noaa.gov>).

Ugyanezen a napon éjszaka nyugat-délnyugat felé haladt és mindössze 6 órát töltött a szárazföld felett. Felszíni megfigyelések és sebesség becslések alapján a Katrina Monroe megye felett gyengült trópusi viharra, amikor a szélesség már „csak” 112 km/h volt. A trópusi vihar központja ezután augusztus 26-án a Mexikói-öböl délkeleti területe felé áramlott, miután visszatért a vízfelszín felé, gyorsan visszanyerte a hurrikán erősséget (*Knabb et al.*, 2005).

Augusztus 26-án a Mexikói-öblöt egy anticiklon uralta, ami nagyon gyenge szélnyírást és hatékony felső szintű kiáramlást okozott. A Katrina 3. kategóriájú hurrikánná vált augusztus 26-án 185 km/h szélességgel a Mississippi folyó környékén. A nap hátralévő részében szerkezeti változások történtek: a belső szemfal lebomlott, majd egy új, külső szemfal alakult ki, 27-én pedig majdnem kétszeresére nőtt a hurrikán mérete. Az erős középső-troposzférát a

felső-troposzférával összekötő gerinc a Katrinát nyugat-délnyugat irányú pályán tartotta, majd végül kelet felé mozdította. Ez a folyamat azt eredményezte, hogy augusztus 28-án már északnyugat felé mozdult. Az új szemfal összezsugorodott egy élesen meghatározott gyűrűvé, majd egy még gyorsabb erősödés következett be. A Katrina kevesebb, mint 12 óra alatt növekedett ismét 3-as kategóriából 5-ös kategóriájú hurrikánná, ezzel elérve a 260 km/h sebességet is (12. ábra) (Knabb et al., 2005).



12. ábra. A Katrinára jellemző szélesség az útvonala során (37–250 km/h között) (<http://hometownweather.net>).

Ezek a strukturális változások valószínűleg hozzájárultak a gyors gyengüléshez. Észak felé történő haladásával 29-én 11 UTC-kor érte el Louisiana államot 203 km/h szélességgel. Folytatta útját ebben az irányban, és Louisiana és Mississippi állam határán már csak 3-as kategóriájú hurrikán volt, de a gyengülés ellenére a mérete továbbra is óriási volt, és a hurrikán erejű szelek is tomboltak. A gyengülésben közrejátszott a fokozatosan növekvő szélnyírás, az egyre alacsonyabb óceáni hőmérséklet és a szárazfölddel való kölcsönhatás. A Katrina hurrikán, ahogyan áthaladt Mississippi államon, gyorsan gyengült és 29-én 18 UTC-kor 1-es kategóriájúvá vált. Ezután 6 órával trópusi viharra „szelődült”, majd amint északkelet felé fordult, augusztus 30-án 12 UTC-kor a Tennessee-völgy felett trópusi depresszióvá alakult. Végül augusztus 31-én 00 UTC-kor trópusi alacsony nyomású rendszerré vált.

IV. 2. Meteorológiai statisztikák a Katrina hurrikánban

A Katrina hurrikánra jellemző statisztikák vizsgálatához figyelemmel kell kísérni a műholdak, a repülőgépes mérések, továbbá a radarok és a szinoptikus állomáshálózat adatait, illetve a magas légköri megfigyeléseket (pl. rádiószondás adatok). Emellett fontosak az úgynevezett „C-MAN” állomások (Coastal Marine Automated Network) és a NOS (National Ocean Service) állomáshálózat adatai, valamint a tengeri bóják és hajók által végzett mérések is. Az eredmények elemzését azonban nehezíti a hurrikán okozta áramkimaradások miatt esetenként bekövetkező adathiány.

A műholdas adatok feldolgozásában, a Katrina pályájának és szerkezetváltozásainak követésében a következő intézetek, illetve szervezetek játszották a legfontosabb szerepet: Satellite Analysis Branch (SAB), U.S. Air Force Weather Agency (AFWA), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), és QuickSAT. Az ő általuk publikált adatok, cikkek alapján ismerkedtem meg a hurrikán tulajdonságaival, s követtem a fejlődését.

A légi felderítő repülések során megfigyelték a Katrina „életét”; 12 küldetést végeztek a szélsébség mérésére. Az NWS WSR-88D Doppler-radarral szerte az USA délkeleti részén végeztek méréseket, a kapott adatok alapján becsülték a várható intenzitást a szárazföld közelében. Augusztus 25-én 22:30 UTC-kor 70 csomós, azaz mintegy 130 km/h-s szélsébséget mértek Florida közelében. A Miami radar és a NOAA hurrikán vadász repülőgépe azt is jelezte, hogy a Katrina már jóval korábban, augusztus 21-én belépett a hurrikán kategóriába 120 km/h-val. Annak következtében, hogy a hurrikánra erősen aszimmetrikus konvektív mintázat volt jellemző a Florida-félszigeten történő áthaladásakor, a leghevesebb szelek Miami-Dade megyétől délre és keletre fekvő területeket sújtották (*Knabb et al.*, 2005).

Ahogy augusztus 26-án a hurrikán szeme nyugat-délnyugat felé mozgott Miami-Dade északi része felett a National Hurricane Center egy létesítménye felett, a nyomás még csak 983 hPa volt. Néhány perccel később a keleti szemfal haladt át a létesítmény felett. Ekkor a 10 perces szélsébség 120 km/h volt, míg a szélökések sebessége meghaladta a 140 km/h-t. A Doppler-radarral mért adatok arra utalnak, hogy amikor a Katrina Monroe megye felett helyezkedett el, illetve Florida partjainál délnyugatra haladt, a maximális tartós szelek valószínűleg alacsonyabbak voltak, mint ami a hurrikán erősségnek megfelelő. Az adatok azonban azt bizonyítják, hogy miután a Katrina áthaladt a Mexikói-öblön augusztus 26-án, visszanyerte a hurrikán erősséget (*Knabb et al.*, 2005). Tartós hurrikán erejű szeleket csak

Floridában jelentettek, a part menti szigetek többségén csak trópusi vihar erejű szeleket mértek. A repülőgépes mérések alapján elmondható, hogy ezen a napon tovább erősödött a hurrikán, ez a következő napon is folytatódott, s augusztus 27-én már 185 km/h sebesség is jelentkezett. Miután létrejött egy új szemfal 28-án, egyre nagyobb mértékű erősödés következett be. A legerősebb szél, amit repülőgépek mértek, 290 km/h körül mozgott.



13. ábra. Doppler–radarral készített felvétel a Katrináról 2005. augusztus 29-én 06:39 UTC-kor, mely az eső, hó és jég tartalmat ábrázolja (<http://weather.com>).

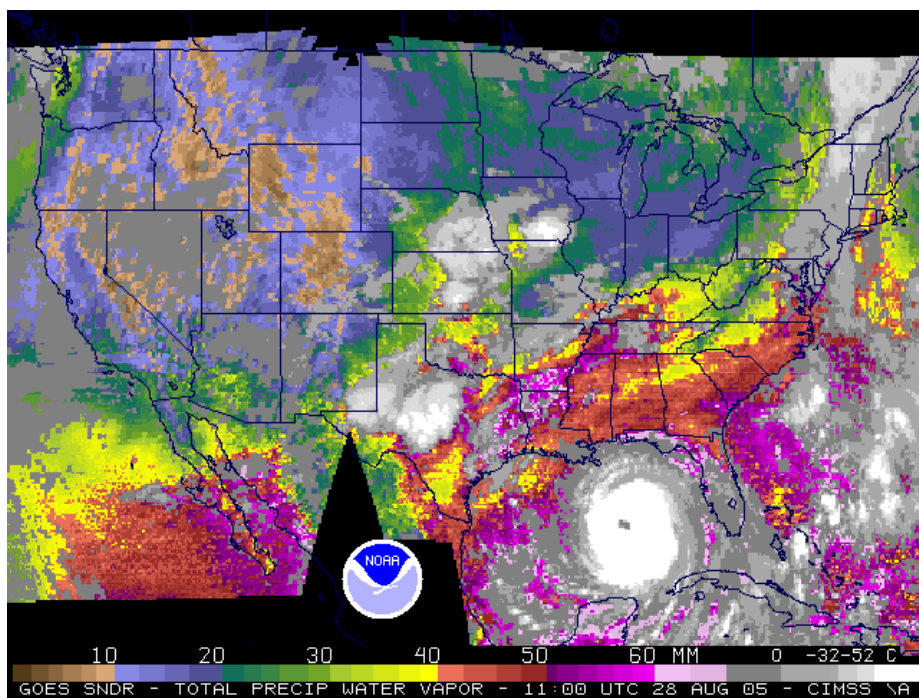
A központi nyomás változására jellemző, hogy augusztus 28-án 18 UTC-kor hirtelen 902 hPa-ra esett, ami az Atlanti-medencében az addig mért egyik legalacsonyabb nyomás volt. Érdekességként érdemes megemlíteni, hogy 1988-ban a Gilbert hurrikánra 888 hPa, 1935-ben a Labor Day hurrikánra 892 hPa, 1980-ban az Allan hurrikánra 899 hPa, 2005-ben a Rita hurrikánra 897 hPa, míg ugyanebben az évben a Wilma hurrikánra 882 hPa volt jellemző.

Augusztus 28-áról 29-ére virradóra drámai változás következett be a Katrina szerkezetében. A nyomás növekedésnek indult, ahogyan a hurrikán közeledett Louisiana állam felé, s elérte a 920 hPa-t. A repülőgépes mérések alapján kiderült, hogy a szerkezeti változások kapcsolatban álltak azzal, hogy a Katrina Louisiana elérése előtt nagyon gyorsan gyengült 3. kategóriájú hurrikánná. Ekkor a 10 m-es magasságban elhelyezett szélmérők már „csak” 185 km/h-s sebességet mutattak. A legnagyobb pálya intenzitás röviddel azután következett be, hogy elérte Louisiana államot. Ekkor a központi nyomás 923 hPa volt. A központi nyomás (a szemben mért érték) az elkövetkezendő napokban tovább emelkedett, s amikor Louisiana és Mississippi állam határát megközelítette, a nyomás már 928 hPa-ra nőtt

(Knabb et al., 2005). A szélsőséggel kapcsolatos mérések kimutatták, hogy a legerősebb jelentett szélökés, ami ugyan nem hivatalos állomásról származott, 216 km/h volt Mississippi államban, de 180–200 km/h-s adatokat is jelentettek. Augusztus 29-én hivatalos mérőállomásról származó adat alapján a legerősebb szélökés 183 km/h volt.

A Katrina hatalmas viharerősödést okozott, ami a rendszer óriási méretével magyarázható. Ennek köszönhetően a Katrina jelentős áradásokat keltett, ami erős hullámmozgást indított el a Mexikói-öbölben. Sőt, a National Data Buoy által működtetett, Alabama közelében elhelyezett 42040 bója 9 m magas szignifikáns hullámokról adott jelentést augusztus 29-én. Később ugyanez a bója rekord méretű hullámokról adott hírt, ami elérte a 16 m-t is. Összességében véve tehát kijelenthetjük, hogy a viharerősödést a hurrikán nagy horizontális kiterjedése okozta.

Néhány adatot szeretnék bemutatni csapadékösszegek mérése alapján is (14. ábra): Floridában 310 mm, Cutler Ridge-nél 280 mm, Miami és Broward megyében átlagosan 50–100 mm, Florida-félsziget déli részén csak 30–70 mm, Louisiana délkeleti és Mississippi délnyugati területén 200–250 mm, Mississippi északi részén és Tennessee államban 100–200 mm csapadékösszegek adódtak.



14. ábra. A kihullható víztartalom a Katrina hurrikánban 2005. augusztus 28-án 11 UTC-kor (<http://noaa.gov>).

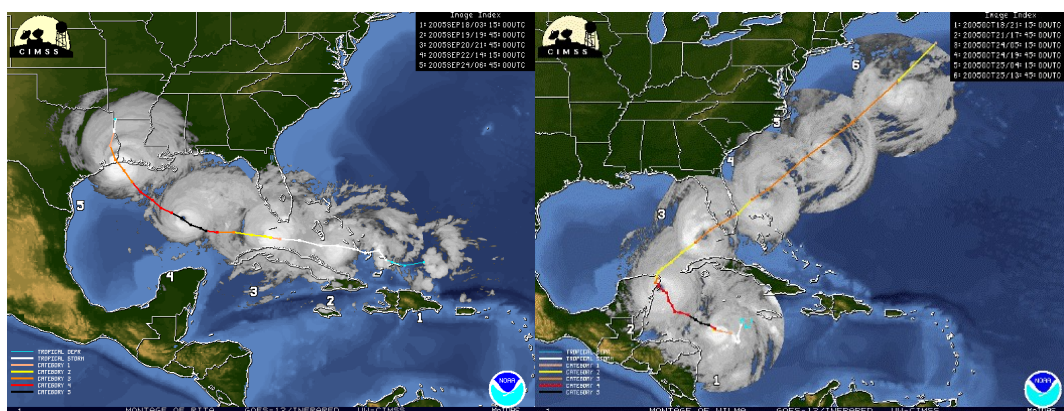
A Katrina hurrikán 43 tornádó kialakulásához vezetett; az egyikük augusztus 26-án reggel Florida Keys-nél csapott le, augusztus 29–30-án pedig 20 db Georgia, 11 db Alabama és 11 db Mississippi államban alakult ki. A Georgia területén létrejövő tornádók rekordméretűek voltak, amelyek sajnos halálos áldozatot is követeltek.

IV. 3. A Katrina hurrikán belső szerkezetének összehasonlítása a Rita és Wilma hurrikánnal

Ebben a fejezetben a WRF (Weather Research and Forecasting) nagyfelbontású szimulációi alapján hasonlítom össze az alcímben említett 3 hurrikán belső magjának strukturális jellemzőit. Mielőtt ezt ismertetném, röviden említést teszek a Rita és a Wilma hurrikán általános tulajdonságairól (*Knabb et al., 2006, Pasch et al., 2006*).

A Rita hurrikán egy nagyon intenzív hurrikán volt. 2005. szeptember 18–26. között pusztított; a Saffir–Simpson-skálán elérte a Mexikói-öböl felett az 5-ös fokozatot (*Knabb et al., 2006*). Ezen a területen ez volt a 4. legalacsonyabb központi nyomással rendelkező hurrikán az Atlanti-medencében. Az ugyan igaz, hogy mielőtt elérte Louisiana és Texas állam határát, 3. kategóriájúvá gyengült, de így is sikerült lerombolnia Délnyugat-Louisiana part menti településeit, és az általa okozott heves szelek és esőzések és a nyomában kialakuló tornádók óriási károkat okoztak Texas keleti részétől Alabamáig, illetve Florida Keys-nél a vihar árvíz kialakulásához vezetett (*Knabb et al., 2006*).

A Wilma hurrikán 2005. október 15-25. között „tevékenykedett”. A Karib-tenger északnyugati része felett jött létre. Ez volt minden idők legalacsonyabb központi nyomással bíró hurrikánja. Rendkívül nagy pusztítást vitt véghez a Yucatan-félsziget északkeleti területén, illetve Dél-Floridában (*Pasch et al., 2006*).



15. ábra. A bal oldali ábrán a Rita hurrikán, a jobb oldalin a Wilma hurrikán útvonala látható (összehasonlításképpen a Katrina pályáját bemutató 10. ábrával) (<http://noaa.gov>).

A WRF modell segítségével a NCAR (National Center for Atmospheric Research) valós idejű és visszamenőleges előrejelzéseket készített az atlanti- és a csendes-óceáni trópusi ciklonokra. Az intenzitás és a pályahibák ellenőrzése során a WRF előrejelzései megmutatták, hogy a 4 km-es felbontású (nem-hidrosztatikus) szimulációk jobban működtek, mint sok esetben az NHC (National Hurricane Center) hivatalos előrejelzései és más operatív előrejelzési rendszerek. Az 1,33 km-es horizontális rácshálózat használatával végzett

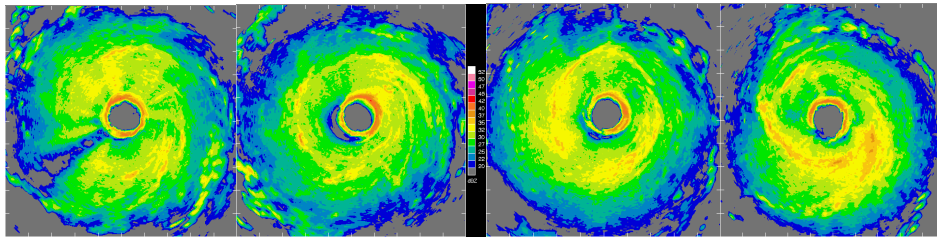
szimulációk – érdekes módon – a 4 km-es felbontásúnál sokkal kevésbé bizonyultak sikeresnek (*valószínű a lokális instabilitások modellbeli felerősödése miatt*). A modell vizsgálatok fő tárgya a szem, a szemfal és a belső spirális esősáv volt. Szokatlanul nagyszámú sokszög alakú szemfal alakzatot észleltek mind a 4 km-es, mind az 1,33 km-es rácson (lásd a 16. és a 17. ábra). Megjegyezzük, hogy a WRF trópusi ciklon szimulációiban gyakran fedezhetők fel háromszög, négyszög és nagyobb hullámszámú sokszög alakú szemfalak (*Corbosiero et al., 2007*).

Hurrikán/ Modell	Katrina hurrikán	Rita hurrikán	Wilma hurrikán
valósidejű AHW 2.1 felbontás: 4 km	–	szept. 23. 00 UTC –szept. 24. 12 UTC, a háromszög alakú szemfal egyre elkülönül, ahogy közelít Texashoz	okt. 20. 00 UTC – okt. 24. 00 UTC, háromszög alakú szemfal többször is
visszamenőleges AHW 2.1 felbontás: 1,33 km	augusztus 28-án 17–20 UTC négyszög alakú szemfal, 21 UTC-kor háromszögbe ment át	Szept. 21. 18 UTC – szept. 23. 12 UTC, bővelkedik háromszög és ötszög alakban	–
visszamenőleges AHW 2.2 felbontás: 1,33 km	augusztus 28. 00 UTC–augusztus 29. 12 UTC, több lekerekített négyszög és háromszög alakú szemfal	–	–

3. táblázat. A Katrina, a Rita és a Wilma hurrikán magjának (szemének) összehasonlítása (*Knabb et al., 2005, 2006, Pasch et al., 2006*). AHW 2.1 – **A**dvanced Research **H**urricane **W**RF modell előrejelzése (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/hurricanes/wrf_ahw.html).

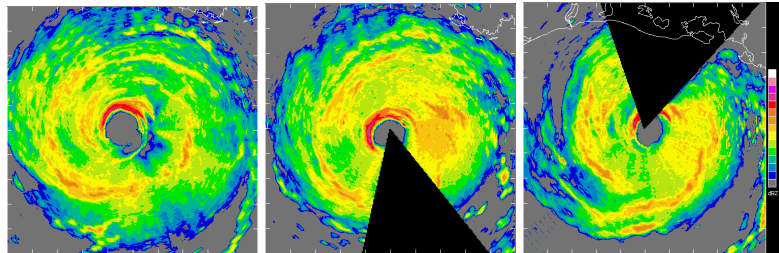
A következőkben a Katrina, a Rita és a Wilma hurrikán szemfalát jellemző tulajdonságokat foglalom össze (3. táblázat). Érdekességként érdemes megemlíteni, hogy a sokszög alakú szemfalak azóta vannak dokumentálva, hogy elkészültek az első radar képek a trópusi ciklonokról, de csak a közelmúltban alakult ki a magyarázatuk, méghozzá a barotróp instabilitással. A trópusi ciklonok gyors intenzívebbé válását a szemfal belső sarkában kialakuló potenciális örvényességi gyűrűkkel magyarázzák. Ha a potenciális örvényesség hullámai „fáziszárttá” válnak, akkor koncentrikusan növekednek és instabilitáshoz vezetnek, s

mezoörvények alakulnak ki. Ha 2 mezoörvény jön létre, akkor elliptikus, ha 3, akkor háromszög alakú, ha 4 vagy több mezoörvény keletkezik, akkor sokszög alakú szemfal formálódik. Míg a legtöbb sokszög alakú szemfal rövid életű – kevesebb, mint 2–3 óra az élettartamuk –, és könnyen változtatják a formájukat, addig a WRF szimulációkban sikerült olyat találni, amikor a trópusi ciklon sokkal több órára „beragadt” abba a bizonyos alakzatba. Az alábbiakban egy képsorozatot mutatok be, amelyek a Katrina hurrikánról készültek augusztus 28-án; ezeken nincs jele a sokszög alakú szemfalnak, ezzel ellentétben a WRF modell eredményekben háromszög és négyszög alak is felfedezhető.



16. ábra. 2005. augusztus 28-án Noaa P–3 típusú radarral készített képek 17:53, 19:30, 22:33 és 23:47 UTC-kor a Katrina hurrikánról (www.atmos.ucla.edu/).

A Rita hurrikánban 2005. szeptember 23-án 21:53 UTC-kor készített felvételeken az ellipszis forma is felfedezhető.

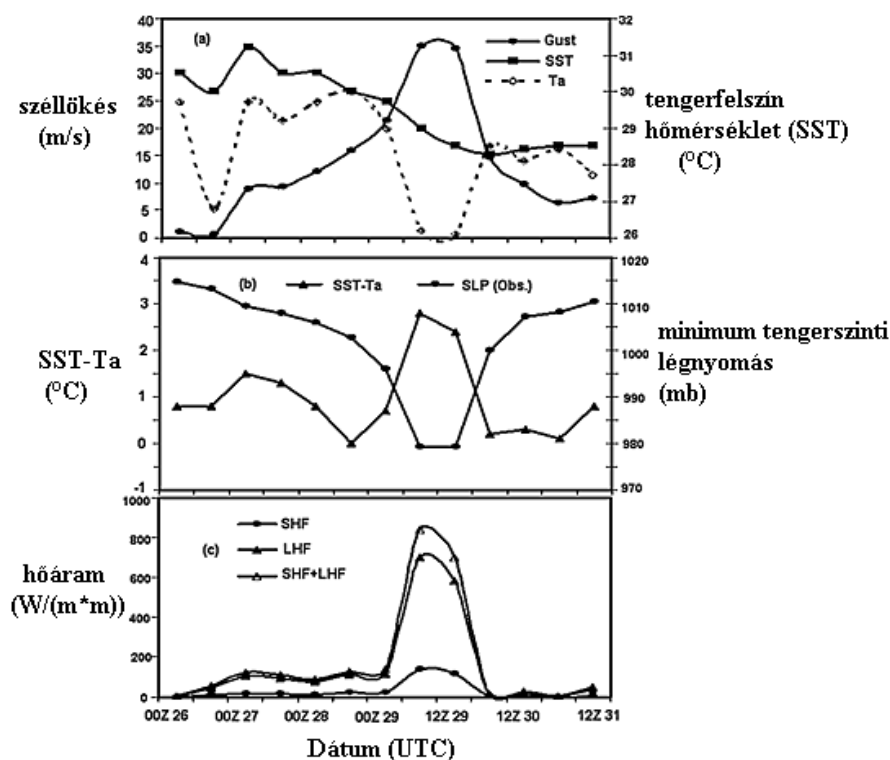


17. ábra. 16:58, 17:44 és 21:53 UTC-kor Noaa–3 típusú radarral készített képek a Rita hurrikánról 2005. szeptember 23-án (www.atmos.ucla.edu/).

IV. 4. A meleg tengervíz szerepe a Katrina hurrikán intenzitásában

A 2005-ös év számos erős hurrikánnal szolgált a Mexikói-öbölben, melyek hatalmas pusztítást okoztak az öböl partján fekvő államokban. Az egyik legpusztítóbb hurrikán kétségkívül a Katrina volt. Ebben a részben azokat a kutatásokat ismertetem, amelyek a

tengerfelszín hőmérséklet és a hurrikánaktivitás között keresnek kapcsolatot. Példaként a Katrina jelentős intenzitásnövekedésekor nagy SST-t (tengerfelszín hőmérsékletet) észleltek. Nem elég csupán a magas SST, fontos annak a térbeli és időbeli megegyezése a hurrikán útvonalával. A kutatások során figyelemmel kísérték a látens hő áramlását (LHF – latent heat flux), ami szintén hozzájárult a Katrina erősödéséhez (Kafatos et al., 2006).



18. ábra. A) szellőkés, SST (tengerfelszín hőmérséklet), Ta (léghőmérséklet) időszora, b) tengerszinti légnyomás (SLP) és óceán-légkör hőmérséklet kontraszt, c) szenzibilis hőáram (SHF) és látens hőáram (LHF) 42040 bója megfigyelései alapján (Kafatos et al., 2006).

Amint látható (18. ábra), az Alabama állam környékén elhelyezett, a Katrina pályáját érintő 42040 bója körülbelül már két nappal azelőtt jelzett 30 °C feletti SST-t, hogy a Katrina elérte a maximális intenzitást vagy szélsőséget. A párolgási hűtés eredményeként a 27 °C-nál nagyobb tengerfelszín hőmérsékletű környezetben a levegő hőmérséklete (Ta) jelentősen nőtt, s a tenger és a levegő hőmérséklete közötti különbség (SST – Ta) is elérte maximális értékét, pontosan akkor, amikor a hurrikán intenzitása is maximális volt. A megnövekedett levegő-óceán közötti hőmérsékleti kontraszt egyre erősödő szenzibilis és látens hőcserét okozott. A bója által végzett megfigyelések alapján kiszámolták a szenzibilis hőáram (SHF) és a látens hőáram (LHF) értékét. A következő képletek adódtak:

$$\text{SHF} = \rho_A C_p C_s U_{10} (\text{SST} - T_A), \quad \text{LHF} = \rho_A L C_E U_{10} (q_s - q_a),$$

ahol ρ_A a levegő sűrűsége, q_s a vízfelszín feletti specifikus nedvesség, q_a a levegő specifikus nedvessége, U_{10} a szélesség 10 m-es magasságban, L a fázisátalakulási hő, C_p a levegő állandó nyomáson vett fajhője, C_s és C_E együtthatók (elsőrendű lezárás).

Az eredmények azt mutatták, hogy a szenzibilis és a látens hőáram akkor volt a legnagyobb, amikor a hurrikán maximális intenzitással rendelkezett. Ennek oka a légkör és óceán között lezajló hőcsere, amely során a viharok energiát kapnak a meleg óceántól. A megfigyelések szerint, a viharintenzitás változása jól korrelált a tenger és a levegő közötti hőmérsékleti és nedvességi kontraszttal. Numerikus modell szimulációk alapján kiderült, hogy a maximális látens hőáram (LHF) értékek térbeli eloszlása az intenzív szakaszokban a vihar pályájának jobb oldalán helyezkedtek el. Itt a szelek is erősebbek voltak, és több volt a kihullható víztartalom. A kutatók szerint az LHF az egyik fő tényező, ami meghatározza a hurrikán energiaháztartását, s így fontos szerepet játszik a trópusi ciklonok fejlődésében és erősödésében. A Katrina – ahogy korábban láttuk – gyorsan vált 5-ös kategóriájú hurrikánná, amikor áthaladt a Mexikói-öböl felett s pályáján magas tengerfelszín hőmérséklet felett mozgott (*Kafatos et al.*, 2006). Ez is bizonyítja, hogy a magas SST a pálya jobb oldalán kiemelkedő tényező lehet a hurrikán erősség szempontjából. (*A modell szimulációk is kimutatták, hogy a maximális LHF értékek mindig a viharpálya északkeleti negyedében adódtak.*) A fenti egyenletekből láthatjuk, hogy az LHF függ a szélességtől és az SST-től. A vizsgálatok kimutatták, hogy amikor az LHF érték emelkedett és elérte maximumát augusztus 28. és 29. között, a Katrina nagy mennyiségű energiát kapott az óceántól, amit „felhalmozott”. Ekkor a központi nyomás (SLP) értéke elérte a legalacsonyabb értéket, s ezzel együtt a hurrikán a legnagyobb intenzitást.

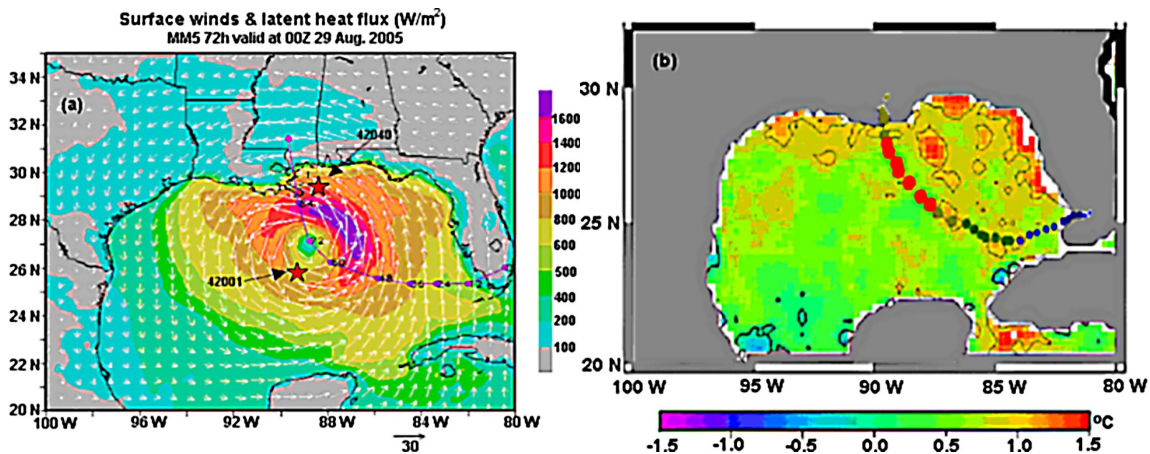
A kutatók felhasználták a 42001 számú bója megfigyeléseit is, s ugyanúgy a fenti egyenletek alapján kiszámolták az LHF-et. A C_E együttható értéke függ a szélességtől (*Cione et al.*, 1999, *Bentamy et al.*, 2003), de a dolgozatban már sokat említett *Emanuel* (2005) szerint hőmérsékletfüggő is. Két módszer terjedt el a C_E meghatározására. Az egyik szerint az együttható lineárisan nő a szélességgel, ez az úgynevezett *Cione*-módszer (*Cione et al.*, 1999):

$$C_E = (0,75 + 0,067 U_{10}) * 10^{-3}.$$

A másik az úgynevezett Bentamy–módszer, miszerint az együttható csökken a szélesebséggel (*természetesen a szenzibilis és a látens hőáram növekszik a szélesebséggel a korábban ismertetett képlet alapján*). C_E alakja Bentamy et al. (2003) szerint:

$$C_E = (a \exp(b(U_{10} + c)) + d / (U_{10} + 1)) * 10^{-3},$$

ahol $a = -0,146$; $b = -0,292$; $c = -2,206049$; $d = ,6112292$. A Bentamy–módszer alapján számított LHF értékek a maximális hurrikán intenzitás során fele akkoraak voltak, mint a Cione–módszerrel számítottak. A látens hőáram (LHF) térbeli és időbeli eloszlása azonban mindkét módszernél hasonló volt. A maximális látens hőáram (LHF) értékek mindig a vihar pályájának jobb oldalán adódnak, ami egybeesik a meleg SST elhelyezkedésével.



19. ábra. A bal oldalin az MM5 mezoskálájú modell által szimulált pálya, szél és LHF (látens hőáram) értékek láthatók 72 órás időtartamban 2005. augusztus 29-én 00 UTC-kor. A 42040 és 42001 bójákat piros csillagok jelölik. A jobb oldali ábrán 8 éves átlagban látható a heti SST (tengerfelszín hőmérséklet) anomália, a különböző színű körök a Katrina pályáját és intenzitását jelzik (Kafatos et al., 2006).

IV. 5. A kihullható víztartalom és a labilitási energia változása a Katrina hurrikánban

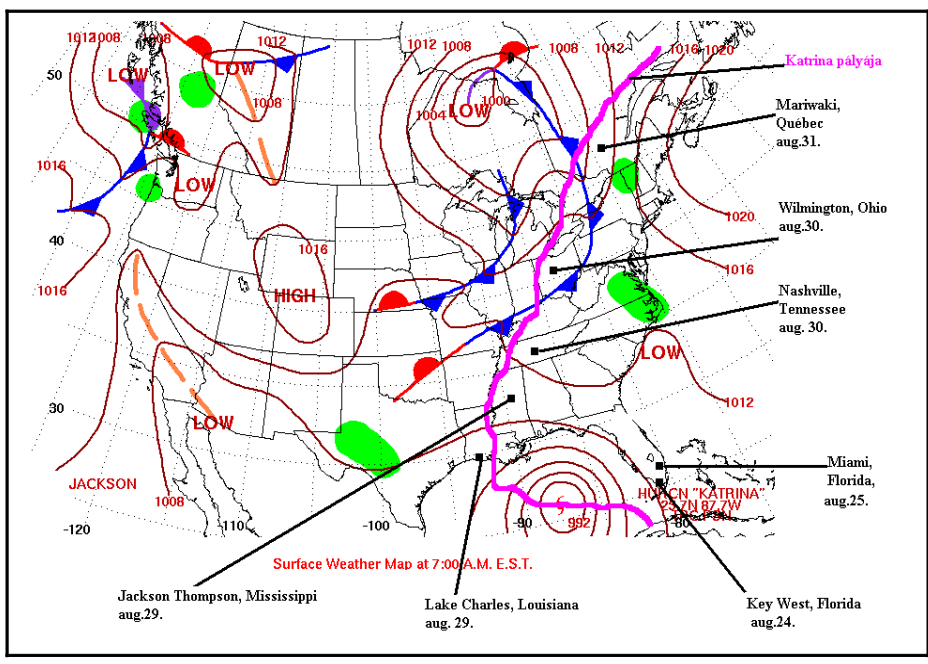
Ebben a részben a Wyoming-i Egyetem rádiószondás felszállási adatai alapján elemzem a Katrina hurrikán útvonala során a labilitási energia és kihullható víztartalom

értékeket. Először röviden összegzem a hurrikán útvonalát a National Hurricane Center adatainak felhasználásával a szinoptikus térképek tükrében (20–23. ábra).

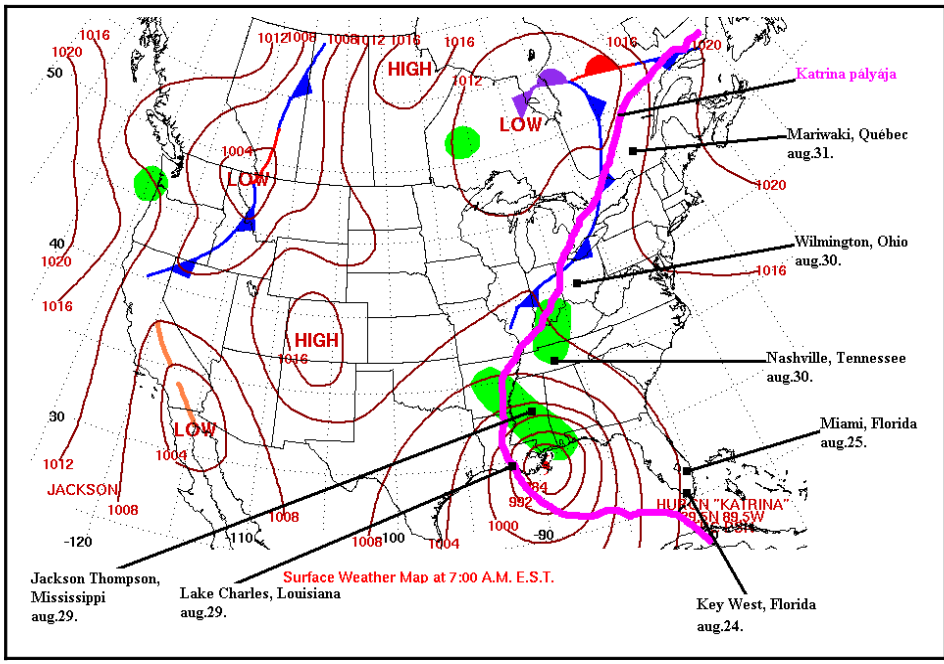
A Katrina hurrikán kialakulása – ahogy azt már korábban említettük – a Bahama-szigetek középpontjában, augusztus 23-án kezdődött trópusi depresszióként. Ekkor a jellemző maximális szélesség 47 km/h volt. Majd északnyugat felé mozogva, Dél-Floridát elérve vált trópusi viharrá augusztus 24-én, az uralkodó szélesség 53-80 km/h között váltakozott. Augusztus 25-én, amikor Miami–Dade és Broward megye határa fölött a felszín közelbe ért, hurrikánná alakult, s ekkor már a 100 km/h szélességet is elérte. Augusztus 26-án lépett be a Mexikói-öbölbe – 134 és 154 km/h szélesség –, majd még jelentősebben erősödött, s elérte az 5. kategóriának megfelelő intenzitást augusztus 28-án. Ezután északnyugatra fordult, s Louisiana állam felé ért augusztus 29-én, ekkor rekord erősségű, 200–230 km/h szélesség volt mérhető. Később, ahogyan északkelet felé haladt egyre gyengült, míg végül trópusi depresszióvá mérséklődött a ciklon Tennessee-völgy felett augusztus 30-án, ekkor már csak átlagosan 50 km/h volt a jellemző érték. Végül egészen Kanadáig, Québec államig jutott, végül megszűnt augusztus 31-én (20–23. ábra).

A szinoptikus és mezoskálájú analízisben előszeretettel használják a rendelkezésre álló konvektív potenciális energiát, vagy más néven a labilitási energiát (CAPE = Convective Available Potential Energy), valamint a kihullható víztartalmat. Mindkét érték egyszerűen meghatározható a rádiószondás mérések segítségével a hőmérséklet, a relatív nedvesség és a légköri víztartalom alapján (*Havasi et al.*, 2010).

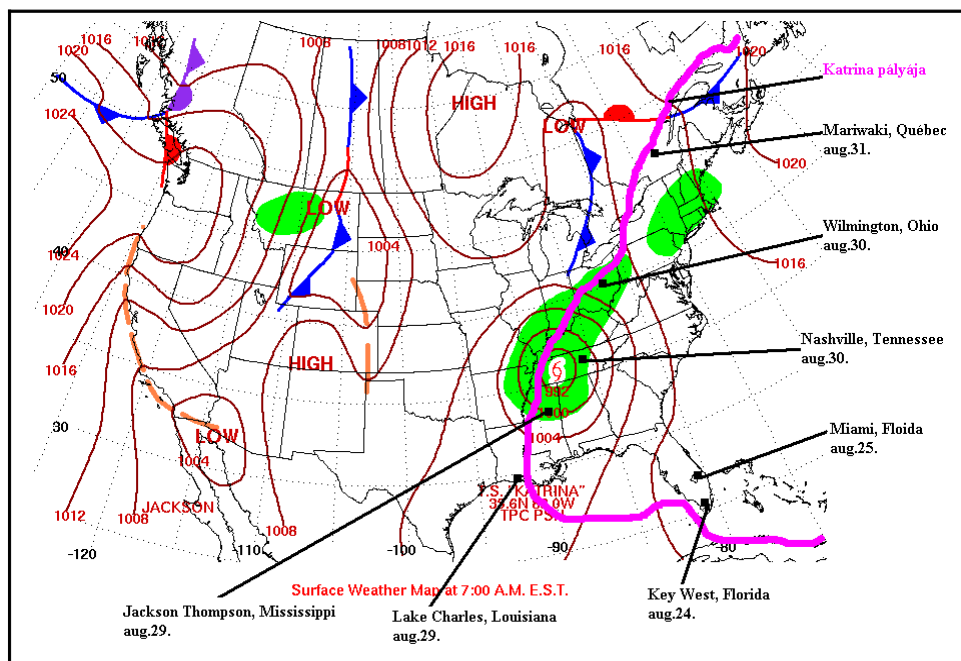
A következő lépésként e két paramétert határoztuk meg a hurrikán útjába eső rádiószondás felszállások adataiból. A következő 7 állomás adatait használom fel: Key West (Florida), Miami (Florida), Lake Charles (Louisiana), Jackson Thompson (Mississippi), Nashville (Tennessee), Wilmington (Ohio) és Mariwaki (Québec). Mindegyik esetben azt az időszakot vizsgáltam, amikor a hurrikán átvonult az állomáson.



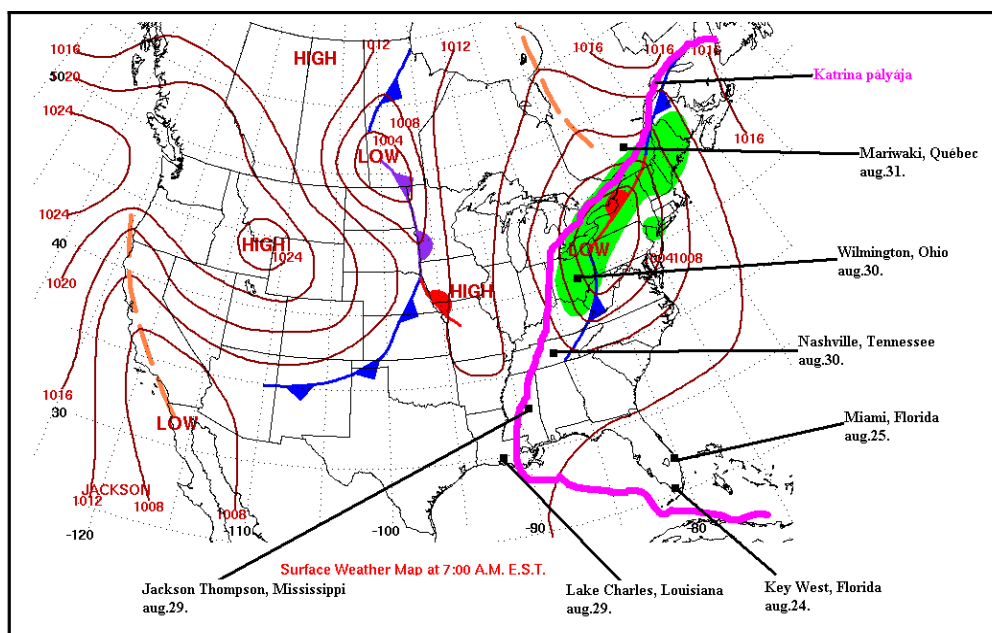
20. ábra. Szinoptikus térkép (2005. augusztus 28. 07 UTC), Katrina a Mexikói-öböl felett (http://www.hpc.ncep.noaa.gov/dailywxmap/index_20050829.html).
 (A Katrina hurrikán útvonalát és a rádiószondás állomásokat külön jelöltük minden térképen.)



21. ábra. Szinoptikus térkép (2005. augusztus 29. 07 UTC). A hurrikán eléri New Orleans-t, Louisiana államot (http://www.hpc.ncep.noaa.gov/dailywxmap/index_20050829.html).



22. ábra. Szinoptikus térkép (2005. augusztus 30. 07 UTC), amikor továbbhalad a hurrikán Mississippi állam felé (http://www.hpc.ncep.noaa.gov/dailywxmap/index_20050829.html).



23. ábra. Szinoptikus térkép (2005. augusztus 31. 07 UTC), amikor a Katrina hurrikán megszűnik (http://www.hpc.ncep.noaa.gov/dailywxmap/index_20050829.html).

Elsőként a labilitási energia változásait figyeltem meg a Katrina hurrikán mozgásának függvényében. A labilitási energia definíció szerint azt mutatja meg, hogy az egységnyi légréteg adott szintre történő emeléséhez mennyi munkát kell végezni és a légréteg emelkedése során mennyi energia szabadul fel (Havasi *et al.*, 2010). A Wyoming-i Egyetem a labilitási energia meghatározására a következő képletet használja:

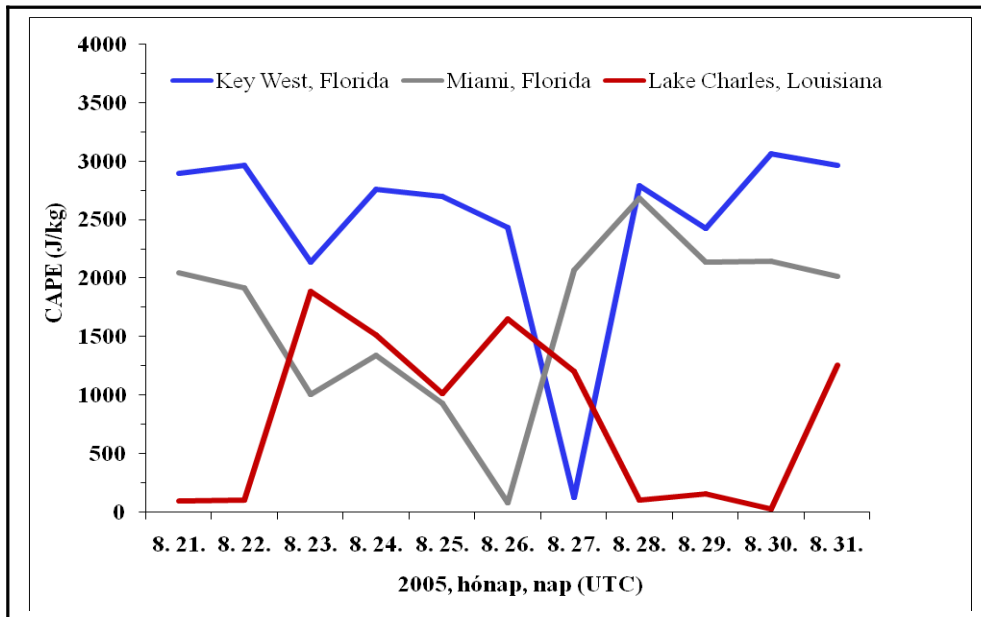
$$\text{CAPE} = \text{Gravty} * \text{Sump} (\text{Delz} * (\text{Tp} - \text{Te}) / \text{Te}),$$

ahol Sump a szabad konvekció szintjéről az egyensúlyi szintre történő felemelkedés, a Delz az emelési mélység, Tp a légoszlop hőmérséklete, amikor a légkör alsó 500 m-es tartományából száraz adiabatikusan a kondenzációs szintre emelkedik, majd utána nedves adiabatikusan, a Te pedig a környezet hőmérséklete.

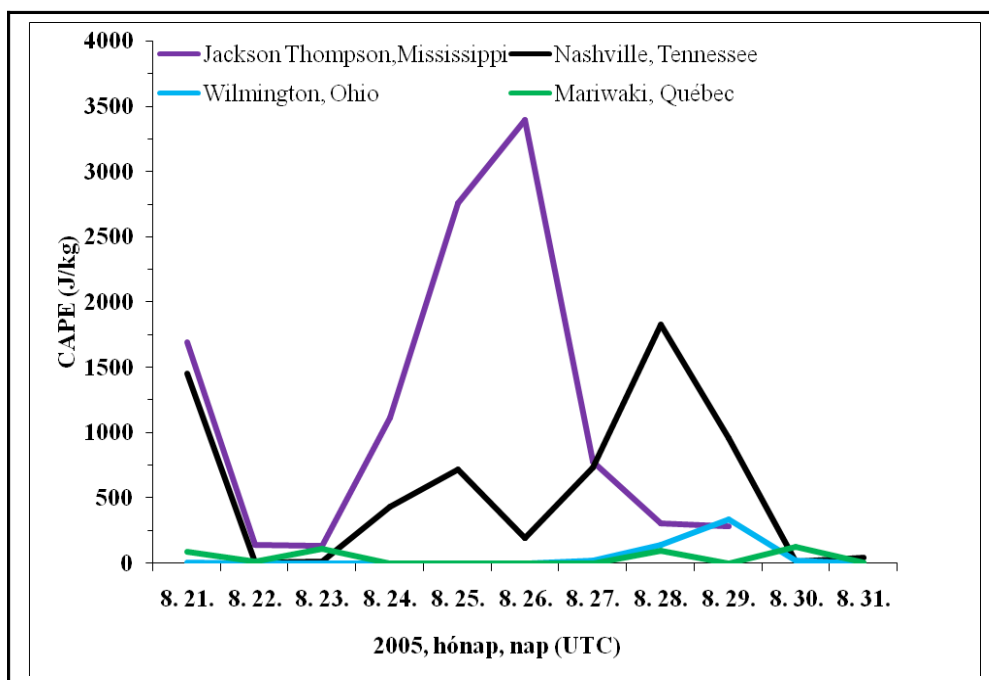
A CAPE értékekre felírható a következő reláció:

- ha < 300, akkor nincs, vagy csak nagyon kicsi a konvektív potenciál;
- ha 300–1000 közötti, akkor gyenge;
- 1000–2500 között mérsékelt,
- > 2500, akkor erős a konvektív potenciális energia.

A 24. ábráról leolvasható, hogy amikor a hurrikán elérte Florida államot 2005. augusztus 24-én, Key Westnél már 2700 J/kg-ot is elérte a labilitási energia értéke, majd ahogyan tovább haladt, erős csökkenés volt tapasztalható. Ahogy tovább mozgott a hurrikán Miami felé, úgy augusztus 26–28. között hirtelen növekedést látunk az ottani CAPE értékekben (2750 J/kg körüli maximális értékek) (a fenti reláció alapján ez rendkívül erős konvektív potenciális energiára utal). Ezt követően – a kontinensen haladva – a trópusi ciklon gyengülésének köszönhetően csökkenő tendencia figyelhető meg a CAPE értékében, s amikor a Katrina eléri Mississippi, Tennessee, Ohio és Québec államokat, már a CAPE maximális értékei 200–300 J/kg-os tartományba esnek, amelyek hazai zivataros helyzetekben is előfordulhatnak. Itt már a Katrina átvonulása előtt és után is ingadozó labilitási energia értékeket mértek (24. ábra).

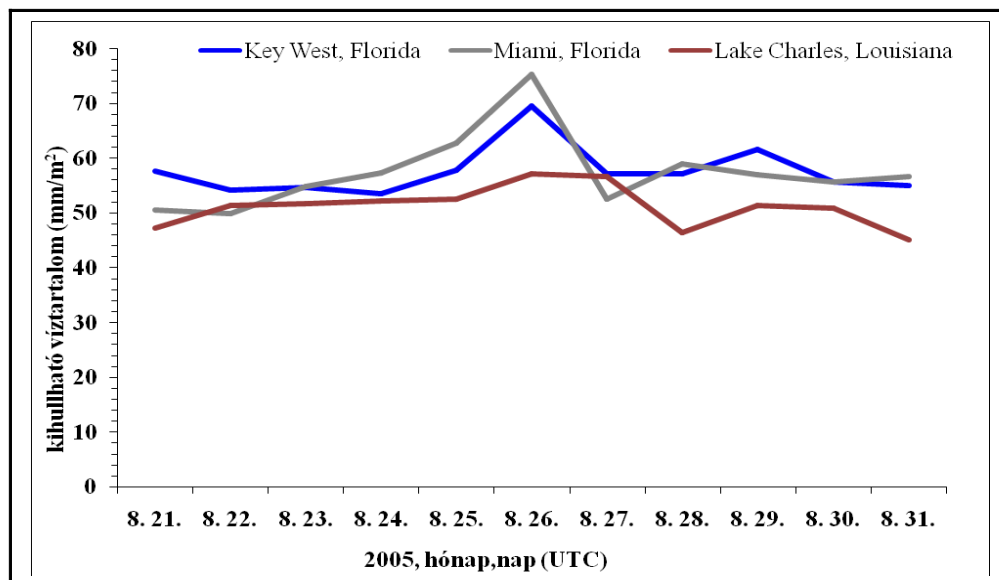


24/a. ábra. A labilitási energia változása a Katrina hurrikánban az útvonalához közeli állomások rádiószondás felszállásból származó adatait tekintve 12 UTC-kor (saját készítésű ábra).

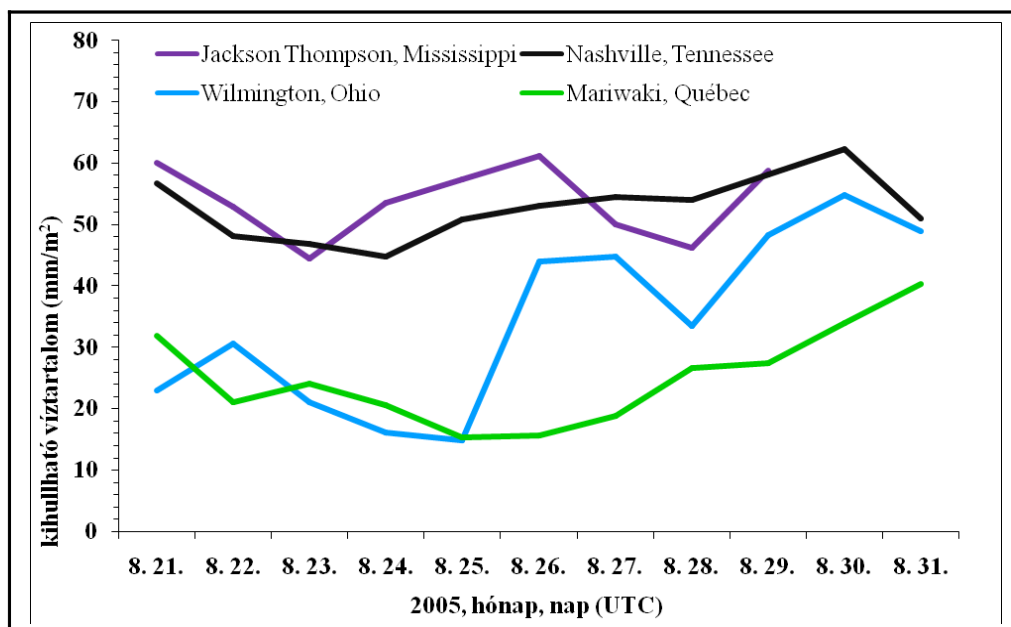


24/b. ábra. A labilitási energia változása a Katrina hurrikánban az útvonalához közeli állomások rádiószondás felszállásból származó adatait tekintve 12 UTC-kor (saját készítésű ábra).

A másik vizsgált index a kihullható víztartalom, ami a teljes légoszlop teljes víztartalmának meghatározására szolgál, értékét általában mm/m^2 -ben adják meg (Havasi et al., 2010).



25/a. ábra. A kihullható víztartalom változása a Katrina hurrikánban az útvonalához közeli állomások rádiószondás felszállásból származó adatait tekintve 12 UTC-kor (saját készítésű ábra).



25/b. A kihullható víztartalom változása a Katrina hurrikánban az útvonalához közeli állomások rádiószondás felszállásból származó adatait tekintve 12 UTC-kor (saját készítésű ábra).

A 25. ábra alapján elmondható, hogy a kihullható víztartalom egyenletes növekedésnek indult már a Katrina hurrikán megszületésekor, s Dél-Floridában 50–60 mm/m² közötti értékek is kialakultak. Miami-ban akkor érte el az index a maximumát, amikor áthaladt a hurrikán a város felett (augusztus 26-án 12 UTC, 78 mm/m²-es kihullható víztartalom érték). Egy nappal ezután, Lake Charles-ban volt kiugró érték, ami azonban az előzőhöz képest 20 mm/m²-rel kevesebb volt. Ahogyan északkelet felé mozgott a Katrina hurrikán, már egyre kevesebb volt a benne lévő víztartalom; augusztus 29–30. között Nashville-nél 58–60 mm/m², augusztus 30-án Wilmingtonban már csak 55 mm/m², míg augusztus 31-én, a megszűnésekor Kanada területén alig 40 mm/m² volt a kihullható víztartalom (ilyen értékeket már a budapesti rádiószondázó állomás adataiból is számíthatunk nyári frontális helyzetekben).

Összegezve azt tapasztaltam, hogy a kihullható víztartalom a Katrina hurrikán élettartamának középső szakaszában (augusztus 27–29.) volt a legmagasabb értékű, majd ahogyan közeledett a felbomlásához, fokozatosan csökkent ez a jelzőszám. A labilitási energiánál szintén hasonló folyamat játszódott le.

V. A Katrina hurrikán hatásai

V. 1. A Katrina károkozása

A Katrina olyan elementáris erővel bírt, hogy a Mexikói-öböl mentén, az Amerikai Egyesült Államok területén óriási természeti, társadalmi károkat okozott, s jelentős biztonságpolitikai hatásai is voltak. Ebben a fejezetben ezt a témakört tárgyalom.

A Katrina hurrikán olyan mértékű szenvedést okozott az embereknek, amekkorát az ország történelme során nem tapasztalt. A halálos áldozatok száma, ami közvetlenül, vagy közvetve a hurrikánhoz kapcsolódott, meghaladta az 1800-at (4. táblázat)

Államok	Halálos áldozatok száma (közvetlen + közvetett) (fő)	Közvetlenül a Katrina által okozott halálos áldozatok száma (fő)
Louisiana	1577	1300
Mississippi	238	200
Florida	14	6
Georgia	2	1
Alabama	2	–
Összesen:	1833	1507

4. táblázat. A Katrina hurrikán áldozatainak száma (*Knabb et al.*, 2005).

Louisiana-ban a legtöbb halálesetet a vihar miatt fellépő árvizek okozták, közülük a legtöbben 60 évnél idősebbek voltak New Orleans környékén. Mississippi államban a halálos esetek túlnyomó részét a pusztító erejű vihar okozta, Floridában, Broward megyében pedig 3 áldozatot követeltek az erős széllesekkel érkező vihar miatt kidőlő fák, a másik 3 esetben fulladás okozta a halált. Georgia államban a hurrikán okozta tornádó követelt egy áldozatot, míg egy másik halálesetet a rossz körülmények számlájára írható autóbaleset okozott. Alabamában nem volt közvetlen áldozata a viharnak, de 2 haláleset itt is történt autóbaleset miatt (*Knabb et al.*, 2005). A rendelkezésre álló adatok alapján elmondható, hogy a Katrina az elmúlt 83 év legerősebb, az USA történelmének pedig 4. vagy 5. legveszélyesebb hurrikánja volt (ennél csak az 1900-ban Texasban, 1928-ban Floridában, 1893-ban Louisiana délkeleti részén és egy Georgia és Dél-Karolina területén tomboló hurrikán okozott több halálesetet).

A Katrina által okozott károk mértéke és hatásai megdöbbentőek. New Orleans városában és környékén otthonok és vállalatok ezrei pusztultak el az árvíz miatt, a híres Superdom tetejének egy része az erős szél miatt lerepült, az ablakok kitörték.



26. ábra. New Orleans városa azután, hogy elérte a Katrina hurrikán. A képeken jól látszik a hatalmas áradás – a város nagy része víz alá került.

A hurrikán Mississippri állam partját is olyan erővel sújtotta, hogy egy teljes tengerparti települést eltörölt a felszínről, továbbá állami intézményekben, történelmi épületekben is nagy kárt okozott. A heves esőzések Dél-Floridában, elsősorban Miami–Dade megyében elárasztottak településeket. Azok a területek, amit nem ért el az áradás, a fellépő tornádók és az erős szél miatt szenvedtek károkat. A pusztító szél nemcsak Mississippri és Alabama államban, hanem még Georgia-ban is károkat okozott a lakóházakban és egy mezőgazdasági üzemben. Az áramkimaradások is gondot jelentettek: 3 millió ember maradt áram nélkül, sokan több hétre. A hurrikán a közlekedés szempontjából kulcsfontosságú utakat vágott el, megbénította a New Orleans városába be- és kivezető autópályák forgalmát. Az árvízben megsérült a hidak többsége. Az áradások másik fontos környezeti hatása, hogy nemcsak a szennyvíz csatornákat mosta ki a víz, hanem az itt működő (New Orleans környéki) vegyipari üzemekből is a súlyosan mérgező anyagokat mosott be a folyókba.

Az Amerikai Biztosító Szolgáltató Csoport adatai szerint azok a károk, amikért a Katrina hurrikán közvetlenül felelős és biztosítva voltak, 40,6 milliárd dollár, a teljes kár azonban ennek az összegnek a kétszerese, csaknem 81 milliárd dollár. Ez a szám teszi a Katrinát az USA történelmének legkölségesebb hurrikánjává.

V. 2. A Katrina társadalmi és biztonságpolitikai hatásai

A Katrina 5 éves évfordulójának emlékére 2010-ben a NASA készített egy űrfelvételekből összeállított animációt, amely bemutatja a Katrina hurrikán mozgását és változását. Felhasználtak hozzá többek között az Aqua műhold AMSR-E jelű detektorával, a Terra műhold TRMM detektorával és a Landsat műhoddal készített képeket is (*Kereszturi, 2010*). A Katrina tombolása után nemcsak az amerikai kormány, de a világ figyelve is a természeti katasztrófák felé összpontosult, ami nemcsak a természetben okozott károk vizsgálatában nyilvánult meg, hanem a biztonságpolitikában is. *(E témakörnek szomorú aktualitást adott a 2011-es japán földrengés és az azt követő szökőár is.)*

A Katrina hurrikán gazdasági és környezeti hatása kihatott a népességre, a turisztikai központokra, az olaj és gépiparra, és a szállítványozásra. New Orleansban munkahelyek tízezrei semmisültek meg, ami óriási átmeneti munkanélküliséghez vezetett, s az érintett közösségekben több millió dollárnyi adó sem került befizetésre. A turizmus is nagy károkat szenvedett, hiszen például a Mississippin számos hajón üzemelő kaszinó tönkrement, emellett parterózió következett be egészen Alabamáig. Jelentősen csökkent az USA kőolaj finomító kapacitása, hiszen több finomítót elárasztott a víz, s emellett platformok és olajfúrótornyok sérültek meg, sodródtak el és borultak fel. Példaként érdemes megemlíteni, hogy egy Alabama közeli fúrótorny is elszabadult, s 1,5 mérföldre északra sodródott el (*Knabb et al., 2005*).

A Katrina a tenger élővilágát is károsította, hiszen több millió gallon olaj ömlött a tengerbe. A kőolaj termelés kiesése napi 1,5 millió hordó olaj volt.

A Katrina nemcsak a természetben és a gazdasági életben okozott károkat, hanem neki köszönhetően romlott a közbiztonság, fosztogatók és fegyveres bandák jelentek meg a megrongált területeken. Problémákat okozott az áramkimaradás és a hatósági szervek infrastruktúrájának sérülése is. A Biztonságpolitikai és Honvédelmi Kutatások Központja egy újfajta szemszögből elemezte a hurrikánt, méghozzá a Katrina az USA biztonságpolitikájára gyakorolt hatását vizsgálta. Miután a hurrikán augusztus 29-én elérte New Orleans-t, a város villamos energia, ivóvíz és élelem nélkül maradt. A fellépő árvíz miatt megkezdtek a lakosok evakuálását, ehhez a haderő hajókat és helikoptereket biztosított, azonban a mentést hátráltatták az egyre gyakoribb erőszakos megmozdulások, amikor azonban megjelentek az első járványra utaló jelek, szeptember 6-án erőszakos kitelepítést hajtottak végre az addig otthonaikat el nem hagyókon.

A katonai bázisokon is elrendelték a hurrikánriadót, biztonságos helyre menekítették a repülőket, hajókat és a személyzetet. A New Orleansban található haditengerészeti létesítményt például az áradás részben előtötte, a vihar lecsendesedése után rövid időn belül helyreállították, s bekapcsolódott a mentésbe. A Katrina a haderőre is jelentős hatással volt, hiszen csökkent az alakulatok harcértéke. Nagy biztonsági kockázatot jelentettek az olyan katonai bázisok is, ahol kevés katona maradt, s így egy esetleges támadást nehéz lett volna kivédeni.

A tények alapján elmondható, hogy a Katrina olyan mértékű pusztítást vitt véghez, amelyet még nem látott és nem tapasztalt az USA. Megszámlálni is nehéz, hogy hány otthon ment tönkre, hány ember sérült vagy halt meg ebben a rendkívüli erővel tomboló hurrikánban.

VI. Összegzés

A trópusi ciklonok olyan alacsony nyomású légköri képződmények, melyek meleg tengerfelszín felett alakulnak ki. Kialakulásukban és fejlődésükben fontos szerepet játszik a meleg tenger, a látens hőfelszabadulás, a konvekció, a tengersizinti légnyomásesés, a szélesebbesség növekedés, és az erős konvergencia.

A szakdolgozatban vizsgáltam a trópusi ciklonok kialakulását, fejlődését, szerkezeti felépítését és mozgását, valamint arra a kérdésre is választ kerestem, hogy van-e bármiféle tényező, ami befolyással lehet a trópusi ciklonok gyakoriság változására. Foglalkoztam azzal is, hogy vajon a jövőben növekedni, csökkenni vagy esetleg stagnálni fog-e a számuk.

A diplomamunka fő témaköre a 2005 augusztusában, az Amerikai Egyesült Államokban tomboló Katrina hurrikán elemzése volt. Bemutattam kialakulását, 5-ös kategóriájú hurrikánná történő fejlődését és megszűnését, illetve átalakulását mérsékeltövi viharrá – elsősorban leíró, szinoptikus szemlélettel.

Bemutattam a labilitási energia és a kihullható víztartalom változását a Katrina útvonalába eső rádiószondás adatok felhasználásával általam készített feldolgozásokkal.

Láthattuk a Katrina hurrikán pusztításait. Emberek tízezrei váltak otthontalanná, munkanélkülivé. Az okozott teljes kár meghaladta a 80 milliárd dollárt.

Nemcsak a természetben, de a gazdasági életben és a biztonságban is jelentős károkat okozott a hurrikán, ami a döntéshozók figyelmét rövidtávon a katasztrófára irányította, hosszú távon pedig megváltoztatta az USA biztonságpolitikai célkitűzéseit: előtérbe került a természeti csapások elleni védekezés, a potenciális veszélyforrások feltárása (*Hornyacsek és Veres, 2007*).

A Katrina hurrikán ugyan csak egy volt a 2005-ös atlanti hurrikánszezonban tomboló 28 trópusi vihar közül, de olyan pusztítást okozott, amelyet véleményem szerint még a mai napig sem sikerült elfelejteniük a tragédiát átélőknek. A Katrinához kapcsolódó katasztrófa miatt nem adják többé ezt a nevet egyetlen hurrikánnak sem.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom családomnak, páromnak, barátaimnak és csoporttársaimnak is a türelemért, a kitartásra való ösztönzésért. Köszönöm, hogy mindig fordulhattam hozzájuk a problémáimmal, kérdéseimmel. Végül szeretném megköszönni témavezetőmnek, Weidinger Tamásnak a témaválasztásban, az iránymutatásban és a dolgozat elkészítésében nyújtott segítséget.

VII. Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Geresdi I., Matyasovszky I., Mészáros R. és Pongrácz R., 2008: A meteorológia alapjai II. rész. *ELTE Meteorológiai Tanszék, Kézirat*, 18–31.
- Bentamy, A., Katsaros, K.B., Mestas–Nuñez, A.M., Drennan, W.M., Forde, E.B. and Roquet, H., 2003: Satellite estimates of wind speed and latent heat flux over the global oceans. *Journal of Climate* **16**, 637–656.
- Businger, S. and Reed, R.J., 1989: Cyclogenesis in cold air masses. *Weather and Forecasting* **4**, 133–156.
- Chan, J.C.L. and Shi, J.E., 1996: Long-term trends and interannual variability in tropical cyclone activity over the western North-Pacific. *Geophysical Research Letters* **23**, 2765–2767.
- Chan, J.C.L., Duan, Y. and Shay, L.K., 2001: Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **58**, 154–172.
- Cione, J.J., Black, P.G. and Houston, S.H., 1999: Surface observations in the hurricane environment. *Monthly Weather Review* **128**, 1550–1561.
- Corbosiero, K.L., Wang, W., Chen, Y., Dudhia, J. and Davis, C., 2007: Advanced research WRF high resolution simulations of the inner core structure of Hurricanes Katrina, Rita and Wilma (2005). *Eighth Annual WRF User's Workshop*, 11-15 June, Boulder, Colorado.
- Czelnai R., Götz G. és Iványi Zs., 1991: Bevezetés a meteorológiába II. *Tankönyvkiadó Budapest*, 118–138.
- Emanuel, K.A., 1986: An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: steady–state maintenance. *Journal of the Atmospheric Sciences* **43** (6), 585–604.
- Emanuel, K.A., 1988: Toward a general theory of hurricanes. *American Scientist* **76**, 371–379.
[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/hurr/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/hurr/home.rxml)
- Emanuel, K.A., 1991: The theory of hurricanes. *Annual Review of Fluid Mechanics* **23**, 179–196.
- Emanuel, K.A., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* **436**, 686–688.

- Evans, J.L. and Hart, R.E., 1999: A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. *Journal of Climate* **14**, 546–564.
- Gnanadesikan, A., Emanuel, K.A., Vecchi, G.A., Anderson, W.G. and Hallberg, R., 2010: How ocean color can steer Pacific tropical cyclones. *Geophysical Research Letters* **37**, 1–19.
- Götz G. és Rákóczi F., 1981: A dinamikus meteorológia alapjai. *Tankönyvkiadó Budapest*, 177–184.
- Gray, W.M., Scheaffer, J.D. and Landsea C.W., 1997: Climate trends associated with multi-decadal variability of Atlantic hurricane activity. In: Diaz, H.F. and Pulwarty, R.S., Eds. *Hurricanes: Climate and Socioeconomic Impacts*, Springer-Verlag, 15–53.
- Gyuró Gy., 1999: Gyilkos szélörvények évada. Hurrikán, a „nagy szél”. *Élet és tudomány* **54**, 1294–1297.
- Havasi A., Tasnádi P. és Weidinger T., 2010: Dinamikus meteorológia I. *ELTE Meteorológiai Tanszék, Kézirat*, 156–201.
- Hornyacsek J. és Veres V., 2007: Katasztrófák, sebezhetőség, biztonság. *Hadtudomány* **17**, 101–113.
- Kafatos, M., Sun, D., Gautam, R., Boybeyi, Z., Yang, R. and Cervone, G., 2006: Role of anomalous warm gulf waters in the intensification of Hurricane Katrina. *Geophysical Research Letters* **33**, 1–5.
- Kereszturi Á., 2010: Öt éve csapott le a Katrina hurrikán.
<http://www.origo.hu/tudomany/vilagur/20100830-katrina-hurrikan-a-nasa-uj-video-felvetelein-minden-korabbinal.html>
- Knabb, R.D., Rhome, J.R. and Brown, D.P., 2005: Tropical cyclone report: Hurricane Katrina 23–30 August 2005. *National Hurricane Center*, 1–42.
- Knabb, R.D., Brown, D.P. and Rhome, J.R., 2006: Tropical cyclone report: Hurricane Rita 18–26 September 2005. *National Hurricane Center*, 1–33.
- Kurunczi R., 2010: Trópusi ciklonok. <http://www.idokep.hu/hirek/tropusi-ciklonok-2>.
- Lakotár K., 2010: Forgó mozgást végző légköri képződmények. *Nyugat-Magyarországi Egyetem Természettudományi Kar, Előadásvázlat*, <http://ttmk.nyme.hu/fldi/Documents>.
- Landsea, C.W., 1993: A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Monthly Weather Review* **121**, 1703–1713.
- Landsea, C.W., Harper, B.A., Hoarau, K. and Knaff, J.A., 2006: Can we detect trends in extreme tropical cyclones? *Science* **313**, 452–454.
- Merics A., 2009: A poláris ciklonok. OTDK dolgozat. *ELTE Meteorológiai Tanszék*, 1–58.

- Ming, X., 2002: Mesoscale meteorology course. *Manuscript*. Center for Analysis and Prediction of Storms University of Oklahoma, 1–19.
<http://twister.ou.edu/MM2002/Hurricanes.pdf>
- Nicholls, N., Landsea, C.W. and Gill, J., 1997: Recent trends in Australian region tropical cyclone activity. *Meteorology and Atmospheric Physics* **65**, 197–205.
- Pasch, R.J., Blake, E.S., Cobb, H.D. and Roberts D.P., 2006: Tropical cyclone report: Hurricane Wilma 15–25 October 2005. *National Hurricane Center*, 1–27.
- Pielke, R.Jr. and Landsea, C.W., 1998: Normalized hurricane damages in the United States: 1925–1995. *Weather and Forecasting* **13**, 621–631.
- Plumb, A., 2006: Tropical cyclones (hurricanes, typhoons). *Massachusetts Institute of Technology*, 1–15.
http://www-eaps.mit.edu/~rap/courses/12333_notes/Chap9.pdf
- Smith, R.K., 2006: Lectures on tropical cyclones. *University of München, Manuscript*, 1–150.
http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~roger/Tropical_Cyclones/
- Tél T., 2003: Környezeti áramlások. *Kézirat, ELTE, Elméleti Fizikai Tanszék*, 1–250.
- Webster, P.J., Holland, G.J., Curry, J.A. and Chang, H.R., 2005: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* **309**, 1844–1846.

Internetes hivatkozások:

- <http://atmos.ucla.edu/~kristen/wrf/wrf.html>
- <http://earthsci.org/>
- <http://hometownweather.com>
- http://hpc.ncep.noaa.gov/dailywxmap/index_20050829.html
- <http://hurricanescience.org/>
- http://mmm.ucar.edu/wrf/users/hurricanes/wrf_ahw.html
- <http://nhc.noaa.gov>
- <http://nimbus.elte.hu/~hagi/dinmet>
- <http://skystef.be/forecast20m.html>
- <http://weather.com>
- <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- http://web.mac.com/gbf108/Site/Tropical_Meteorology_Assignment_One.html
- <http://worldclimatereport.com/>